

UNIVERSIDAD DE GRANADA
Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación (ETSIIT)



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**Necesidad de la compensación térmica y la
estabilización del flujo luminoso en sistemas de
iluminación y señalización basados en LED y OLED**

Doctorado en Tecnologías de la Información y la Comunicación

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

José Ramón Martínez Pérez

Ingeniero en Electrónica

Bajo la dirección de:

Dr. Miguel Carvajal Rodríguez

Dr. Antonio Martínez Olmos

Granada, 2024



UNIVERSIDAD DE GRANADA
Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores,
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de
Telecomunicación (ETSIIT)

Doctorado en Tecnologías de la Información y la Comunicación

**Necesidad de la compensación térmica y la
estabilización del flujo luminoso en sistemas de
iluminación y señalización basados en LED y OLED**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

José Ramón Martínez Pérez

Ingeniero en Electrónica

Bajo la dirección de:

Dr. Miguel Carvajal Rodríguez

Dr. Antonio Martínez Olmos

Granada, 2024

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: José Ramón Martínez Pérez
ISBN: 978-84-1195-761-8
URI: <https://hdl.handle.net/10481/103225>

Agradecimientos

A Miguel, Antonio y Juanjo por su paciencia y constancia.

A Valeo Iluminación por ser puntero en sus productos, haber dado las herramientas necesarias y las facilidades para simultanearlas con el trabajo diario. A todos mis compañeros y jefes que me han ayudado, de forma consciente o inconsciente en la realización del presente trabajo.

A la centenaria Universidad de Granada por su excelente formación y profesionales

A Rafa por su insistencia para que me embarcara en este ambicioso proyecto.

A mis padres y familia por haberme hecho consciente de la necesidad del trabajo duro y regular.

A los padres franciscanos, de Martos y Granada, por su ejemplo docente durante tantos años.

Este trabajo ha sido financiado por la cátedra Valeo - UGR, y el proyecto H2020 ELICSIR (Beca número 857558)

Resumen

El propósito de la presente tesis es mostrar nuevas soluciones aplicadas a la tecnología de la iluminación exterior de la industria de la automoción.

A la ya importante revolución que supuso la aparición del automóvil a finales del siglo XIX, y la accesibilidad de la movilidad personal, que se afianzó durante todo el siglo XX, la industria del automóvil se ha convertido en una de las más dinámicas e innovadoras del panorama actual.

Tan sólo por poner un ejemplo, las tres revoluciones paralelas que está sufriendo el automóvil ahora mismo: el coche eléctrico, el coche conectado y el coche autónomo, puede dar una idea de lo dinámica y disruptiva que es esta industria, así como de los retos a los que se enfrenta a medio plazo.

La iluminación exterior como una parte más de la industria de la automoción no se ha visto exenta de continuos cambios en las últimas décadas. A las tradicionales lámparas con filamento incandescente, empezaron a ser substituidas por las de mayor complejidad y prestaciones como fueron las lámparas de descarga HID.

Esto abrió una increíble ventana de posibilidades con la introducción de la electrónica en los sistemas de iluminación, donde pronto los LED han sido capaz de desplazar al resto de tecnologías por su polivalencia y prestaciones.

La llegada de la iluminación LED ha supuesto toda una revolución en muchos ámbitos: un mayor rendimiento energético, y una menor temperatura de operación lo que permite la utilización de materiales más sencillos y ligeros, unas fuentes de luz más pequeñas, lo que ha aumentado de forma exponencial la capacidad de diseños (aspecto exterior) de los vehículos actuales.

Funciones dinámicas y la pixelización de la luz son los últimos avances de la iluminación de la automoción que han llegado al mercado: tanto la función ruta enmascarada, como las parrillas delanteras y traseras con luz pixelizada para la proyección de información que demandarán los próximos coches autónomos para la interacción hombre-máquina; son algunos de las últimas tendencias que están llegando al mercado

Todos estos avances tecnológicos, están hechos a partir de pequeños saltos; como se encargó de recordarnos Carl Sagan en la popular serie de los años 80 “Cosmos”, refiriéndose a la cita de Newton “Si he visto más lejos es poniéndome sobre los hombros de gigantes” que a su vez puede trazarse casi hasta la antigüedad romana. El entender correctamente el funcionamiento de los componentes, y pensar en soluciones que con pequeñas modificaciones permitan “exprimir” un poco más los componentes para poder añadir funcionalidad a los sistemas actuales.

En el presente trabajo se presentan tres pequeños avances, fruto del trabajo diario del autor, y sus compañeros, en el desarrollo de diferentes proyectos de automoción en la multinacional francesa Valeo Iluminación, proveedores de nivel 1 del sector, entregando sus productos directamente a los fabricantes de coches, así como su trabajo y vinculación con la Universidad de Granada durante los últimos 25 años.

Dos trabajos presentan soluciones a la dependencia térmica de los LED frente a la temperatura, tanto para compensar tanto el flujo lumínico como la tensión, permitiendo de esta forma poder adaptar

los sistemas de forma dinámica a las condiciones ambientales, mejorando y optimizando la energía necesaria y la gestión térmica de los sistemas actuales. (ventiladores, radiadores, etc.)

En el último trabajo, de cara a mejorar la fiabilidad de los sistemas y mejorar las capacidades autodiagnóstico de los sistemas de iluminación, se propone la implementación de modelos avanzados de diagnóstico, tanto siguiente modelos matemáticos o las actuales y tan de moda herramientas de inteligencia artificial, para que los sistemas de iluminación puedan conocer el estado de sus componentes.

Es seguro que estos pequeños avances serán de interés de cara a mejorar el estado del arte actual de los sistemas de iluminación pudiendo ayudar a hacerlos más eficientes y seguros en estos tiempos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de aumento de la seguridad y de coches inteligentes y autónomos.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	viii
Abreviaturas y acrónimos	x
1 Iluminación de automoción	1
1.1 Breve historia de la iluminación de automoción	1
1.2 Fuentes luminosas en automoción	7
1.3 El LED como fuente lumínica	8
1.4 El LED en automoción: usos y drivers	11
1.4.1 Drivers para LED	11
1.4.2 Electrónica de automoción	15
1.5 Empaquetado y fiabilidad	15
1.5.1 Fiabilidad	17
1.5.2 Envejecimiento	17
1.6 Dependencia térmica	18
1.6.1 Dependencia de la tensión en directo con la temperatura	18
1.6.2 Dependencia lumínica con la temperatura	20
1.6.3 Dependencia colorimétrica con la temperatura	21
1.7 Fallos y diagnóstico	23
1.8 Gestión de “bines”	24
1.9 Gestión térmica de sistemas electrónicos	25
1.9.1 Materiales	27
1.9.2 Transferencia térmica	27
1.9.3 Protección térmica	29
2 Mecanismos de compensación térmica	31
2.1 Métodos de compensación térmica del flujo	31
2.1.1 Análisis inicial	32
2.1.2 Modelo térmico	32
2.1.3 Materiales y métodos	36
2.1.4 Resultados	37
2.1.5 Conclusiones	43

2.2	Métodos de compensación térmica de la tensión para mallas de LED	44
2.2.1	Análisis básico	45
2.2.2	Materiales y métodos	49
2.2.3	Resultados experimentales	53
2.2.4	Conclusiones	60
3	Detección avanzada de LED en cortocircuito para aplicaciones de iluminación de automoción	61
3.1	Detección de fallos estáticamente mediante umbrales	62
3.2	Modelos alternativos propuestos	63
3.2.1	Modelo matemático	63
3.2.2	Red Neuronal	65
3.3	Validación experimental	67
3.3.1	Ejemplo de cálculo de umbrales	67
3.3.2	Ejemplos numéricos	70
3.3.3	Modelos evaluados	70
3.3.4	Red Neuronal	72
3.3.5	Diagrama de flujo	74
3.4	Resultados	76
3.4.1	Esfuerzo computacional	79
3.5	Conclusiones	80
4	Conclusiones y Méritos	81
4.1	Conclusiones	81
4.2	Artículos	82
4.3	Patentes	82
4.4	Próximos trabajos	82
	Referencias	85

Lista de Figuras

1.1	Sistema comercial de señalización trasera	2
1.2	Proyección de la luz de cruce y ruta sobre carretera	3
1.3	Diagrama de cromaticidad CIE 1931	5
1.4	Diagrama colorimétrico CIE1931 y colores de reglamentarios	7
1.5	Lámparas H7 (a), P21 (b), PY21 (c), PR21 (d) y Xenon D3s (e)	8
1.6	Diagrama de bandas mostrando diferentes tipos de recombinación	9
1.7	Espectro de emisión de chips AlInGaP, amarillo, rojo y rojo oscuro	9
1.8	Espectro de emisión típico de un LED blanco con un chip azul y deposición de fósforo	10
1.9	Estructura (construcción) de un LED blanco: Un chip azul sobre el que se deposita una capa de fósforo	10
1.10	Circuito resistivo	12
1.11	Espejo de corriente	12
1.12	Driver de corriente lineal integrado	13
1.13	Convertidor DC/DC	13
1.14	Convertidor DC/DC y drivers de corriente	14
1.15	Diferentes tipos de chips por su interconexión	16
1.16	Construcción de un sistema LED	16
1.17	Tensión en directo de un LED rojo AlInGaP (en rojo) y de un LED blanco InGaN (en azul) a corriente constante	19
1.18	Tensión relativa en directo de un LED rojo AlInGaP (en rojo) y de un LED blanco InGaN (en azul) a corriente constante	20
1.19	Flujo relativo vs. temperatura para diferentes tipos de LED	21
1.20	Longitud de onda dominante para LED AlInGap vs. temperatura de unión	22
1.21	Dependencia del color para LED blancos InGaN por conversión de fósforo vs. temperatura, medido según coordenadas del diagrama CIE 1931 en Cx y Cy	23
1.22	Clasificación de colores para el LED Osram KW CELNM1.TG según diagrama CIE1931	25
1.23	Modelización térmica de un sistema electrónico	26
1.24	Principio de convección de un foco caliente en un fluido confinado	28
1.25	Principio de conducción de calor, desde un foco caliente hasta un objeto en contacto con él	28
1.26	Ejemplo de sistema térmico con convección forzada usando un ventilador	29
1.27	Modelo de protección térmica	30

2.1	Circuito utilizado para polarizar los LED	33
2.2	Diferentes curvas de NTC con diferentes parámetros B	34
2.3	Red de resistencias para usar en el circuito de control	35
2.4	PCB con los LED seleccionados y drivers integrados (A). Sistema colocado en el interior de la cámara climática (B).	37
2.5	Caracterización óptica de los LED.	38
2.6	Corrientes de polarización teóricas para compensación térmica: requeridas (línea azul) y calculadas con el modelo propuesto (puntos negros).	40
2.7	Flujo óptico relativo y corriente de polarización con compensación térmica	41
2.8	Eficiencia luminosa de los LED estudiados	43
2.9	Topologías: DC/DC de corriente (a) y DC/DC de tensión con driver lineales (b)	45
2.10	Convertidor DC/DC y drivers de corriente	46
2.11	Configuración de un convertidor DC/DC mediante un lazo de realimentación resistivo (a). Configuración Resistencia / NTC para substituir R_1 (b).	48
2.12	Circuito evaluado	50
2.13	Fotografía de las placas implementando la configuración del DC/DC y LED con drivers de corriente lineales	51
2.14	Nomenclatura de componentes propuesta	54
2.15	Comparación de diferentes curvas y tensión demandada por los LEDs normalizada	55
2.16	Tensión de salida medida para los diferentes modelos	56
2.17	Potencia disipada en el driver de corriente (W) frente a temperatura	58
2.18	Potencia de entrada y salida de la configuración #3 evaluada en este trabajo, junto con la eficiencia en función de la temperatura ambiente	59
2.19	Eficiencia del modelo estático y dinámico como potencia de entrada frente a potencia entregada a los LED	60
3.1	Circuito tipo con una unidad driver integrado con una carga compuesta por LED y sensores	61
3.2	Diagrama de flujo del modelo matemático de detección de fallo en cortocircuito	65
3.3	Curva tensión vs. corriente para Nichia NCSW170DT	67
3.4	Curva corriente vs. temperatura para Nichia NCSW170DT	68
3.5	Umbrales máximos y mínimos para diferente número de LED NCSW170DT en serie	69
3.6	Circuito propuesto para evaluar la detección de LED en cortocircuito	71
3.7	Evaluación de diferentes configuraciones de RRNN	73
3.8	Configuración final de la RRNN utilizada	73
3.9	Flujo de control utilizado para la evaluación del modelo	74
3.10	Evaluación experimental del sistema en la cámara climática	75
3.11	Medidas experimentales de un sistema con 12 LED	78
3.12	Medidas experimentales y calibradas de un sistema con 12 LED. La línea amarilla para sistemas OK está en torno a 0; la línea azul está en torno a la tensión en directo de un LED blanco	79

Lista de Tablas

1.1	LED, colores, energía y voltaje típico	9
1.2	Resumen de ensayos de larga duración y mantenimiento de flujo lumínico para LED de Nichia NFSL757G	18
1.3	Clasificación de flujo lumínico para el LED Osram KW CELNM1.TG	24
1.4	Clasificación de voltajes para el LED Osram KW CELNM1.TG	24
2.1	Diferentes drivers de corriente integrados y sus parámetros principales	36
2.2	Parámetros	39
2.3	Resistencias para cada ensayo	39
2.4	Variación máxima ($\Delta\varphi_r$) y sensibilidad a la temperatura (δ_r) del flujo lumínico relativo	42
2.5	Diferentes configuraciones de número de LED (m) y parámetros V_o	50
2.6	Configuración del sistema evaluado	51
2.7	Bines de tensión considerados para los LED elegidos y variación con la temperatura	52
2.8	Diferentes configuraciones evaluadas para el convertidor DC/DC	54
2.9	Caída de tensión en el driver de corriente (V) frente a temperatura	56
2.10	Potencia disipada en los drivers de corriente con diferentes configuraciones y a diferentes temperaturas	57
2.11	Potencia y eficiencia del modelo estático y dinámico como potencia de entrada frente a potencia entregada a los LED	60
3.1	Dispersión tensión en directo LED NCSW170DT (Bin de tensión)	67
3.2	Umrales estáticos para diferente número de LED NCSW170DT en serie	69
3.3	Evaluación de diferentes Redes Neuronales	72
3.4	Resultados con un LED en cortocircuito	76
3.5	Resultados con un LED en cortocircuito en sistemas con 12 LED	77
3.6	Tasa de aciertos para sistemas con varios fallos	78
3.7	Esfuerzo computacional de cada método	79
3.8	Estimación de recursos computacionales (Tiempo de ejecución y sobrecarga)	80
3.9	Estimación de recursos computacionales (memoria)	80

Abreviaturas y acrónimos

- LED** Diodo emisor de luz (*Light-Emitting Diode*)
- HID** Lámparas de alta intensidad de descarga (*High Intensity Discharge*)
- ADAS** Sistemas avanzados de asistencia al conductor (*Advanced Driver Assistance Systems*)
- DRL** Luz diurna (*Day Running Light*)
- CIE** Comisión Internacional de la Iluminación.
- IR** Infrarrojo
- ESD** Descarga electrostática *Electrostatic Discharge*
- SS** Estado sólido *Solid-State*
- NTC** Termistor de coeficiente negativo *Negative Temperature Coefficient*
- RGB** Rojo Verde Azul *Red - Green - Blue*
- PCB** Placa de circuito impreso *Printed Circuit Board*
- FR** Retardante de fuego *Flame Retardant*
- MCPCB** Placa de circuito impreso de núcleo metálico *Metal Core Printed Circuit Board*
- IMS** Metal aislado del substrato *Insulator Metal Substrate*
- AI** Inteligencia Artificial *Artificial Intelligence*
- ECU** Centralita electrónica *Electronic Control Unit*
- EOL** Fin de línea *End of Line*
- IR** Infrarrojo.
- AFS** Sistema Avanzado de iluminación Frontal *Adaptive Frontlight System*

Capítulo 1

Iluminación de automoción

1.1 Breve historia de la iluminación de automoción

Automoción e iluminación exterior han ido de la mano prácticamente desde la aparición de los primeros automóviles a finales del siglo XIX; por un lado para permitir la conducción nocturna y como segundo punto como sucesores de los coches de caballos que ya incluían unos incipientes sistemas de iluminación basados en velas y lámparas de gas quemando acetileno o queroseno.

Con la entrada del siglo XX aparecen los primeros sistemas eléctricos para la iluminación, añadiendo la necesidad de incluir un sistema de generación eléctrica en el coche (dinamo) para generar la electricidad necesaria.

Junto con la inclusión de los sistemas de iluminación como un sistema más de los vehículos y su integración estilística, fue en 1991, cuando se incluyó el primer sistema de iluminación con lámparas de descarga (HID), implicando el uso de los primeros drivers con electrónica compleja para excitar la lámpara.

También fue en la década de los 90s cuando aparecieron las primeras funciones con LED para la automoción; empezando por las funciones más sencillas y de menor potencia, señalización trasera, para ir paulatinamente incrementándose en complejidad y capacidad, hasta llegar al nivel actual con sistemas de iluminación realizados completamente con LED con sistemas *pixelizados* e incluso de proyección [1], [2] y [3].

Es importante entender los diferentes elementos que consideraremos forman parte de la iluminación de automoción. En dos grandes grupos tenemos que diferenciar:

- **Sistemas de señalización:** Los sistemas de señalización son los que están diseñados para ser vistos e interactuar con el entorno. A su vez pueden clasificarse en:
 - Sistemas de señalización traseros: Que cubren las funciones:
 - * Función posición trasera para indicar la presencia del vehículo.
 - * Función freno trasera para indicar la intención del conductor de reducir la velocidad.

- * Función indicador de dirección trasera para indicar la intención del conductor de cambiar la dirección de marcha, así como luces de emergencia.
- * Función marcha atrás, para indicar la intención del conductor de cambiar el sentido de la marcha, así como ayudar a los sistemas ADAS, como cámaras de visión traseras.
- * Función niebla trasera, para indicar la presencia del vehículo en conducciones de reducida visibilidad. En la Figura 1.1 [4] puede verse un sistema comercial.

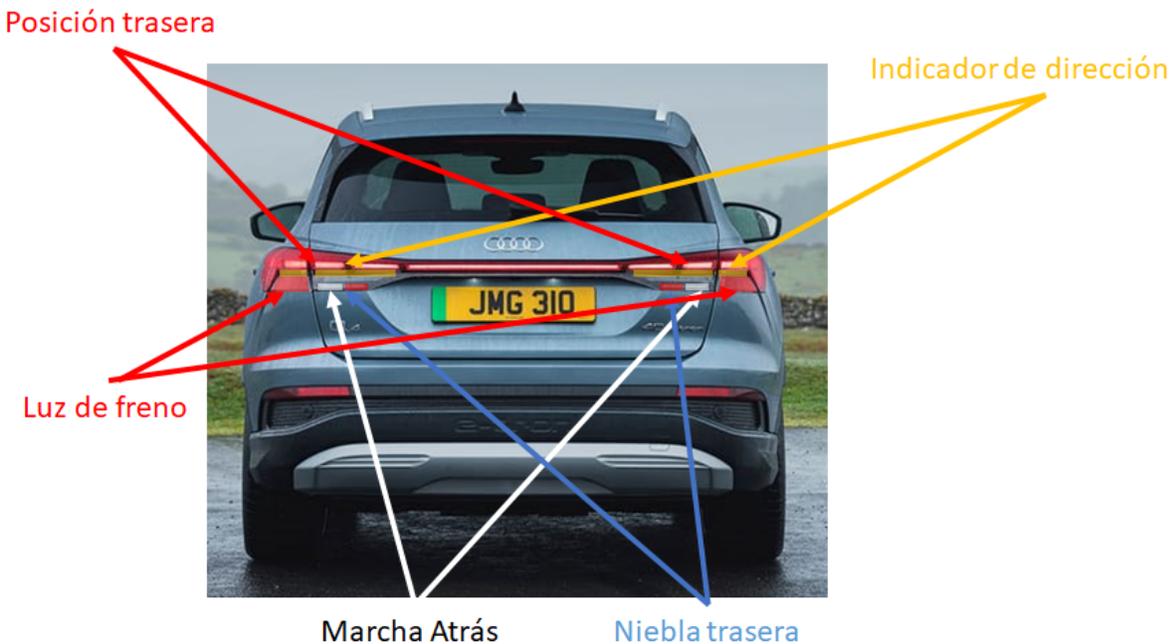


Figura 1.1: Sistema comercial de señalización trasera

- Sistemas de señalización delantera: Que cubren las funciones:
 - * Luz Diurna, responsable de indicar la presencia del vehículo durante el día.
 - * Luz de posición delantera para indicar la presencia del vehículo de noche.
 - * Función indicador de dirección delantera para indicar la intención del conductor de cambiar la dirección de marcha, y que también puede funcionar como luces de emergencia.
- **Sistemas de iluminación:** Son los sistemas empleados para iluminar el entorno cercano del vehículo en condiciones adversas de iluminación ambiental:
 - Luz de cruce: Permite al conductor ver tanto en trayectos urbanos como interurbanos sin deslumbrar al resto del tráfico
 - Luz de ruta: Permite al conductor ver en trayectos interurbanos, maximizando la distancia iluminada.

- Luz de niebla delantera: Pensada para condiciones climáticas adversas evitando el deslumbramiento del propio conductor.
- Luces de curva: Son sistemas de iluminación para sistemas avanzados de iluminación (AFS) que permite iluminar de forma lateral el tráfico circundante.

En la Figura 1.2 puede verse la proyección sobre la carretera de un vehículo con la proyección del haz de la luz de cruce y de ruta.

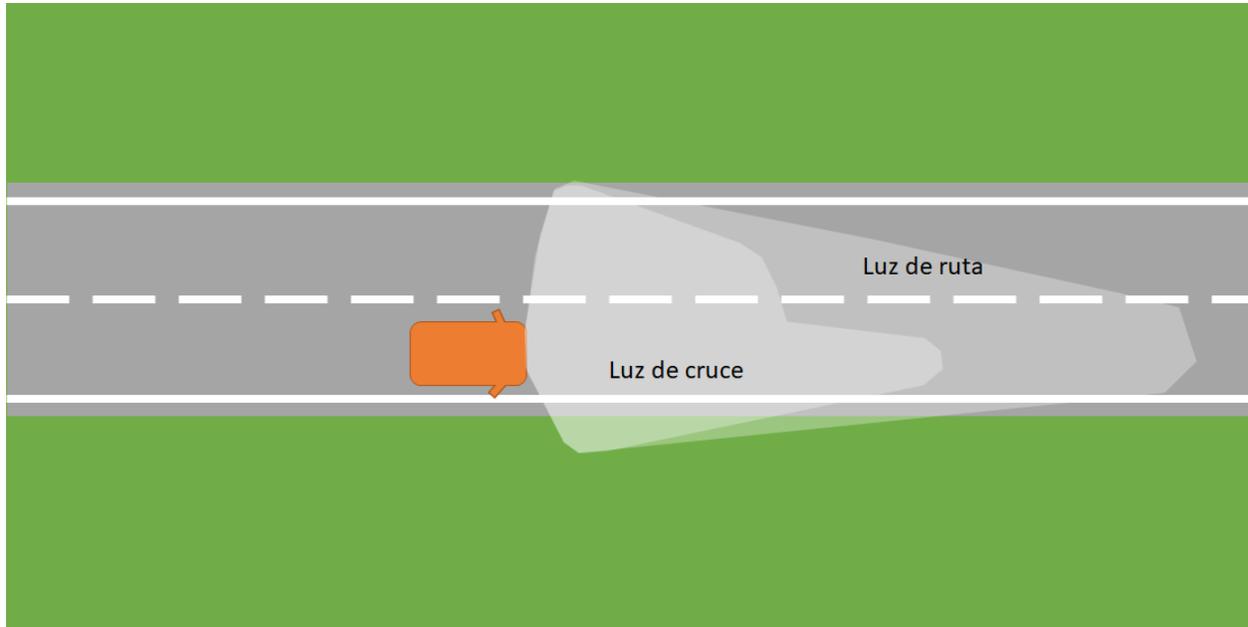


Figura 1.2: Proyección de la luz de cruce y ruta sobre carretera

Es importante destacar las diferencias entre funciones, en términos de rendimiento luminoso (y por tanto potencia de las fuentes lumínicas) y de color (blanco, amarillo anaranjado y rojo).

Todas estas funciones están sujetas a homologaciones de diferentes organismos, centrándonos en los mercados más importantes a nivel mundial que son:

- **UNECE:** Es un organismo dependiente de las Naciones Unidas; por nombre completo “Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa”; se encarga de promocionar la cooperación económica entre sus Estados miembros; su división de transporte se encarga de proporcionar los servicios de la secretaría al foro mundial para armonización de las regulaciones de vehículos; habiendo creado en 1958 el acuerdo para la aprobación y certificación de vehículos y sus reglamentos anexos. De esta forma los países adscritos a la legislación dictaminada por la UNECE facilita el intercambio y diseño de componentes entre ellas; siendo las normas más importantes:
 - R48: “Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en lo que respecta a la instalación de dispositivos de iluminación y señalización luminosa” [5].
 - R148: “Disposiciones uniformes relativas a la homologación de dispositivos de señalización luminosa (luces) para vehículos de motor y sus remolques” [6].

- R149: “ Disposiciones uniformes relativas a la homologación de los dispositivos de iluminación viaria (lámparas) y sistemas para vehículos de motor” [7].
- **SAE:** Por sus siglas en inglés “*Society of Automotive Engineers*”, genera los estándares que son aplicadas a través de la FMVSS (“*Federal Motor Vehicle Safety Standard*”), siendo en este caso la norma número 108 la que aplica a la automoción de iluminación.
- Otros países pueden tener variaciones frente a las dos normas principales, como por ejemplo puede ser el caso de Canadá (frente a la SAE estadounidense) o China (frente a la UNECE).

Parámetros físicos

Por la naturaleza del trabajo, tendremos que familiarizarnos con las medidas físicas de la luz [8]:

- **Flujo luminoso:** Es toda la potencia luminosa emitida por una fuente, independientemente de la dirección de emisión y ponderada por la sensibilidad del ojo humano a cada longitud de onda. Se calibra usando la “esfera integradora”, siendo su unidad de medida el lúmen (lm.)
- **Intensidad luminosa:** Es el flujo luminoso por ángulo sólido, siendo su unidad de medida la candela (cd.), definida como lúmen / esterorradian.
- **Iluminancia:** Es el flujo luminoso incidente por superficie, midiéndose en lux (lx.), siendo 1 lúmen / m².
- **Luminancia:** Es la intensidad luminosa emitida por una superficie en una determinada dirección; midiéndose en cd/m².

Medición del color

Color, considerado como la percepción que produce la recepción de la radiación electromagnética comprendida entre las longitudes de onda 380 y 780 nm en el cerebro humano, tiene una gran componente subjetiva; por lo que para la medición del color, recurriremos al diagrama CIE 1931; como puede comprobarse en la Figura 1.3 [8] [9].

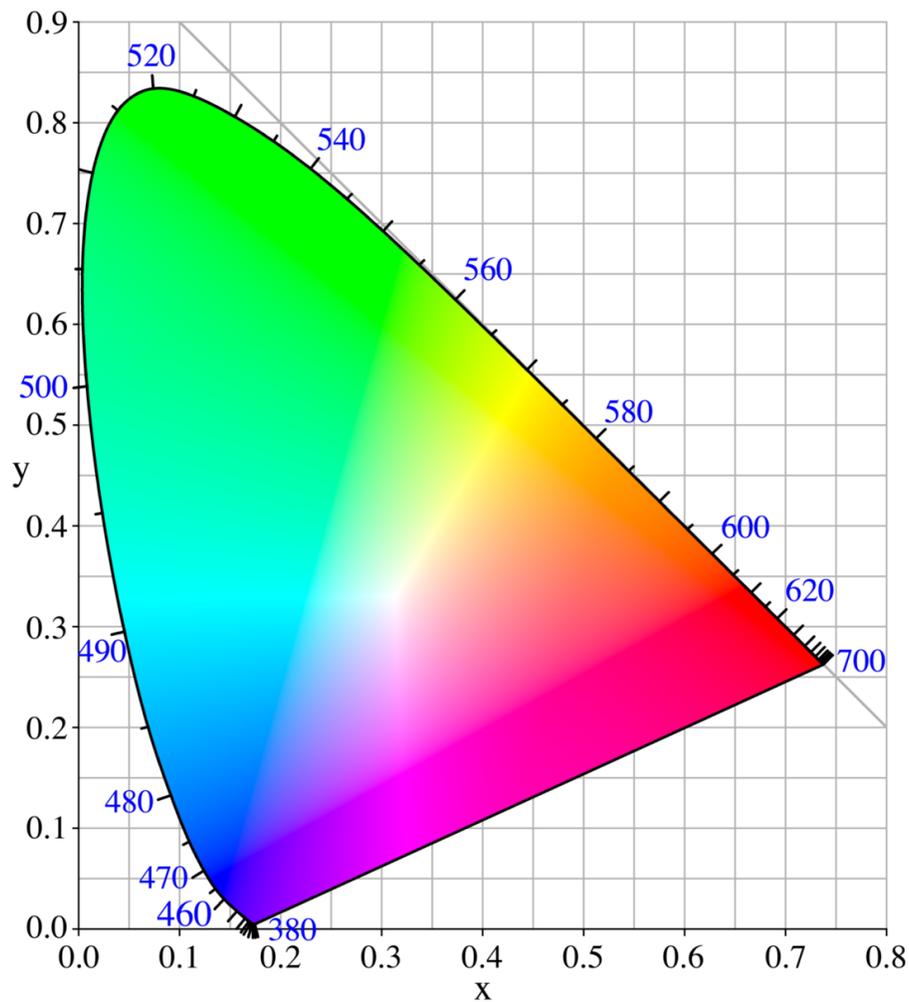


Figura 1.3: Diagrama de cromaticidad CIE 1931

El borde exterior incluye los colores correspondientes a longitudes monocromáticas; siendo todo el interior del diagrama compuesto por la adición de varias fuentes monocromáticas.

Este trabajo se centrará en tres colores principales utilizados en la iluminación de automoción:

- Rojo: Tal y como se define en las normas de reglamentación [5], se define el color rojo por los bordes:
 - R_{12} : Límite amarillo: $y = 0.335$.
 - R_{23} : Límite absoluto.
 - R_{34} : Línea extendida en el rango violeta y rojo según los límites absolutos.
 - R_{41} : Límite violeta: $y = 0.98 - x$.

Con los siguientes puntos de intersección:

	Cx	Cy
R ₁ :	0.645	0.335
R ₂ :	0.665	0.335
R ₃ :	0.735	0.265
R ₄ :	0.721	0.259

- **Amarillo (Ambar):** Tal y como se define en las normas de reglamentación [5], se define el color amarillo (ambar) dentro de los siguientes límites:

- A₁₂: Límite verde: $y = x - 0.120$.
- A₂₃: Límite absoluto.
- A₃₄: Límite rojo: $y = 0.39$.
- A₄₁: Límite blanco: $y = 0.790 - 0.670 \cdot x$.

Con los siguientes puntos de intersección:

	Cx	Cy
R ₁ :	0.545	0.425
R ₂ :	0.560	0.440
R ₃ :	0.609	0.390
R ₄ :	0.597	0.390

- **Blanco:** Tal y como se define en las normas de reglamentación [5] y se define el color blanco como el área definida por los siguientes límites:

- W₁₂: Límite verde: $y = 0.150 + 0.640 \cdot x$.
- W₂₃: Límite verde-amarillo: $y = 0.440$.
- W₃₄: Límite amarillo: $x = 0.5$.
- W₄₅: Límite rojo-violeta: $x = 0.382$.
- W₅₆: Límite violeta: $y = 0.05 + 0.75 \cdot x$.
- W₆₁: Límite azul: $x = 0.310$.

Con los siguientes puntos de intersección:

Con los siguientes puntos de intersección:

En la Figura 1.4 puede verse el diagrama colorimétrico completo CIE1931 y los colores rojos, ambar y blancos tal y como lo define la homologación.

	Cx	Cy
W ₁ :	0.310	0.348
W ₂ :	0.453	0.440
W ₃ :	0.500	0.440
W ₄ :	0.500	0.382
W ₅ :	0.443	0.382
W ₆ :	0.310	0.283

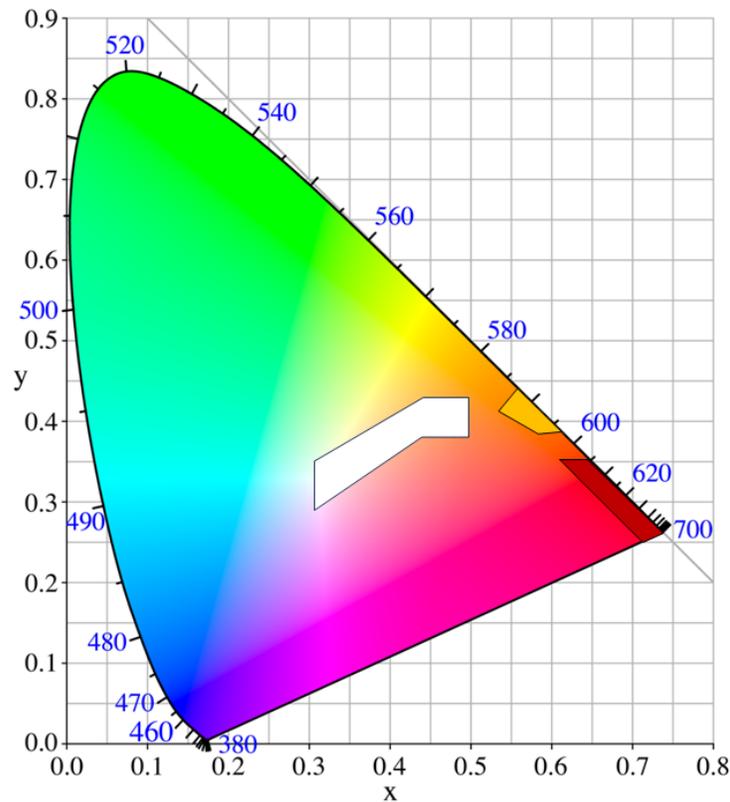


Figura 1.4: Diagrama colorimétrico CIE1931 y colores de reglamentarios

1.2 Fuentes luminosas en automoción

Desde la segunda mitad del siglo XX, las fuentes luminosas usadas principalmente en automoción han sido las lámparas eléctricas, y sus evoluciones, las halógenas y lámparas de descarga Xenon (HID), con una eficiencia típica de:

- Iluminación; pudiendo usarse como una lámpara típica la “H7”, con un flujo de $1500 \text{ lm} \pm 10 \%$, a una potencia nominal de 55 W, lo que da una eficiencia de 27.3 lm/W [10]. Puede verse en la Figura 1.5.a.
- Señalización; pudiendo usarse una lámpara típica como la “P21”, con un flujo de $460 \text{ lm} \pm 15 \%$, a una potencia nominal de 21 W, lo que da una eficiencia de 22 lm/W [11]. Puede verse

en la Figura 1.5.b. En este tipo de lámparas, la coloración se consigue mediante el tintado de la ampolla de cristal, reduciéndose la eficiencia:

- Lámparas amarillas [12] como la PY21W con 280 lm. a 21 W (13.3 lm/W). Puede verse en la Figura 1.5.c.
- Lámparas rojas [13] como la PR21W con 105 lm. a 21 W (5 lm/W). Puede verse en la Figura 1.5.d.
- Lámparas de descarga Xenon, que consiguen un flujo de 3200 lm. a una potencia nominal de 35 W (eficiencia de 91.4 lm/W), con la ayuda de un balastro externo [14]; puede verse en la Figura 1.5.e.



Figura 1.5: Lámparas H7 (a), P21 (b), PY21 (c), PR21 (d) y Xenon D3s (e)

1.3 El LED como fuente lumínica

Con el descubrimiento del fenómeno electroluminiscente a principios del siglo XX, con compuestos de SiC, durante todo el resto del siglo, y la mejor comprensión de los comportamientos detrás del mismo, se mejoraron los semiconductores utilizados para los LED [15].

Los LED no dejan de ser unos tipos específicos de diodos, que tienen la característica de que la recombinación de los pares electrón-hueco producen fotones en el espectro visible. Esto limita en gran cantidad los materiales que deben usarse para construir los cristales semiconductores; así como optimizar la eficiencia de la recombinación visible y la extracción de estos fotones del semiconductor. De la misma forma también limita el tipo de empaquetado que deben emplearse al tener que ser parcialmente transparentes, y pudiendo ser no tan robustos como los empaquetados de otros tipos de chips.

La energía que porten los fotones generados durante la recombinación de los pares electrones-huecos (Figura 1.6), determinará el color de la luz emitida, y dependerá de la energía entre las bandas prohibidas, y por tanto de la tensión en directa que necesiten los LED, en gran medida.

De [15], puede generalizarse unos datos similares a los que pueden leerse en la Tabla 1.1:

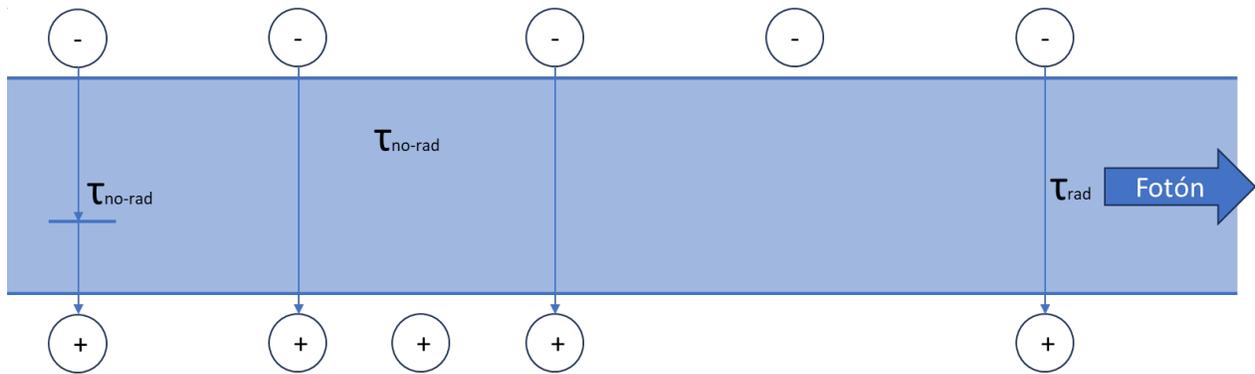


Figura 1.6: Diagrama de bandas mostrando diferentes tipos de recombinación

Tabla 1.1: LED, colores, energía y voltaje típico

Color	Longitud de onda (nm)	Energía de los fotones (eV)	Tensión (V)
Azul	470	2.6	2.6
Verde	550	2.2	2.2
Rojo	650	1.9	1.9
IR	870	1.4	1.4

La gran revolución que supuso a partir de los años 80 del siglo XX la aparición de los LED basados en $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$, son los LED dominantes para las longitudes de onda comprendidas entre el rojo (630 nm) hasta el amarillo (588 nm). Los espectros de emisión para cada color (dependiendo de la composición exacta del semiconductor), así como la respuesta del ojo humano pueden verse en la Figura 1.7.

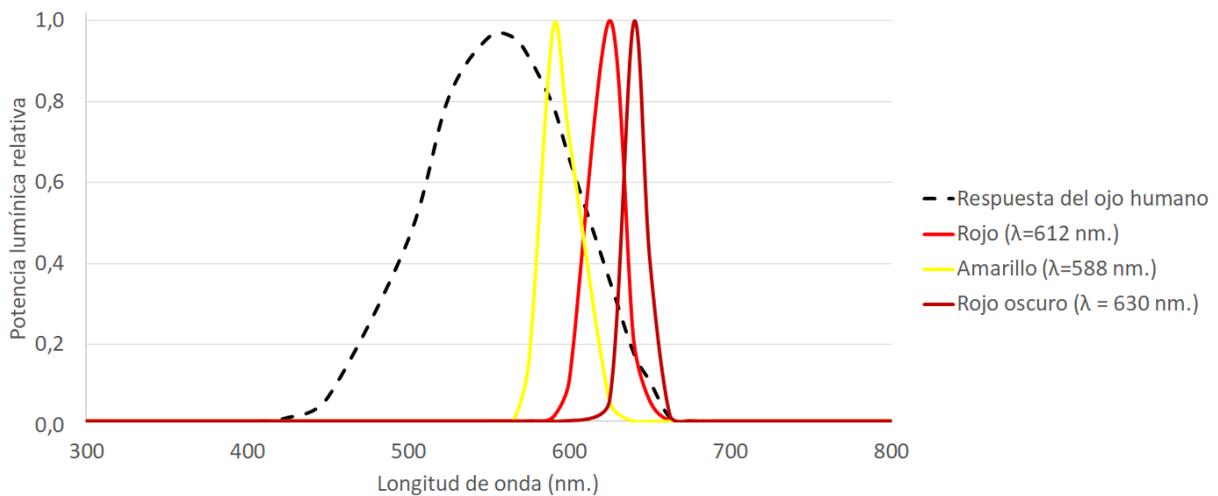


Figura 1.7: Espectro de emisión de chips AlInGaP, amarillo, rojo y rojo oscuro

De la misma forma, la aparición de LED azules de alta eficiencia, a partir de los compuestos InGaN en los años 90 del siglo XX en la compañía japonesa “Nichia”, de la mano los investigadores liderados

por Shuji Nakamura [16], premio Nóbel de Física del año 2014, permitieron la aparición de LED blancos de alto rendimiento, al ser capaces de transformar la luz azul en blanca mediante la adición de una capa de fósforo.

Uno de los métodos de conversión de la luz azul en luz blanca, se produce mediante una deposición de un fósforo sobre el propio chip, que absorbe parte de los fotones azules, reduciendo parte de su energía y liberándolos con menor energía, formando luz blanca; en la Figura 1.8 puede verse el espectro de emisión típico de un LED blanco, con un chip azul y conversión mediante fósforo. En la Figura 1.9 puede verse una estructura típica: Un LED (chip) azul sobre el que se ha depositado una capa de fósforo que se encarga de convertir la longitud de onda de alguno de los fotones emitidos.

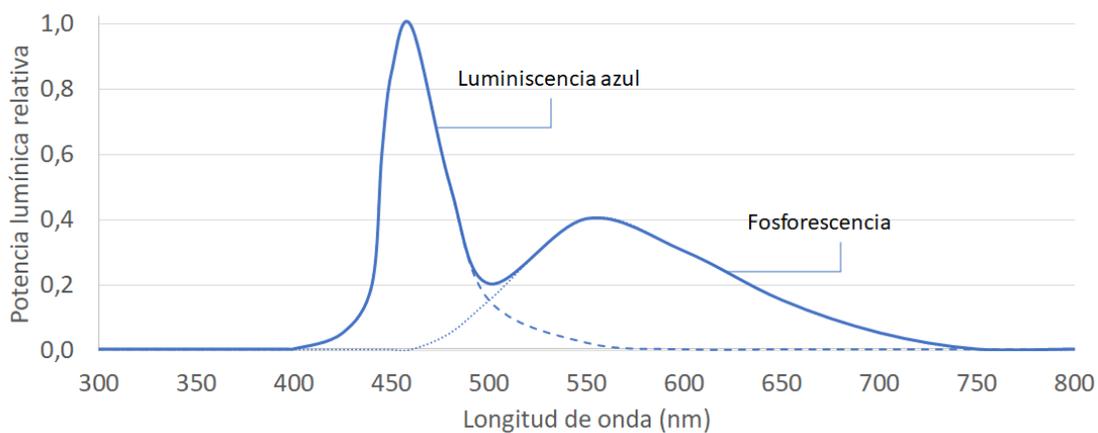


Figura 1.8: Espectro de emisión típico de un LED blanco con un chip azul y deposición de fósforo

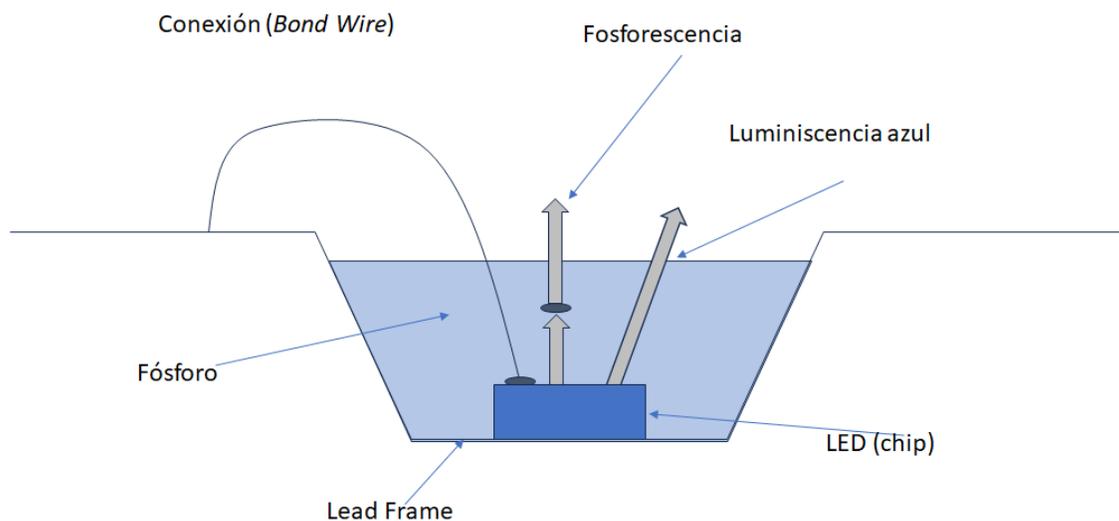


Figura 1.9: Estructura (construcción) de un LED blanco: Un chip azul sobre el que se deposita una capa de fósforo

El uso de LED RGB, que incluyen tres chips de diferentes colores (Rojo, Verde y Azul), y mediante adición de los tres colores puede conseguirse luz blanca, no son de interés para el presente trabajo.

1.4 El LED en automoción: usos y drivers

La aparición de los LED como fuentes luminosas en la automoción supuso una auténtica revolución por su relativa alta eficiencia, lo que permitía obtener los mismos valores fotométricos con menor potencia, así como su reducido tamaño lo que permitía añadir muchas posibilidades de diseño al producto final. El menor consumo contribuye también a menores temperaturas de operación, utilización de otros tipos de materiales, y mayores autonomías en el caso de los vehículos eléctricos.

Como se ha visto con anterioridad, podrían clasificarse los LED tanto por su color, como por su potencia de cara a la aplicación en la que van a ser utilizados

Iluminación : LED blancos fundamentalmente, con corrientes de polarización sobre 1000 mA.

Señalización : LED blancos, amarillos y rojos, con corrientes de polarización entre 10 mA y 1000 mA

1.4.1 Drivers para LED

Los LED, se controlan por corriente, para asegurar una estabilidad de flujo y de la potencia aplicada y no por tensión, como se explicará en la sección 1.6.1; a diferencia las lámparas incandescentes que sí están diseñadas para controlarse por tensión; esto implica que haya que convertir la tensión generada por la red eléctrica del vehículo en corrientes estables que polaricen a los LED de forma adecuada.

Drivers resistivos

Los primeros circuitos, más básicos y con los que se introdujeron los primeros sistemas de señalización / iluminación con LED fueron redes resistivas, calculando los valores de las resistencias en condiciones nominales, como puede verse en la Figura 1.10. Debido a la pequeña variación de tensión en directa que puede haber entre LED adyacentes, es necesario añadir una resistencia en serie con cada LED para minimizar la posible diferencia de flujo entre LED, cuando estos se conectan en paralelo.

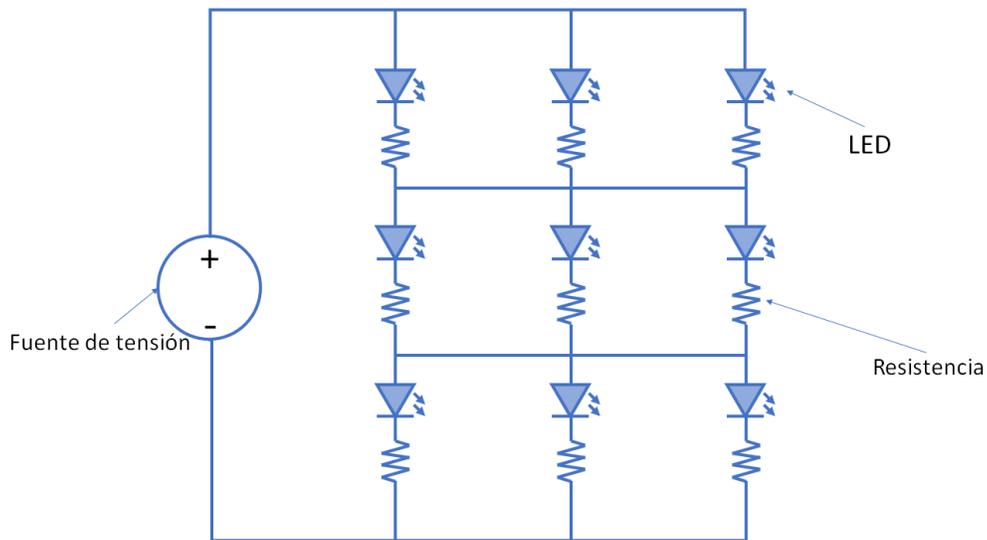


Figura 1.10: Circuito resistivo

Fuentes de corriente discretas

Una siguiente topología de circuitos son la de fuentes de corrientes constantes (lineales), partiendo de circuitos conocidos sencillos como los espejos de corriente, estos circuitos permiten fijar una corriente constante a través de la carga; siempre y cuando la tensión de la carga sea inferior a la de alimentación del circuito.

Numerosos proveedores han sido capaces de integrar estos circuitos en un único chip, donde a través de componentes externos se pueden fijar la corriente a través de la carga así como asegurar la reacción ante el caso de un fallo, como puede verse en la Figura 1.11

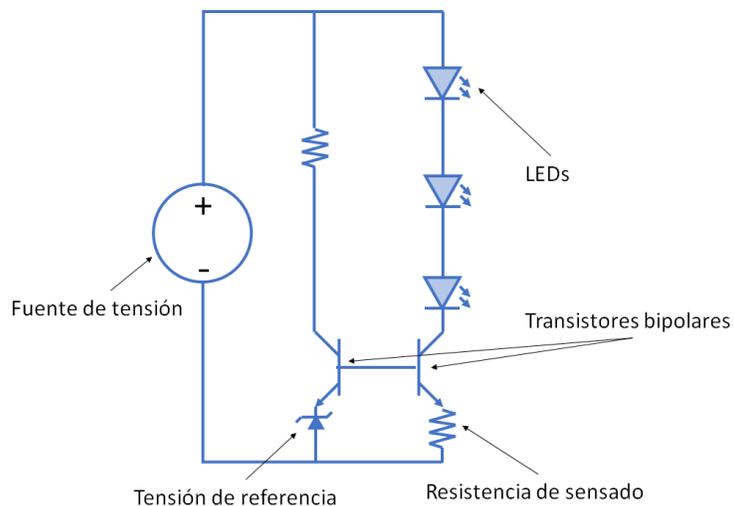


Figura 1.11: Espejo de corriente

Fuentes de corriente integradas

Estas soluciones también se pueden encontrar en componentes comerciales, en integrados que ya incorporan toda la electrónica y permiten el ajuste de la corriente de salida mediante componentes periféricos (Resistencias), como puede verse en la Figura 1.12 o escritura de registros internos al chip.

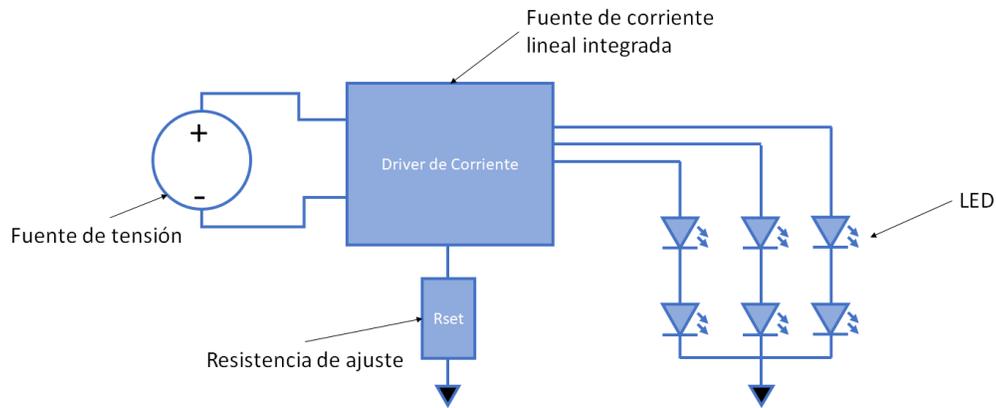


Figura 1.12: Driver de corriente lineal integrado

DC/DC de corriente

En estos circuitos listados hasta ahora, los componentes auxiliares responsables de la polarización de los LED disipan la energía no consumida por los LED (Considerando la diferencia de tensión entre la necesaria por los LED y la tensión de alimentación) en forma de calor; un circuito que permite reducir la pérdida de calor, pero también aumenta su complejidad es la utilización de convertidores DC/DC de corriente, que permite generar el voltaje necesario a la salida que polarice la carga, con una alta eficiencia. (Figura 1.13).

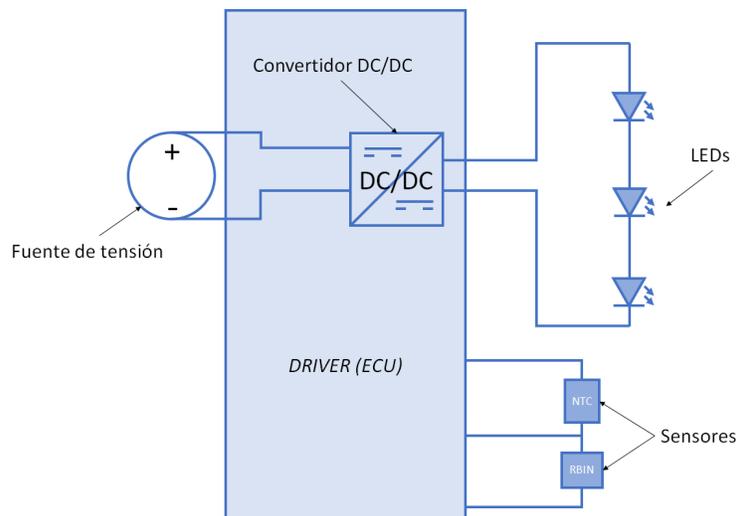


Figura 1.13: Convertidor DC/DC

Los convertidores DC/DC, podrán adaptar la tensión de entrada (típicamente 12, 24 y hasta 48 V) al voltaje necesario para polarizar los LED a la corriente deseada; limitando típicamente la tensión de salida por debajo de los 60 V [17].

O bien con la inclusión de una resistencia externa o bien programando un software se puede adaptar la corriente de salida para los diferentes bins de flujo (Ver sección 1.8) que puede entregar el proveedor de LED; y de la misma forma, con la inclusión de un sensor térmico (típicamente una NTC o una PTC [18]), puede disminuirse la corriente aplicada a los LED para protegerlos en entornos de alta temperatura; [19], [20] y [21].

Aquí la fórmula que podrá aplicarse para conocer el balance de potencia será:

$$P_i = \alpha \cdot P_o \quad (1.1)$$

$$V_i \cdot I_i = \alpha \cdot V_o \cdot I_o \quad (1.2)$$

Donde: P_i es la potencia de entrada, P_o : es la potencia de salida (entregada a la carga), α es el factor de eficiencia del convertidor, V_i es la tensión de entrada, V_o es la tensión de salida, I_i : es la corriente de entrada y I_o es la corriente de salida a la carga.

Estos sistemas tendrán que adaptarse a posibles variaciones tanto de la tensión de entrada (producida por el sistema de alimentación del coche) como de la tensión de salida: posibles cambios en la carga (por ejemplo cambio en la tensión de los LED debido a condiciones ambientales, como se verá en la Sección 1.6.1).

Convertidores DC/DC + Drivers de corriente

También puede existir sistemas híbridos, como por ejemplo combinar drivers conmutados de tensión con drivers integrados lineales de corriente, como puede verse en la Figura 1.14

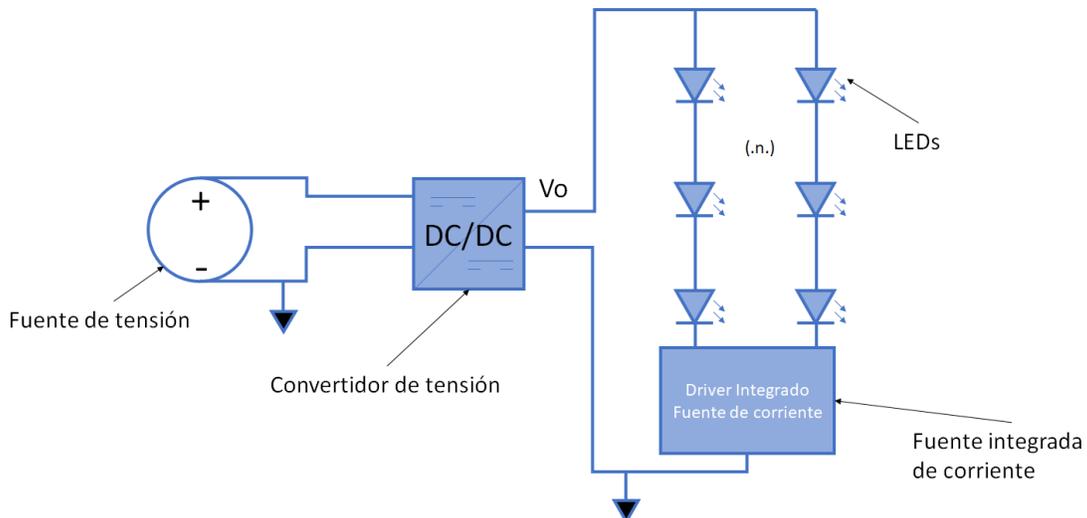


Figura 1.14: Convertidor DC/DC y drivers de corriente

La topología exacta: Número de ramas de LED; número de LED por ramas, topología del convertidor (elevador, reductor, etc.) dependerá en gran medida del sistema a diseñar; aunque a grandes rasgos serán topologías para ser utilizadas en sistemas con muchos LED de baja potencia.

1.4.2 Electrónica de automoción

La electrónica utilizada en la industria de la automoción tiene varias particularidades lo que la hace incluir una serie de restricciones a la hora de su diseño:

Volúmenes de producción : Los volúmenes típicos de producción en automoción están en el rango de decenas a cientos de miles de unidades, lo que hace que el estudio de tolerancias, y peores casos muy importante.

Rangos de temperatura : Los vehículos que montarán los componentes electrónicos pueden ser vendidos potencialmente en cualquier mercado mundial, lo cual hace necesario que puedan funcionar a temperaturas extremas, desde $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuando se incluye el calentamiento del compartimento motor.

Rangos de tensión de alimentación : Debido a la interacción con otros elementos no puede considerarse la tensión de alimentación constante. Si se piensa en sistemas de alimentación de 12 V., en coches de combustión, la tensión puede variar en función del estado de la carga de la batería, estado del alternador, o mayor demanda de otros sistemas eléctricos (por ejemplo del motor de arranque). Componentes críticos del automóvil, como pueden ser los sistemas de iluminación, no pueden permitirse sin causa justificada.

Interacción con otros elementos : Las unidades electrónicas que montarán el vehículo deben interconectarse con otras unidades, centralitas, sistemas de alimentación, generación de alimentación; y no siempre las señales de alimentación o buses de comunicación serán estables; además la compatibilidad electromagnética y la estabilidad de los circuitos estudiados es muy importante de cara al correcto funcionamiento de los sistemas complejos que monta un automóvil.

Regulación : Los proyectores y los pilotos son componentes que se venden en el mercado y como tal tienen que cumplir la legislación de los países en los que se vendan los dispositivos, como ha podido verse en la sección anterior 1.1

1.5 Empaquetado y fiabilidad

El uso industrial de los LED viene finalmente condicionado por su empaquetado y su conexión con el mundo exterior que permite unirlos al resto de componentes electrónicos responsables de generar las señales eléctricas correspondientes para su operación.

Una gran diferencia (y limitación) del empaquetado de los LED es que tiene que ser parcialmente transparente y optimizado para la optimización de flujo luminoso; adicionalmente para componentes de cierta potencia (por ejemplo superior a 1 W) debe tener también una alta eficiencia térmica para poder disipar el calor generado por la operación del LED.

Como puede verse en [22], los chips pueden tener diferentes tipos de conexión al empaquetado (Figura 1.15)

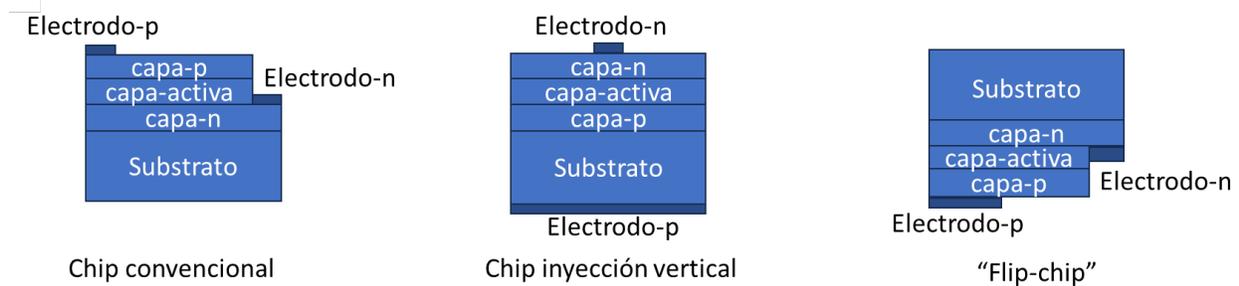


Figura 1.15: Diferentes tipos de chips por su interconexión

- Chip convencional, usando la tecnología de “wire bonding” a los electrodos metálicos.
- Inyección vertical, donde el electrodo p se pega (o se suelda) directamente sobre el “lead frame” del LED, y el electrodo n se conecta mediante “wire bonding”.
- “Flip chip”, donde ambos electrodos están directamente pegados (o soldados) al “lead frame” del empaquetado.

De cara a la protección del chip y su interconexión se suele usar una capa de silicona transparente que opcionalmente puede llevar también una lente óptica de cara a modificar el patrón de radiación emitido por el LED [23], ayudando de esta forma a la extracción de la luz. De la misma forma, el lead-frame (que puede ser metálico o cerámico), permitirá la disipación térmica del calor generado por el LED, tal y como puede verse en la Figura 1.16.

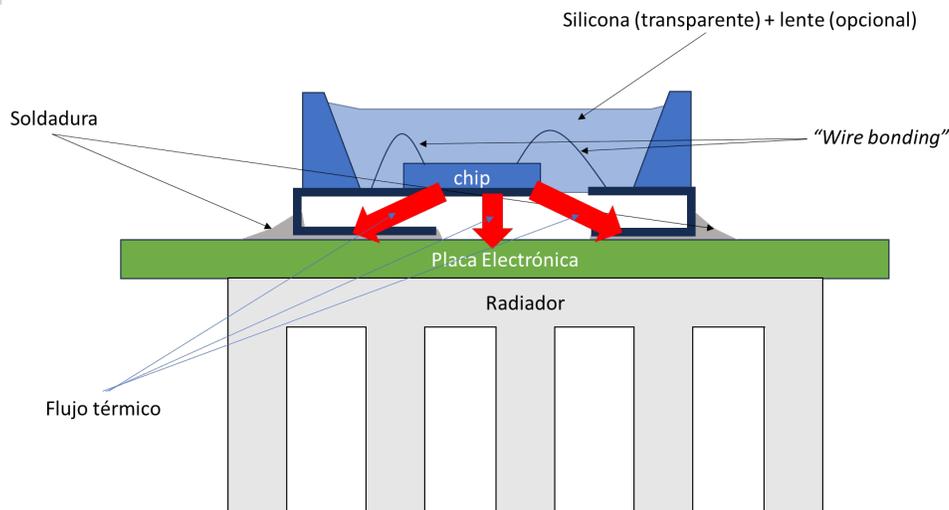


Figura 1.16: Construcción de un sistema LED

1.5.1 Fiabilidad

El uso de los LED en entornos de automoción, someten a un estrés adicional a dichos componentes: temperaturas extremas, humedades extremas, radiación solar, utilización de los componentes cerca de los límites definidos por el fabricante, harán que en algunos casos los LED puedan degradarse o incluso llegar a tener un fallo catastrófico.

Según [24], [25] y [26], los principales fallos podrían clasificarse de la siguiente manera; a los que podrían añadirse algunos fallos específicos de la automoción:

Semiconductor : Defecto / deslocalización generación y movimiento, debido a la operación de los LED a altas temperaturas o rápidos cambios de temperatura, rotura de los chips, difusión de los dopantes, electromigración o ESD.

Interconexión (Rotura del wire bonding o tecnología similar) : Fractura de la soldadura del hilo de conexión, fatiga de la soldadura del hilo de conexión, interdifusión del contacto intermetálico o ESD.

Empaquetado : Carbonización del encapsulado, delaminación, amarillamiento del encapsulante, rotura del encapsulante, rotura de la lente, fatiga de la soldadura o degradación del fósforo por operación a altas temperaturas.

Es por ello importante utilizar en automoción LED diseñados y validados específicamente para dichos entornos, que cumplan al menos la normativa AEC-Q101 ([27]), y que tengan un parámetro de L90B70 (El número de horas para el cual el 70 % de la población mantiene el 90 % del flujo lumínico inicial) de varias miles de horas para asegurar que la vida de utilización de los LED es al menos igual que la del vehículo si no superior.

1.5.2 Envejecimiento

La electrónica de automoción tiene como propósito durante la fase de concepción y su validación acompañar al vehículo durante toda su vida; que se estima en, al menos, varios miles de horas, en un entorno de duras condiciones mecánicas (vibraciones, choques, etc.) y térmicas (choques térmicos, cambios constantes de temperatura, etc.).

Esto hará que las características eléctricas y ópticas de los LED puedan cambiar (degradarse) con el tiempo.

Envejecimiento óptico

Ensayos de larga duración, hacen especial hincapié en comprobar el mantenimiento del flujo lumínico extraído a los LED, así como su colorimetría. Diferentes ensayos estandarizados como el LM80 ([28]) o el LXXBYY (Número de horas estimadas a las que el YY % de la población de LED mantiene el XX % del flujo inicial en ciertas condiciones de temperatura y corriente). (Los valores para el test LXXBYY pueden parametrizarse típicamente como L70B50 ó L90B10).

Como puede comprobarse en [29], altas corrientes y/o altas temperaturas aceleran el envejecimiento de los LED y reducen el número de horas a las que los LED pueden mantener su rendimiento esperado. Es por ello de especial importancia manejar los LED siempre dentro de los parámetros definidos

por los fabricantes en sus hojas de características para asegurar la duración de los componentes, al menos por encima de la vida del propio vehículo.

En la Tabla 1.2 pueden verse datos experimentales para ensayos de larga duración del proveedor Nichia [30]. Como puede verse a mayores condiciones de estrés: temperatura o corriente, la vida del LED (considerando la vida del LED como la capacidad de mantener el flujo lumínico inicial) decrece.

Tabla 1.2: Resumen de ensayos de larga duración y mantenimiento de flujo lumínico para LED de Nichia NFSL757G

Test	Temperatura empaquetado	Temperatura ambiente	Corriente	Mantenimiento lumínico a 10000 horas	Desplazamiento de color $\Delta u v$	TM-21 Projection L70(10K)	TM-21 Projection L80(10K)	TM-21 Projection L90(10K)
1	55 ° C	>50 ° C	65 mA	97.9 %	0.0009	>60000 hours	>60000 hours	55400 hours
2	55 ° C	>50 ° C	150 mA	97.7 %	0.0013	>60000 hours	>60000 hours	41800 hours
3	55 ° C	>50 ° C	180 mA	97.5 %	0.0015	>60000 hours	>60000 hours	38600 hours
4	85 ° C	>80 ° C	65 mA	97.5 %	0.0008	>60000 hours	>60000 hours	43900 hours
5	85 ° C	>80 ° C	150 mA	96.5 %	0.0017	>60000 hours	>60000 hours	31300 hours
6	85 ° C	>80 ° C	180 mA	96 %	0.0018	>60000 hours	56100 hours	26600 hours
7	105 ° C	>100 ° C	65 mA	94.9 %	0.0016	>60000 hours	40600 hours	19700 hours
8	105 ° C	>100 ° C	150 mA	91.9 %	0.0029	39500 hours	25000 hours	12200 hours
9	105 ° C	>100 ° C	180 mA	91.4 %	0.0030	36400 hours	23200 hours	11600 hours

Envejecimiento eléctrico

De forma similar a la degradación del flujo lumínico con el envejecimiento de los LED, las características eléctricas de los LED también pueden evolucionar negativamente con el envejecimiento de los LED, acelerando el proceso altas corrientes y/o temperaturas; producido fundamentalmente por la degradación del propio semiconductor (y los dopantes), los contactos metálicos, etc.; afectando también a la resistencia térmica del propio LED. ([31], [32] y [33]); produciendo paulativamente un incremento de la tensión en directo del LED para una corriente de polarización dada.

1.6 Dependencia térmica

Como el resto de semiconductores, los parámetros fundamentales de los LED tienen una fuerte dependencia con la temperatura de operación, en especial para la tensión que presentan cuando pilotan corriente en directo; adicionalmente para los LED se verá que el flujo lumínico de salida del componente dependerá de la temperatura del chip.

Tal y como se ha visto con anterioridad, el rango de operación de temperatura de la electrónica de automoción es mucho más amplio que en otras aplicaciones, lo cual llevará a estudiar en detalle la dependencia de la temperatura, tanto de la tensión en directo como del flujo lumínico.

1.6.1 Dependencia de la tensión en directo con la temperatura

De [15], puede verse que la característica I-V de una unión p-n ideal viene dada por la ecuación de Shockley:

$$I = I_s \left(e^{eV/kT} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Para semiconductores no degradados, y polarizados en directo, a una corriente constante, la tensión en directo vendrá dado por:

$$V(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{I}{I_s^*} + \frac{E_g(T)}{e} \quad (1.4)$$

$$I_s^* = eA \left(\frac{D_p N_c N_v}{L_p N_D} + \frac{D_n N_c N_V}{L_n N_A} \right) \quad (1.5)$$

De tal forma que con el aumento de la temperatura de operación del LED, los niveles de Fermi se moverán hacia el centro de la banda prohibida, por lo que la distancia entre los niveles de los lados p- y n- serán menores.

De la misma forma, el segundo término indica que la banda prohibida del semiconductor decrecerá con el aumento de la temperatura.

Un ejemplo tomado de componentes comerciales, de un led rojo, con un chip de AlInGaP, así como de un LED blanco (chip azul más conversión por fósforo), InGaN puede verse en la Figura 1.17 proveniente del [34] y [35] (Puede comprobarse como el comportamiento eléctrico es similar entre diferentes fabricantes) y de [36].

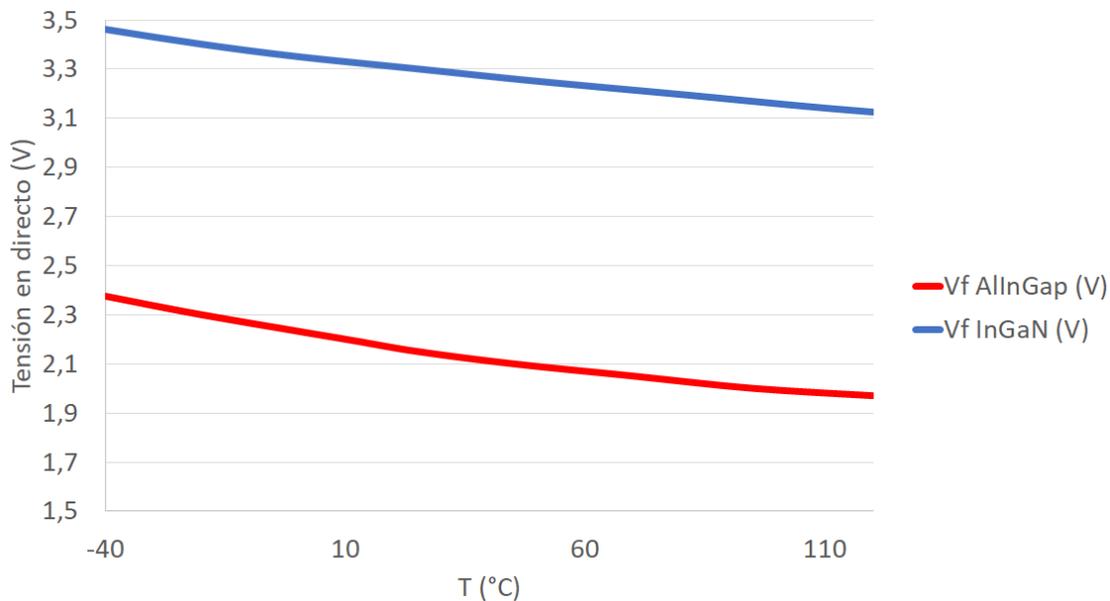


Figura 1.17: Tensión en directo de un LED rojo AlInGaP (en rojo) y de un LED blanco InGaN (en azul) a corriente constante

Como puede verse para un LED típico de AlInGaP (Rojo), el desplazamiento de la tensión en directo por la temperatura; entre -40 y 120 °C es de unos 400 mV, y para un led de InGaN de unos 325 mV, siempre considerando corriente nominal; puede comprobarse en la Figura 1.18 como a partir de datos provenientes de los fabricantes de LED, la variación de la tensión es menor para los LED de InGaN frente a los AlInGaP

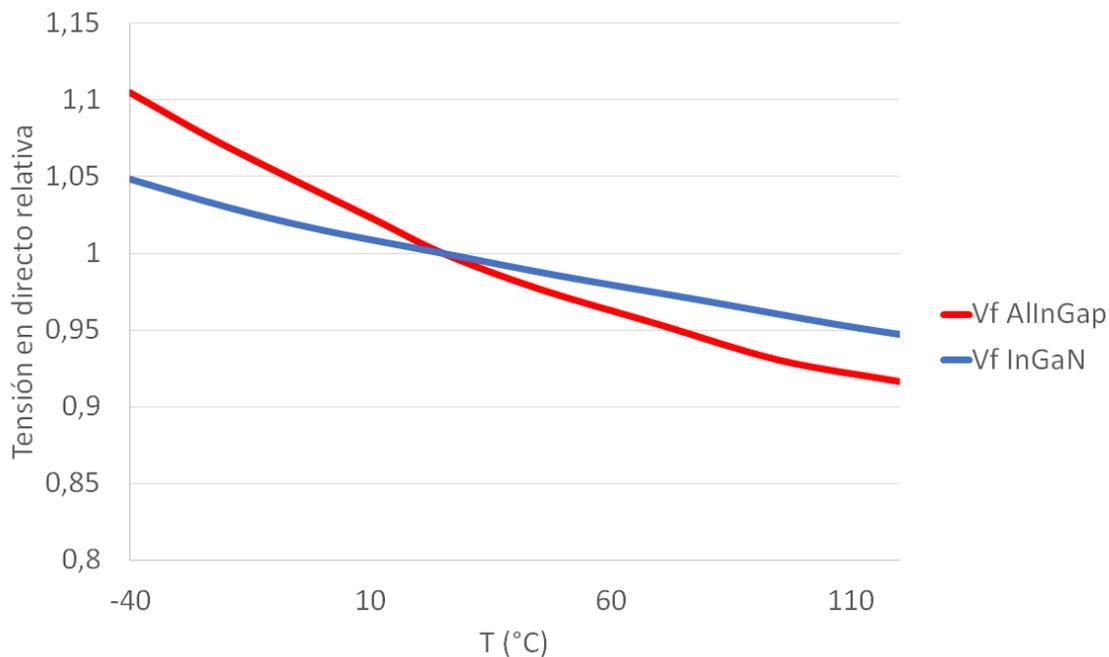


Figura 1.18: Tensión relativa en directo de un LED rojo AlInGaP (en rojo) y de un LED blanco InGaN (en azul) a corriente constante

1.6.2 Dependencia lumínica con la temperatura

Similar a como se ha visto, la dependencia de la tensión en directa de los LED, el flujo lumínico emitido por los LED también tiene una dependencia negativa frente a la temperatura de operación; para ello hay que entender previamente que habrá dos mecanismos de recombinación de los pares electrón-hueco:

- Radiación radiativas: En la radiación radiativa, cuando se produce la recombinación, se emite un fotón de la misma energía a la de la banda prohibida del semiconductor.
- Radiación no radiativa: En la recombinación del par electrón-hueco se convierte en energía de vibración en los átomos de la estructura del semiconductores (*fonones*), y por lo tanto en calor; y es un fenómeno indeseable y a minimizar. Fundamentalmente se debe a tres tipos:
 - Recombinación en niveles profundos causados por defectos puntuales, impurezas indeseadas, dislocaciones y otros defectos.
 - Recombinación superficial; es importante que la zona activa de recombinación debe estar “lejos” (varias longitudes de difusión) de la superficie del LED.
 - Pérdida de portadores a través de barreras de las heteroestructuras. Muchos LED se construye la capa activa sobre sustratos de otros semiconductores más fáciles / baratos de manejar. A veces la constante de red no es la misma, lo cual puede llevar a producir a discontinuidades en la red cristalina del semiconductor.

Las corrientes de fugas se incrementan exponencialmente con la temperatura; así pues se apreciará un decrecimiento de la eficiencia lumínica de los LED a mayores temperaturas. Para compensar este mecanismo es implementar importantes barreras. Adicionalmente, la recombinación de Shockley-Read contribuye a aumentar la radiación no radiativa a altas temperaturas. Conforme aumenta la temperatura, según la ecuación 1.6, el tiempo de vida de la recombinación no radiativa decrementa. Como resultado, la eficiencia de la recombinación radiativa entre bandas se decrementa a mayores temperaturas. La mayor eficiencia radiativa entre bandas para semiconductores directos se obtiene a temperaturas criogénicas. Para más detalles, consultar [15].

$$\tau_i = \tau_{n0} \left(1 + \frac{p_1 + n_1}{2n_i} \right) = \tau_{n0} \left[1 + \cosh \left(\frac{E_T - E_{Fi}}{kT} \right) \right] \quad (1.6)$$

También es importante destacar que para el caso de los LED blancos, la eficiencia de conversión del fósforo dopado puede añadir otro factor a la dependencia de la eficiencia lumínica frente a la temperatura, tal y como puede comprobarse en [37] y [38]

Experimentalmente, en la Figura 1.19 puede comprobarse la dependencia para diferentes tipos de LED, tanto de colores amarillos / rojos, con semiconductores de tipo AlInGaP como blancos, con chips azules de InGaN y conversión por fósforo [35] y [39].

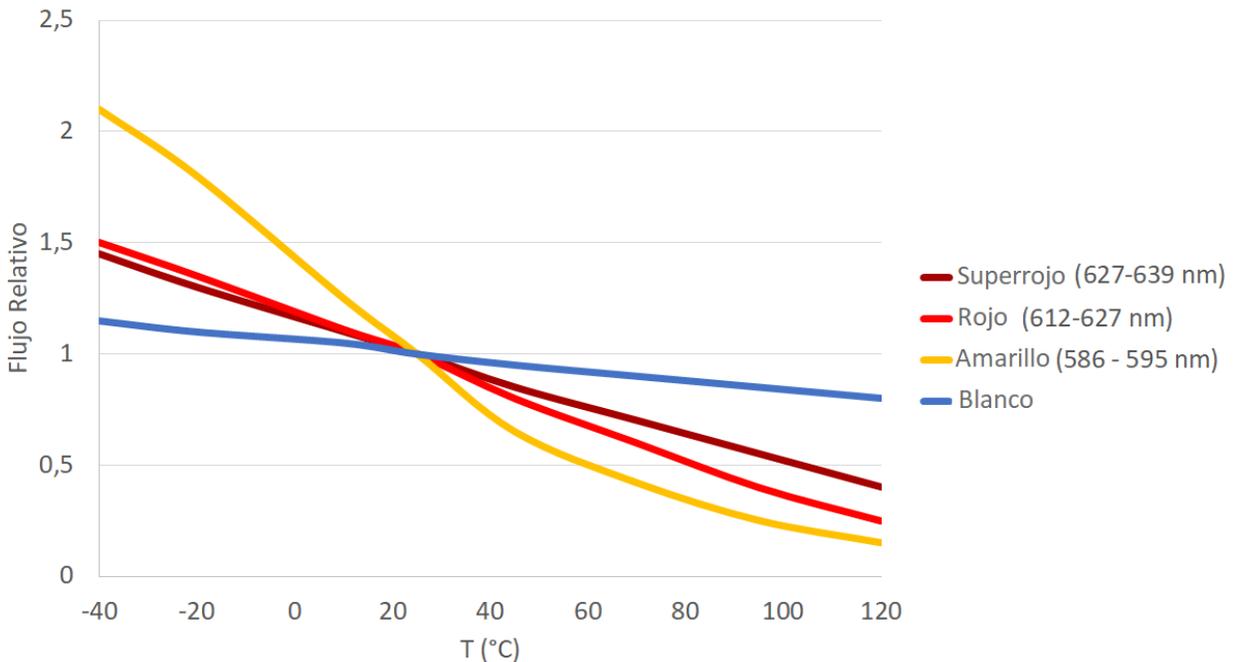


Figura 1.19: Flujo relativo vs. temperatura para diferentes tipos de LED

1.6.3 Dependencia colorimétrica con la temperatura

Como se ha explicado en la sección anterior, 1.6.1, la tensión en directa de los LED dependerá de la temperatura ambiente; por tanto la energía de los fotones emitidos durante la recombinación de los

pares electrones-huecos, también dependerá de la temperatura a la que se produzca; teniendo como resultado que el color de los LED no será constante en todo el rango de temperatura.

Recolectando datos de diferentes hojas de características de los fabricantes, para el caso concreto de los chips basados en AlInGaP, el desplazamiento de color será similar al visto en la Figura 1.20, a partir de las hojas de características de Osram Optosemiconductors GmbH [34], [40] y [41].

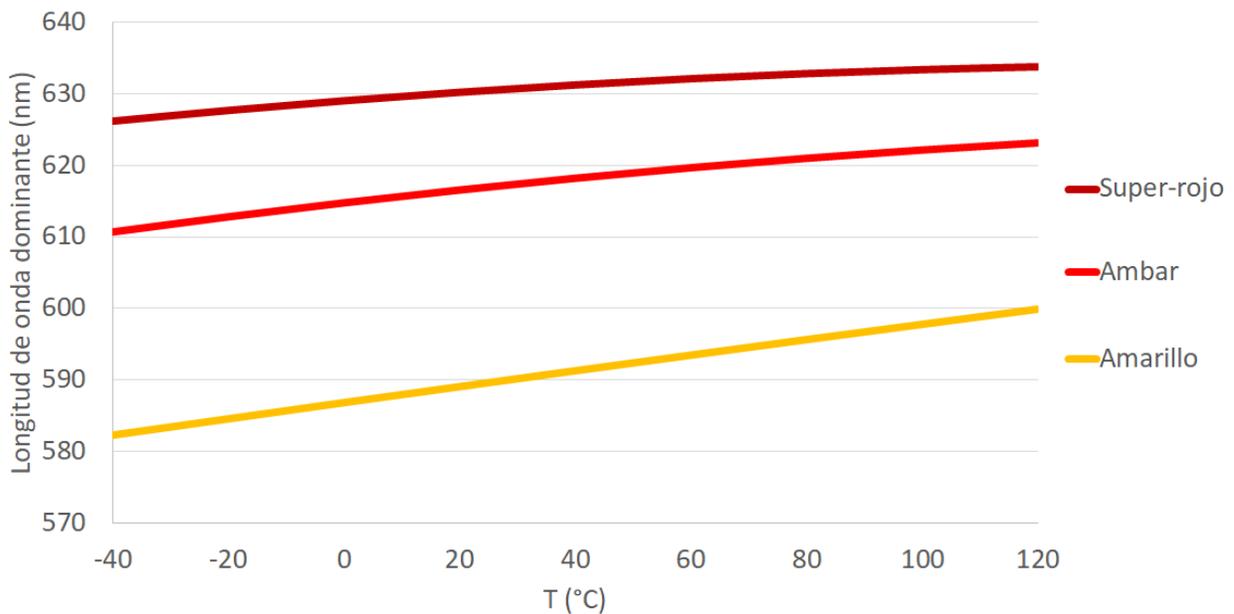


Figura 1.20: Longitud de onda dominante para LED AlInGaP vs. temperatura de unión

El mismo efecto se producirá en los LED blancos por conversión con fósforo ([42]); pero al desplazamiento en color del chip de AlGaIn, se añadirá el posible desplazamiento de color al que se vea afectado el fósforo. Tomando datos de las hojas de características de Osram [43] y Nichia [44] puede verse el cambio de color conforme cambie la temperatura en la Figura 1.21.

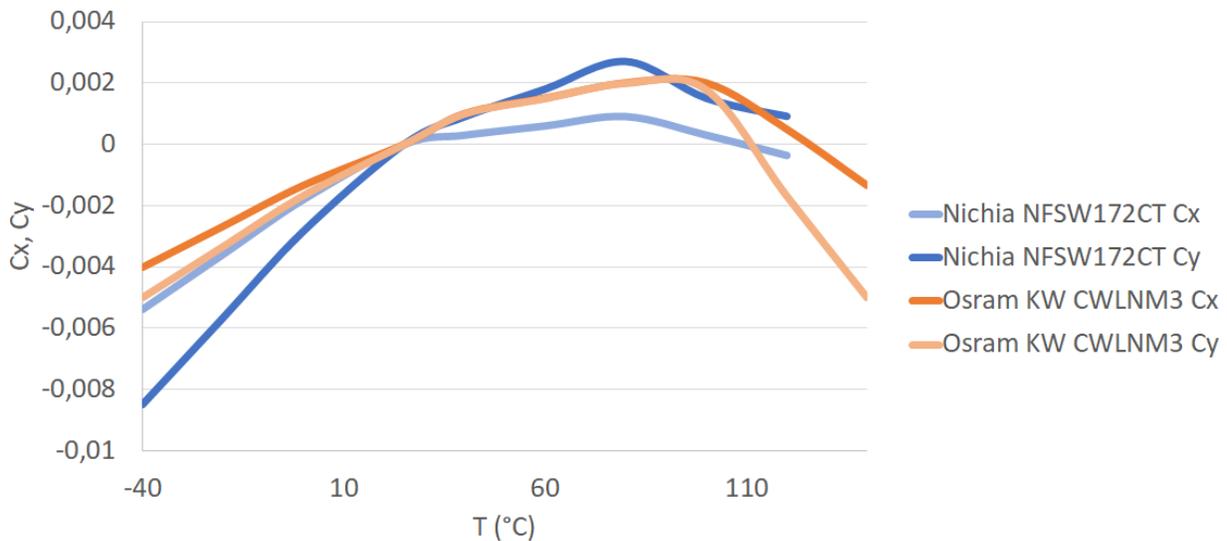


Figura 1.21: Dependencia del color para LED blancos InGaN por conversión de fósforo vs. temperatura, medido según coordenadas del diagrama CIE 1931 en Cx y Cy

1.7 Fallos y diagnóstico

Como se ha ido viendo las funciones de iluminación y señalización están sujetas a homologación, y a la vez, como todos los objetos sometidos a un uso son susceptibles de fallos.

Es por ello obligatorio que en caso de producirse un fallo el dispositivo pueda diagnosticarse, para reportar el fallo a la centralita correspondiente en el vehículo para que se proceda informar al conductor, si procede. Adicionalmente, funciones como el Indicador de Dirección exigen, que por ley, su fallo se notifique al conductor [6].

La ISO 26262 ([45]), es una norma que se encarga de la seguridad funcional, haciendo hincapié en la robustez frente a fallos y eventos indeseados de las funciones de los vehículos; implementando funciones redundantes dependiendo de la criticidad de los potenciales fallos.

Es por ello; y tanto la reglamentación (Ver Capítulo 1.1) como las normas internacionales de seguridad hacen hincapié en el correcto diagnóstico de los hipotéticos fallos (Ver Capítulo 1.5.1) de las fuentes de luz (LED) para que el sistema vehículo / conductor puedan reaccionar de la forma apropiada.

Hay sistemas de detección de errores, tanto basados en Hardware como basados en Software; siendo la estrategia de detección de fallo diferente para cada topología de los sistemas de iluminación. En este trabajo se estudiará y se propondrá una mejora de los sistemas actuales aplicados a los convertidores DC/DC con ramas de LED en serie, donde se mejorará el sistema actual basado en umbrales, proporcionando herramientas adicionales, basados en modelos matemáticos o en redes neuronales para la detección y notificación de fallos, que pueden mejorar fallos concretos en algunas topologías, de cara a mejorar la seguridad y la información disponible para el conductor final [46], [47].

1.8 Gestión de “*bines*”

La palabra inglesa “*bin*” podría traducirse al español como “cubo” o “papelera”; indica la forma en como clasificar a los LED por características comunes.

Debido a la variabilidad durante la producción de los LED, (tamaño de las obleas, concentración de los dopantes, etc.), no todos los LED mostrarán las mismas características eléctricas / ópticas; para ello los fabricantes agruparán diferentes LED por similitud de sus características comunes, siendo de especial interés: voltaje, color y flujo lumínico [48] y [49].

Es por ello importante considerar en el diseño de los circuitos eléctricos todos los *bines* que los fabricantes proporcionarán para una determinada referencia, de cara a que debido a la restricciones de la fabricación en masa de las placas electrónicas; y las restricciones impuestas por los diseños electrónicos, el producto final presenta homogeneidad en cuanto a flujo lumínico y color; y cuando es necesario por las posibles restricciones eléctricas que imponga el diseño, la dispersión de la tensión en directa de los LED esté debidamente controlada. [50] y [51].

A continuación se muestran ejemplos para un LED comercial blanco (Osram KW CELNM1.TG, [52]) diferentes combinaciones de “*bines*” de flujo en la Tabla 1.3, “*bines*” de tensión en la Tabla 1.4 y de color en la Imagen 1.22 [52]:

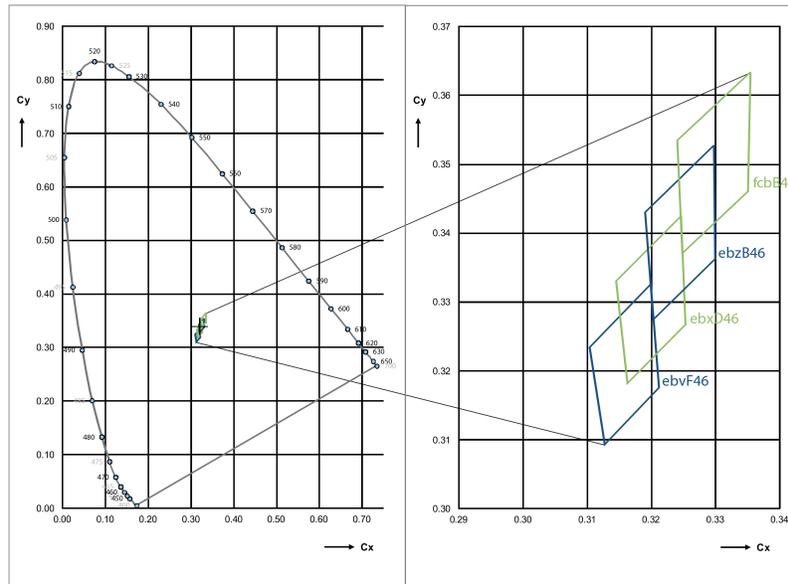
Tabla 1.3: Clasificación de flujo lumínico para el LED Osram KW CELNM1.TG

Grupo	Flujo luminoso $I_F=1000$ mA min. ϕ_v (lm)	Flujo luminoso $I_F=1000$ mA max. ϕ_v (lm)
6N	315	355
6NF	334	377
7N	355	400
7NF	377	424
8N	400	450
8NF	424	474

Tabla 1.4: Clasificación de voltajes para el LED Osram KW CELNM1.TG

Grupo	Voltaje en directo $I_F=1000$ mA min. V_F (V)	Voltaje en directo $I_F=1000$ mA max. V_F (V)
15	2.75	3.00
65	3.00	3.25
B3	3.25	3.40

Chromaticity Coordinate Groups ³⁾



Chromaticity Coordinate Groups ³⁾

Group	Cx	Cy	Group	Cx	Cy
ebvF46	0.3127	0.3093	ebzB46	0.3203	0.3274
	0.3212	0.3175		0.3299	0.3361
	0.3199	0.3325		0.3298	0.3526
	0.3104	0.3234		0.3190	0.3430
ebxD46	0.3163	0.3181	fcbB46	0.3248	0.3370
	0.3253	0.3266		0.3350	0.3460
	0.3246	0.3424		0.3355	0.3633

Figura 1.22: Clasificación de colores para el LED Osram KW CELNM1.TG según diagrama CIE1931

1.9 Gestión térmica de sistemas electrónicos

Durante el funcionamiento de todos los sistemas electrónicos, se generará calor, que en la mayor parte de las veces es un efecto indeseado; puesto que el objetivo de los sistemas de iluminación es emitir luz en el espectro visible.

Dependiendo de la potencia generada en el sistema, tendrá que ser disipada en el entorno. Los mecanismos fundamentales de disipación de la energía son tres, como puede verse en [53]:

Convección : Donde el intercambio del calor con el fluido en el que se encuentre sumergido el dispositivo (en nuestro caso típicamente aire), hará que el fluido se caliente, desplazándose y ocupando fluido frío el volumen desalojado.

Conducción : Dentro de un cuerpo, el calor es transferido internamente, por la capacidad que tenga el material de conducir el calor; que se denota a través de un parámetro llamado “conductividad

térmica”. De esta forma existen buenos conductores térmicos como la plata o el oro, y malos conductores térmicos como los plásticos.

Radiación : El calor generará radiación electromagnética que se emite al entorno. Por las temperaturas típicas que se manejan en la electrónica (Siempre inferior a 200 °C, será emisión en el Infrarrojo).

El parámetro más sencillo para modelar los sistemas térmicos es el concepto de “*resistencia térmica*”, cuyas unidades son K/W ó $^{\circ}C/W$, y significa la temperatura que aumentará el dispositivo por cada Watio de potencia disipado. Cuanto menor será el valor, menos se calentará el dispositivo cuando opere.

En el caso de conocer la temperatura externa de un dispositivo; temperatura del substrato, podrá calcularse la temperatura del semiconductor conociendo su resistencia térmica, típicamente dada por el fabricante.

$$T_j = R_{th} \cdot P \quad (1.7)$$

Esta ecuación 1.7 puede generalizarse a partir de medidas para calcular la resistencia térmica de un sistema completo, desde el ambiente exterior, hasta los componentes electrónicos teniendo en medio el resto de componentes de un proyector o un piloto (carcasa plástica, soporte físico de la electrónica, etc.), obteniendo una resistencia térmica total con la que poder modelar el comportamiento térmico de los componentes electrónicos; que puede verse gráficamente en la Figura 1.23.

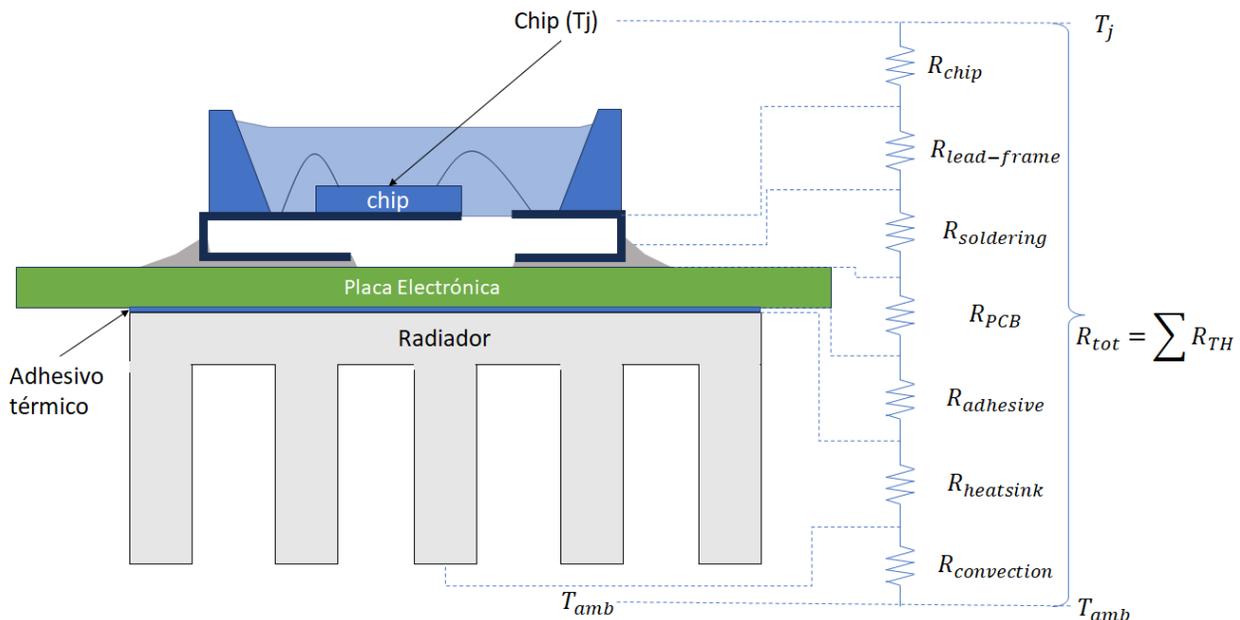


Figura 1.23: Modelización térmica de un sistema electrónico

Es importante hacer un correcto dimensionamiento de todos los sistemas térmicos necesarios para:

- Disipar toda la energía térmica innecesaria, manteniendo siempre la temperatura dentro de los límites definidos en la hoja de características por el fabricante.
- No realizar tareas de sobre ingeniería que puedan incurrir en costes no competitivos para los sistemas.

Para aquellos sistemas en los que la ventilación pasiva no es suficiente; puede recurrirse al diseño de sistemas con ventilación activa o forzada [54]; en los que añadiendo algún elemento externo (típicamente un ventilador), puede forzarse la circulación de aire a mayor velocidad; permitiendo quitar energía térmica del sistema a mayor velocidad.

1.9.1 Materiales

Dependiendo de la potencia total a disipar, de menor potencia a mayor, los materiales principales usados pueden ser:

FR4 : es un material laminado de epoxy reforzado con fibra de vidrio usado como sustrato físico sobre el que se lamina una (o varias) capas de cobre donde estarán las pistas electrónicas y también conducirán el calor para disiparlo.

IMS / MCPCB : Son PCBs cuyo sustrato es núcleo es metálico (Aluminio, cobre, etc.) o incluso cerámico sobre el que se posita una capa de aislante eléctrico, y sobre este aislante una capa de cobre con las pistas eléctricas. El calor será disipado tanto por las pistas de cobre como, una vez atravesase la fina capa de aislante eléctrico por el sustrato.

Radiador Cuando una PCB no sea capaz de disipar el calor necesario, puede añadirse un radiador que aumente la superficie de intercambio de calor con el ambiente. La interfaz entre el radiador y la PCB tiene que incluir algún tipo de substancia que elimine el aire para complementar posibles imperfecciones de los acabados superficiales.

Ventilador : En caso de que la refrigeración pasiva de los sistemas electrónicos no sea suficiente, añadir un ventilador puede forzar la ventilación (convección) del sistema, para intercambiar calor con el ambiente aún a mayor velocidad.

1.9.2 Transferencia térmica

Los principios de transferencia térmica [55] son tres:

Convección : la convección es el fenómeno que se produce dentro de un fluido y el propio movimiento de éste entre zonas a diferentes temperaturas transfiriendo la energía térmica de zonas calientes a zonas frías, como puede verse en la Figura 1.24

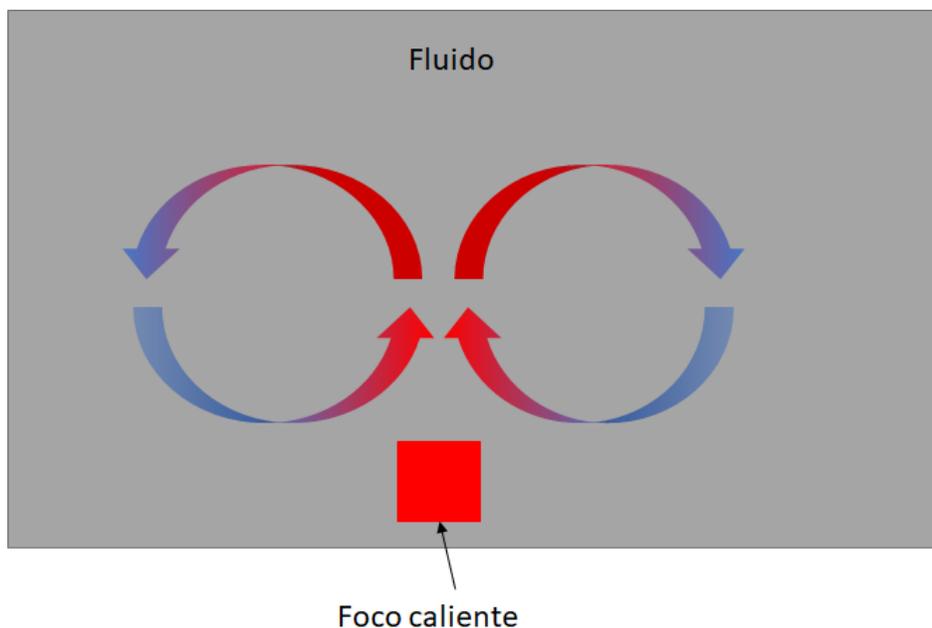


Figura 1.24: Principio de convección de un foco caliente en un fluido confinado

Conducción : es la transmisión del calor entre dos cuerpos que estén en contacto o entre diferente parte de un cuerpo, y dependerá de su resistividad térmica. Figura 1.25

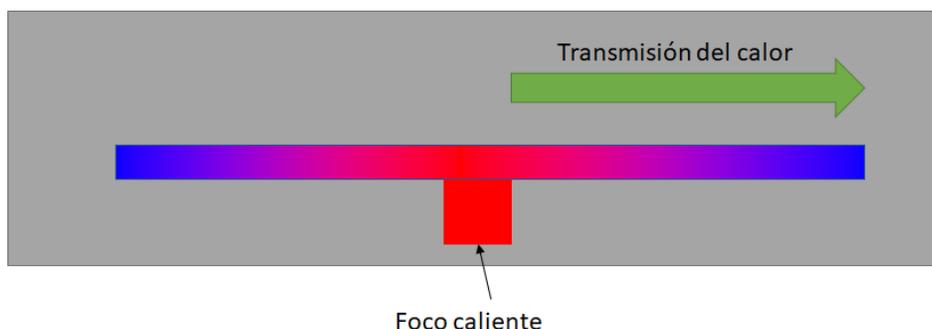


Figura 1.25: Principio de conducción de calor, desde un foco caliente hasta un objeto en contacto con él

Radiación : Es la radiación electromagnética que emite cualquier cuerpo que esté a una temperatura diferente de 0 K. La intensidad y longitud de onda emitida dependerá de la temperatura. Es por ejemplo la responsable de la emisión de luz de las lámparas halógenas, cuyo filamento puede alcanzar temperaturas en torno a 2500 - 3500 °C [56].

Típicamente una mezcla de los tres principios de transferencia térmica hará que los sistemas electrónicos de iluminación alcancen su equilibrio termodinámico cuando se encuentren trabajando en determinadas condiciones. Una apropiada selección de materiales en función de la potencia del sistema será necesaria para no hacer sobre-ingeniería ni someter a la electrónica a un estrés innecesario.

La convección forzada puede ser una solución para acelerar el intercambio de calor con el entorno, cuando los sistemas pasivos no sean suficientes. Típicamente consistirá en un ventilador que a través de diferentes conductos lleve aire frío a mayor velocidad de la que se obtendría mediante la convección natural:

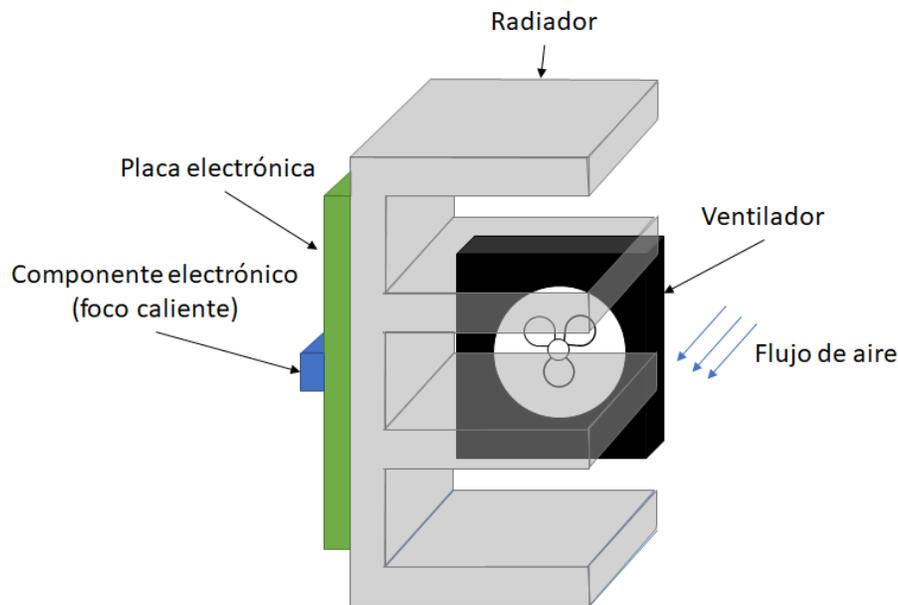


Figura 1.26: Ejemplo de sistema térmico con convección forzada usando un ventilador

1.9.3 Protección térmica

Es importante considerar que los parámetros máximos de operación de los componentes electrónicos no deben superarse en ningún caso, si se quiere garantizar la duración de vida esperada para los productos de automoción. Eso unido a las condiciones de uso de automoción, hacen que el rango de temperatura de uso sea mucho mayor que en aplicaciones domésticas - puede pensarse en dispositivos electrónicos alojados cerca del compartimento de un motor de explosión con altas temperaturas de operación.

Para evitar superar los parámetros máximos de los componentes, y en especial la temperatura máxima de operación, tanto de unión (T_j) como del componente (T_s) puede implementarse una ley de protección térmica, tal que a partir de cierta temperatura ambiente, el rendimiento del dispositivo sea reducido. Normalmente este tipo de protección térmica suele implementarse o bien disminuyendo la corriente aplicada a los LED o aplicando una señal PWM. [57] y [58]

En la Figura 1.27 puede verse como las prestaciones nominales se mantienen hasta una temperatura tal en la que el componente cerca de alcanzar su temperatura máxima de operación comienza a reducir su rendimiento (en este caso disminuyendo su corriente de polarización), de tal forma que se garantice no se sobrepasan los parámetros máximos definidos por el fabricante.

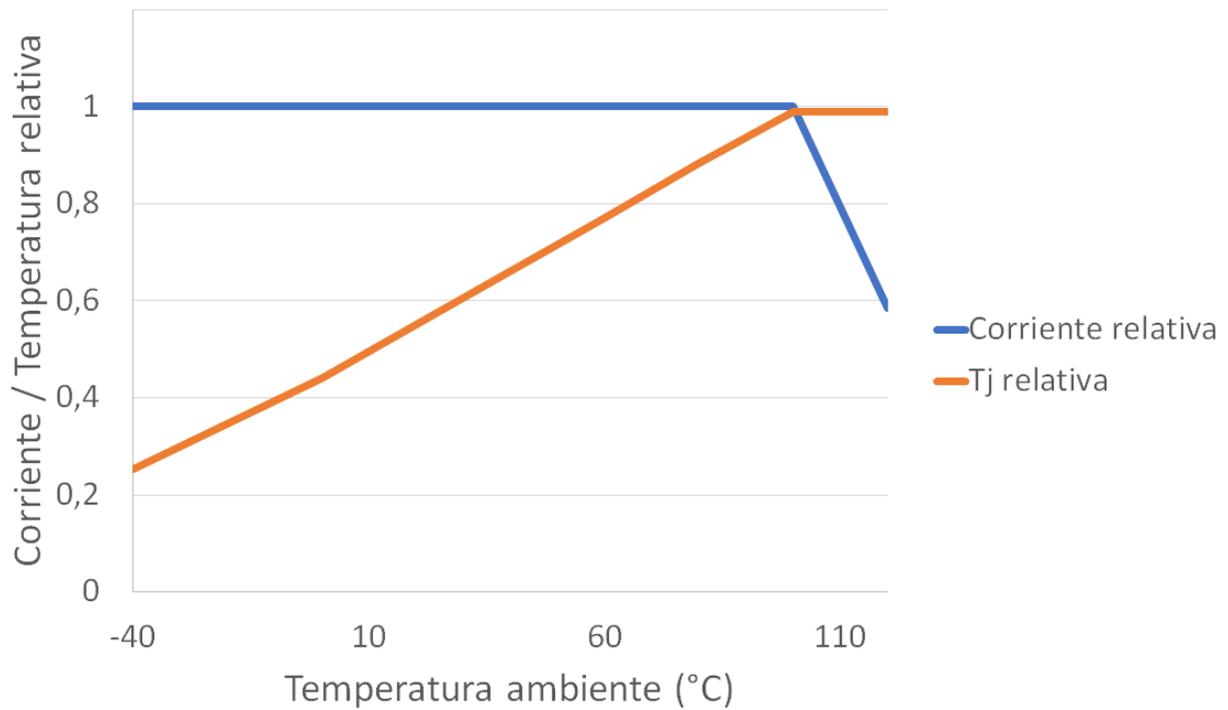


Figura 1.27: Modelo de protección térmica

Para ello normalmente los drivers necesitan adquirir la temperatura de operación del sistema lo más aproximada posible a la temperatura real de los componentes y poder aplicar la ley de protección térmica de forma adecuada. Sensores térmicos como los termistores - NTC suelen usarse, como se verá en el capítulo 2.

Capítulo 2

Mecanismos de compensación térmica

En este capítulo se intentará exponer soluciones a algunos de los comportamientos mostrados en el capítulo anterior: los LED tienen una fuerte dependencia de la temperatura de operación, tanto para el flujo que puedan emitir como para la tensión en directa.

En el primer caso puede tener un comportamiento indeseado al poder exceder el flujo necesario para una aplicación a bajas temperaturas o no alcanzar el mínimo necesario a partir de cierta temperatura; para lo cual se propone un sencillo sistema aplicado a drivers lineales para que la corriente dependa de la temperatura de unión del dispositivo y el flujo permanezca más constante dentro del rango de temperatura de la aplicación.

Para el segundo caso, en algunas topologías de circuitos, al reducir la tensión en directa de los LED, se disminuye potencia en los LED; pudiendo desplazar esta potencia disipada a otros componentes, necesitando aumentar las necesidades de disipación térmica del sistema. Aquí se propondrán mecanismos que puedan minimizar este comportamiento.

2.1 Métodos de compensación térmica del flujo

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, el flujo obtenido a partir de los LED es fuertemente dependiente de la temperatura ambiente [59]; en especial para los de tipo AlInGaP [60].

En esta sección se verá la opción de adaptar la corriente frente a la temperatura ambiente, de tal forma que se pueda compensar la variación de flujo, con el objetivo de intentar obtener un flujo lo más “plano” posible (es decir que el flujo de salida no dependa de la temperatura ambiente).

Se plantea el estudio de la inclusión de un pequeño bloque compuesto por resistencias y termistores (NTC) para sistemas sencillos [61] y [62], compuestos por un driver integrado responsable de la generación de la corriente necesaria para la polarización de los LED. Algunas soluciones se han planteado en el mercado, como reflejan las patentes [63] o [64]; aquí se plantea una solución válida para todo el rango de temperatura de la aplicación a la par que sencilla y barata.

2.1.1 Análisis inicial

Como visto en la sección 1.6.2, el flujo de salida de los LED dependerá en gran medida de su temperatura de operación; siendo además un factor dependiente de la tecnología y composición del propio semiconductor; por lo que la curva de compensación dependerá del tipo de LED con el que vaya a trabajarse y de sus factores de dependencia.

Lo que se propone es modificar la corriente de polarización del LED en función de la temperatura ambiente (considerándolo como una forma indirecta puesto que compensar la corriente midiendo el flujo lumínico sería mucho más complejo la vez que podría estar impactado por otros fenómenos no controlables como contaminación lumínica procedente del exterior del sistema).

2.1.2 Modelo térmico

Para conseguir el flujo lumínico estable, el driver que polarizará el LED tendrá que generar una corriente que dependerá de la temperatura del LED. El objetivo será compensar las derivas causadas por estos cambios de temperatura.

Para el rango de temperatura y corrientes que se utilizarán en la aplicación, consideraremos la simplificación de que la relación entre el flujo y la corriente es lineal [65], como puede verse en la ecuación 2.1, donde φ_r representa el flujo luminoso relativo, a es la constante de proporcionalidad e I la corriente que circula a través del LED.

$$\varphi_r = a \cdot I \quad (2.1)$$

Además, φ_r puede expresarse como función de la temperatura [66] cuando la corriente de polarización permanece constante, de acuerdo con la Ecuación 2.2, donde, α es el coeficiente de temperatura del LED, T_j representa su temperatura de unión y T_{j0} denota la temperatura de unión de referencia.

$$\varphi_r = e^{\alpha(T_j - T_{j0})} \quad (2.2)$$

Al combinar las Ecuaciones 2.1 y 2.2, la deriva en el flujo luminoso causada por cambios en la temperatura interna puede modelarse como una dependencia térmica de la corriente de polarización en la forma mostrada en la Ecuación 2.3, donde β representa un valor constante para una corriente dada.

$$I_T = \frac{e^{\alpha(T_j - T_{j0})}}{a} = \frac{e^{-\alpha T_{j0}}}{a} \cdot e^{\alpha T_j} = \beta \cdot e^{\alpha T_j} \quad (2.3)$$

De esta forma, puede compensarse la deriva térmica del flujo emitido por el LED si el sistema de control puede generar una corriente de polarización dinámica I_{bias} que siga el comportamiento de la Ecuación 2.3, siguiendo la ecuación 2.4

$$I_{bias} = I_0 \cdot e^{-\alpha T_j} \quad (2.4)$$

Siendo I_0 el valor constante obtenido en la ecuación 2.3.

Drivers de corriente en estudio

Los drivers de corriente lineales integrados, ya introducidos en la sección 1.4.1; de proveedores como Elmos o Infineon, son integrados que, alimentados a tensión de batería, fijan la corriente de salida mediante una resistencia externa (R_{set} , “Resistencia de Ajuste”) en la Figura 2.1; la tensión de salida de la carga (LED) siempre tiene que ser inferior o igual a la tensión de entrada, y la energía no disipada por los LED se disipará en forma de calor por el chip.

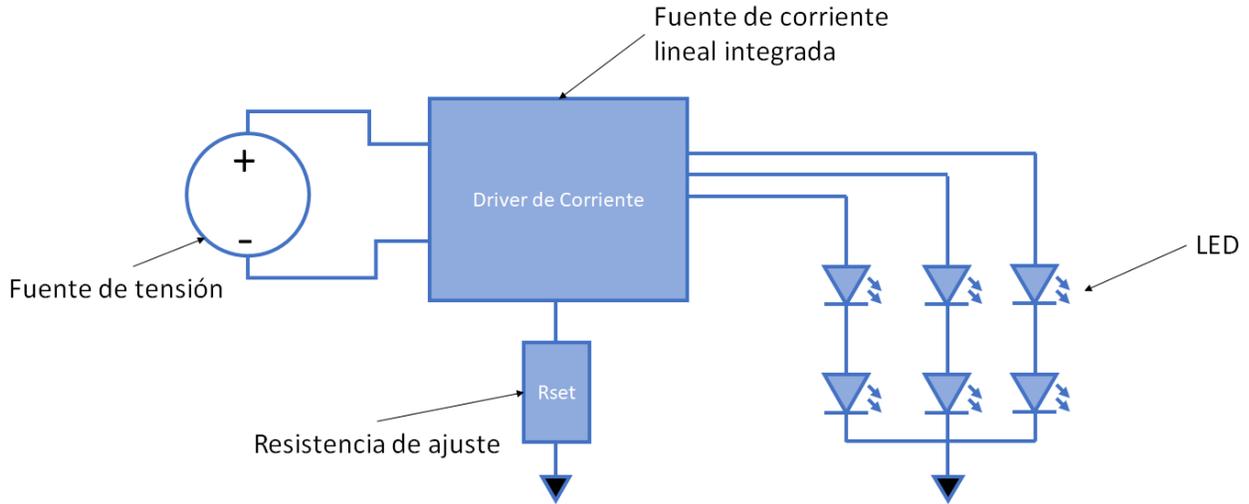


Figura 2.1: Circuito utilizado para polarizar los LED

Las corrientes que son capaces de generar estos chips suelen ir en los rangos entre 10 mA y 200 mA.

La ecuación que rige la corriente generada es 2.5, donde I_{bias} será la corriente estabilizada suministrada a la carga, K la constante específica de cada chip, V_{IR} será la tensión de referencia suministrada a la R_{set} . El único componente que puede modificarse para un chip dado será la R_{set} , mediante el cálculo de su valor, podrá generarse la I_{bias} deseada.

$$I_{bias} = K \frac{V_{IR}}{R_{set}} \quad (2.5)$$

Igualando la corriente que se desea obtener 2.4, con la que genera el driver 2.5:

$$I_T = \beta \cdot e^{\alpha T_j} = K \frac{V_{IR}}{R_{set}} \quad (2.6)$$

Obteniéndose la ecuación que debería seguir R_{set} para seguir el flujo deseado según el modelo descrito.

$$R_s = K \frac{V_{IR}}{I_0} e^{\alpha T_j} \quad (2.7)$$

Puede inferirse a partir de esta ecuación 2.7 que una resistencia variable, cuyo valor dependa exponencialmente de la temperatura podría ser empleada como la resistencia de medida R_{set} . Puesto que α será siempre netgativa para un LED, una NTC [18] y [67], un termistor, de factor negativo podría ser un dispositivo apropiado para cumplir esta función.

Un termistor NTC son componentes bien conocidos usados para medir la temperatura tiempo de real en aplicaciones; cuyo valor decrece exponencialmente con la temperatura, según la ecuación 2.8

$$R_{NTC} = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.8)$$

donde R_{NTC} es el valor que muestra la NTC a la temperatura T , R_0 es el valor nominal de la resistencia a la temperatura T_0 ; por último B es la constante de la NTC. En la Figura 2.2 pueden verse algunos ejemplos de diferentes NTC:

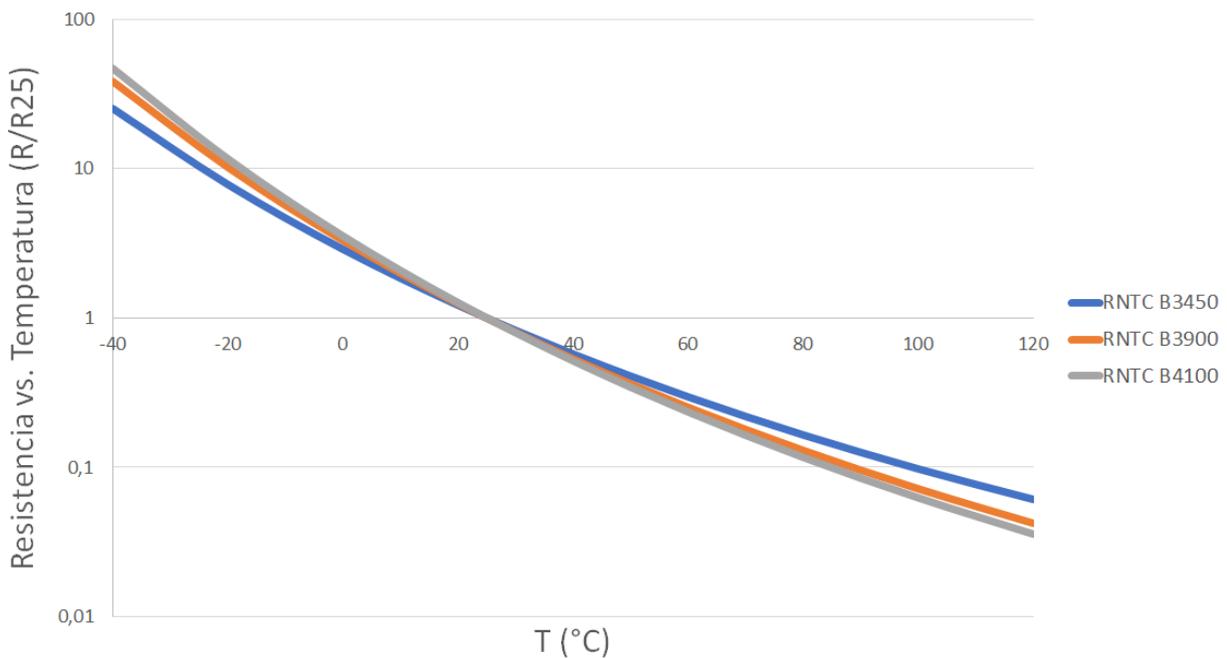


Figura 2.2: Diferentes curvas de NTC con diferentes parámetros B

Como visto a partir de la ecuación 2.8, la dependencia térmica de una NTC es inversa con la temperatura; para configurar un valor equivalente que cambie con la temperatura, de forma similar a como visto en la ecuación 2.7, se propone el usar de una red de resistencias que incorpore la NTC de forma similar a como puede verse en la Figura 2.3, de tal forma que cuando la temperatura es la mínima de la aplicación, regirá el comportamiento de la red $R_1 + R_2$ y a alta temperatura, R_1 .

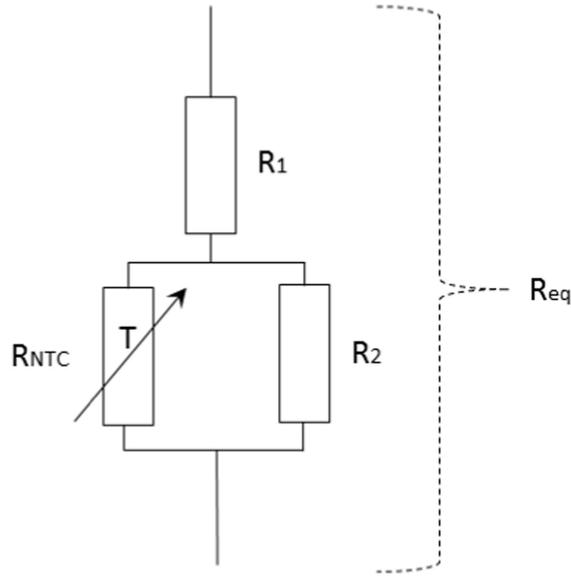


Figura 2.3: Red de resistencias para usar en el circuito de control

De esta forma, la Resistencia equivalente obtenida será:

$$R_{eq} = R_1 + R_{NTC} || R_2 = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}}{R_2 + R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}} \quad (2.9)$$

Será importante conocer la temperatura de unión del LED, para calcular con más precisión la corriente a aplicar para obtener el flujo deseado [68]. Es por ello importante emplazar la NTC en un lugar cercano a los pads de los LED para medir la temperatura de con precisión. La temperatura de unión vendrá dada por la ecuación [53]:

$$T_j = T_p + R_{TH} \cdot P \quad (2.10)$$

Substituyendo en la ecuación 2.9, se obtendría la ecuación 2.11

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T_j - R_{th} \cdot P} - \frac{1}{T_0}\right)}}{R_2 + R_0 e^{B\left(\frac{1}{T_j - R_{th} \cdot P} - \frac{1}{T_0}\right)}} \quad (2.11)$$

De esta forma, seleccionando adecuadamente los componentes estudiados: R_1 , R_2 , R_0 y B , podrá obtenerse un valor de R_{eq} que se asemeje a R_S de la ecuación 2.7 para un determinado rango de temperatura. Es por ello que será posible utilizar un driver integrado comercial para generar una corriente que variando con la temperatura, sea capaz de compensar la deriva térmica del flujo de los LED.

$$R_s = R_{eq} \quad (2.12)$$

$$K \frac{V_{IR}}{I_0} e^{\alpha T_j} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot e^{B \left(\frac{1}{T_j - R_{th} \cdot P} - \frac{1}{T_0} \right)}}{R_2 + R_0 e^{B \left(\frac{1}{T_j - R_{th} \cdot P} - \frac{1}{T_0} \right)}} \quad (2.13)$$

2.1.3 Materiales y métodos

El modelo visto anteriormente se usó para compensar el flujo lumínico de varios LED comerciales. En concreto se eligieron:

- DWA MKG y DWY MKG [35] (Dominant Opto Technologies, Melaka, Malasia), basado en semiconductores de tipo $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$. Estos LED emiten luz roja ($\lambda = 624$ nm) y amarilla ($\lambda = 587$ nm). Son LED tipos PLCC4, con corriente nominal de 50 mA.
- NFSW172AT [44] (Nichia Corporation, Tokushima, Japón), basado en tecnología $InGaN$, emitiendo luz blanca a través de conversión por fósforo. Son LED con una corriente nominal de 150 mA, y potencia nominal de 500 mW.

Estos LED cubran las aplicaciones fundamentales de iluminación exterior de los vehículos, tanto de proyectores como de pilotos traseros. Se evaluaron tres sistemas diferentes para cada tipo de LED.

Los drivers integrados utilizados para polarizar los LED seleccionados se seleccionaron entre varias alternativas, como pueden comprobarse en la Tabla 2.1, entre los fabricantes Elmos (Elmos Semiconductor, Dortmund, Alemania) e Infineon (Infineon Technologies, Múnich, Alemania).

Tabla 2.1: Diferentes drivers de corriente integrados y sus parámetros principales

Chip	Vset (V)	K
Elmos E522.9x [69]	1.5	311
Elmos E522.8x [70]	1.5	930
Infineon TLD2311 [71]	1.23	750
Infineon TLD1114 [72]	1.65	900

Se eligieron los E522.92 para los LED DWx MKG y los E522.82 para los LED blancos. Estos drivers integran tres fuentes de corriente independientes; el primero generando hasta un máximo de 165 mA, y el segundo hasta 450 mA.

Para obtener el coeficiente de temperatura de cada LED, los LED se sometieron a caracterización óptica; midiendo el flujo luminoso a diferentes corrientes y temperaturas; para confirmar las medidas prácticas con la hoja de características; que sólo muestra la caracterización a corriente nominal frente a la temperatura y diferentes corrientes, sólo a temperatura ambiente.

Los componentes montados en PCBs se montaron en placas de circuito impreso (PCB), y estas en una cámara climática, modelo CTS T -70/600 (CTS GmbH, Kall, Alemania), capaz de generar temperaturas estables en el rango de -70°C a 180°C .

La caracterización empezó a una temperatura mínima de -40°C incrementándola en pasos de 10°C hasta alcanzar la temperatura máxima de 70°C ; para asegurar que se alcanza el equilibrio termodinámico, se hizo un tiempo de estabilización de 120 minutos.

Se usó una mini esfera modelo SP23 (Feasas Enterprises, Limerick, Irlanda), junto con un espectrometro LED modelo S2 (Feasa Enterprises, Limerick, Irlanda), permitiendo la medida del flujo lumínico de los LED evaluados.

En la Figura 2.4 puede verse el proceso de medida de los LED en la cámara climática junto con la mini esfera.

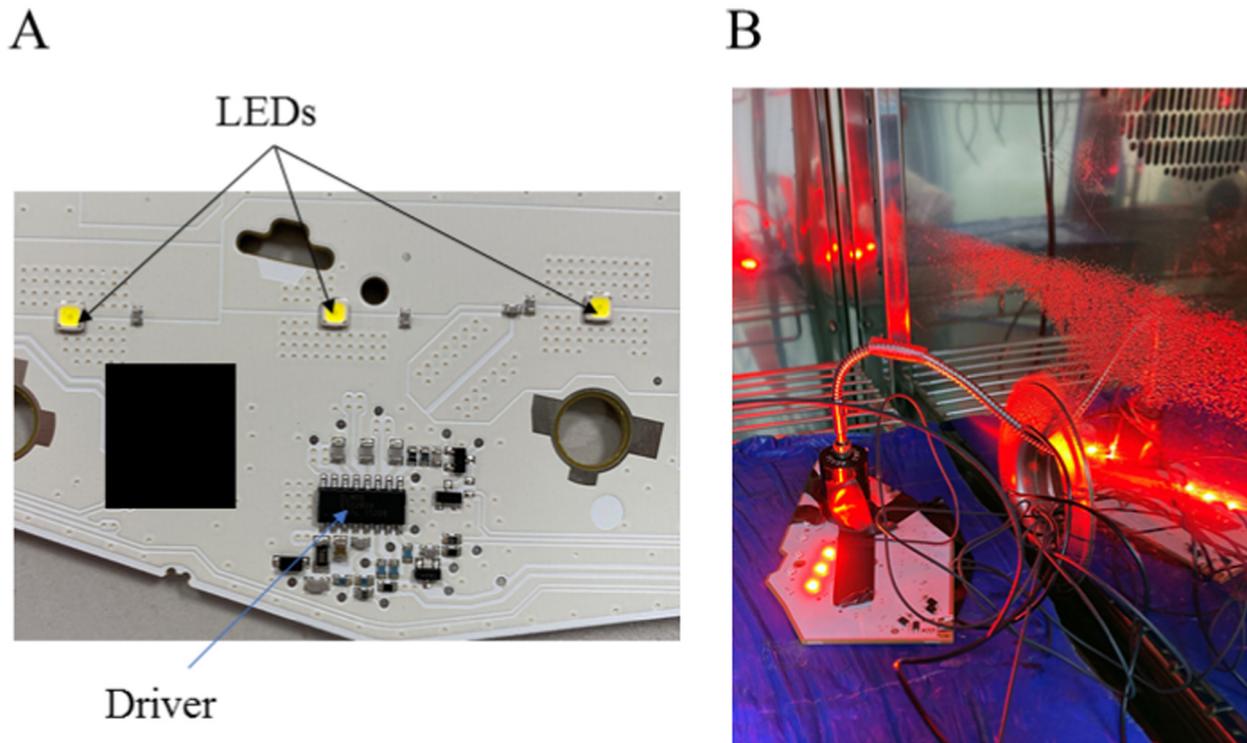


Figura 2.4: PCB con los LED seleccionados y drivers integrados (A). Sistema colocado en el interior de la cámara climática (B).

2.1.4 Resultados

Caracterización inicial

Inicialmente se caracterizaron los tres tipos de LED de la siguiente forma:

- Temperatura: en un rango entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a intervalos de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entre cada medida, se esperaba un tiempo de 120 minutos para la correcta estabilización del sistema para asegurar que se ha alcanzado el equilibrio termodinámico.
- Corriente: Para los PLCC4 con una corriente máxima por diseño de 70 mA, se caracterizó en pasos de 10 mA. Para los Nichia NFSW172AT, con corriente máxima de 250 mA, se caracterizó en pasos de 20 mA hasta llegar a los 200 mA.

Representando las medidas de flujo absolutas, se obtendrían las curvas que pueden apreciarse en la Figura 2.5.

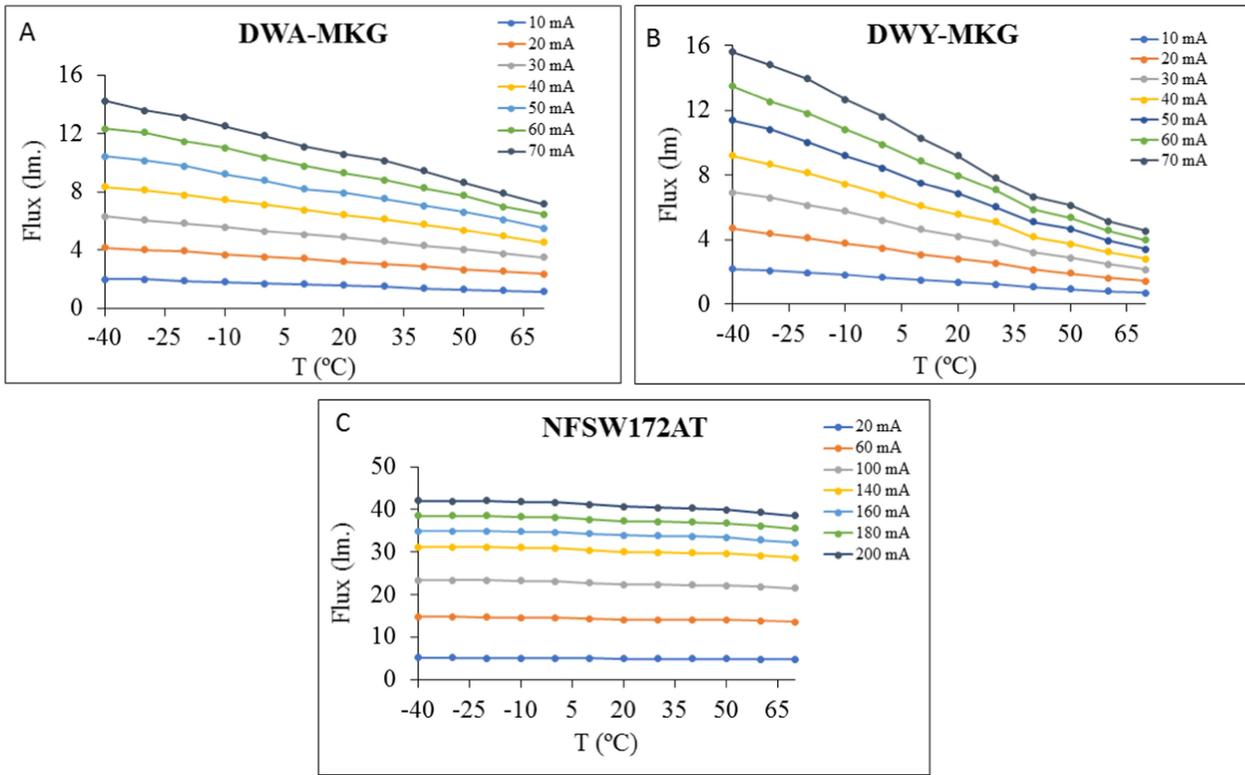


Figura 2.5: Caracterización óptica de los LED.

Para extraer el valor del coeficiente térmico, la Ecuación 2.2 fue linealizada bajo el supuesto de valores bajos de α y temperaturas próximas a T_{j0} :

$$\varphi_r - 1 = \alpha (T_j - T_{j0}) \quad (2.14)$$

Medidas de sistemas compensados

Para la modelización de los sistemas dinámicos, a partir de la ecuación 2.14, se obtuvieron los datos reflejados en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Parámetros

LED		
DWA MKG	DWY MKG	NFSW172AT
$a (@40mA) = 25 A^{-1}$	$a (@20mA) = 50 A^{-1}$	$a (@100mA) = 10 A^{-1}$
$\alpha = -0.005 \pm 0.0006K^{-1}$	$\alpha = -0.011 \pm 0.002K^{-1}$	$\alpha = -0.0003 \pm 0.0001K^{-1}$
$R_{th} = 65 K/W$	$R_{th} = 65 K/W$	$R_{th} = 13.5 K/W$
Drivers		
Elmos E522.82		Elmos E522.92
K=960		K=311
$V_{IR}=1.5 V$		$V_{IR}=1.5 V$
Termistores (NTC)		
NCP03XH103	NCP03XH223	NCP03XH153
$R_0 = 10k\Omega$	$R_0 = 22k\Omega$	$R_0 = 15k\Omega$
$T_0 = 25^{\circ}C$	$T_0 = 25^{\circ}C$	$T_0 = 25^{\circ}C$
B=3428K	B=3428K	B=3428K

Con los coeficientes térmicos resultantes, es posible determinar los valores de corriente de polarización requeridos dados por la Ecuación 2.5 para compensar las variaciones térmicas. Estas corrientes de polarización se han calculado para los tres LED analizados y se presentan en la Figura 2.6 (línea azul) para corrientes de polarización de 40 mA, 20 mA y 100 mA a 25°C, respectivamente. Como se observa, la corriente de polarización necesita aumentar con la temperatura interna del componente para contrarrestar la disminución del flujo luminoso causada por el aumento de temperatura. Para generar esta corriente utilizando el sistema propuesto, que consiste en un controlador integrado comercial y la red de resistencias shunt (Figura 2.3), se seleccionaron los valores de resistencia que pueden verse en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Resistencias para cada ensayo

LED	R_{NTC}	R_1	R_2
DWA MKG	10 k Ω B3428K	4.7 k Ω	35 k Ω
DWY MKG	22 k Ω B3428K	100 Ω	100 k Ω
NFSW172AT	15 k Ω B3428K	12 k Ω	3.3 k Ω

Aquí, R_0 representa la resistencia de la NTC a 25°C. Utilizando estos valores para la red resistiva, la corriente que el sistema debería generar se puede calcular a partir de las Ecuaciones 2.7, y 2.9, resultando en los valores mostrados en la Figura 2.6. En esta figura, la corriente de polarización teórica generada por el sistema de polarización representado en la Figura 2.1; cuando la resistencia R_s sigue un comportamiento exponencial como se describe en la Ecuación 2.7, representada por la línea azul en la Figura. Esta corriente es necesaria para compensar la dependencia térmica del flujo luminoso, modelada en la Ecuación 2.2. Puesto que el flujo se reduce con el aumento de temperatura, la corriente subirá con el aumento de la temperatura; compensando de esta forma el flujo con el cambio en la corriente. La línea punteada en la Figura 2.6 muestra la corriente de polarización teórica

que genera el controlador de corriente integrado si la resistencia de derivación se reemplaza por el grupo de resistencias de la Figura 2.3, que incluye el elemento sensible a la temperatura, el termistor.

La Figura 2.6 muestra que los resultados teóricos necesarios (línea azul) y obtenidos en la simulación (línea punteada) del sistema son muy similares. Por lo tanto, se puede concluir que el sistema de control propuesto debería ser capaz de generar una corriente de polarización que compense la deriva térmica del flujo luminoso en los tres LED.

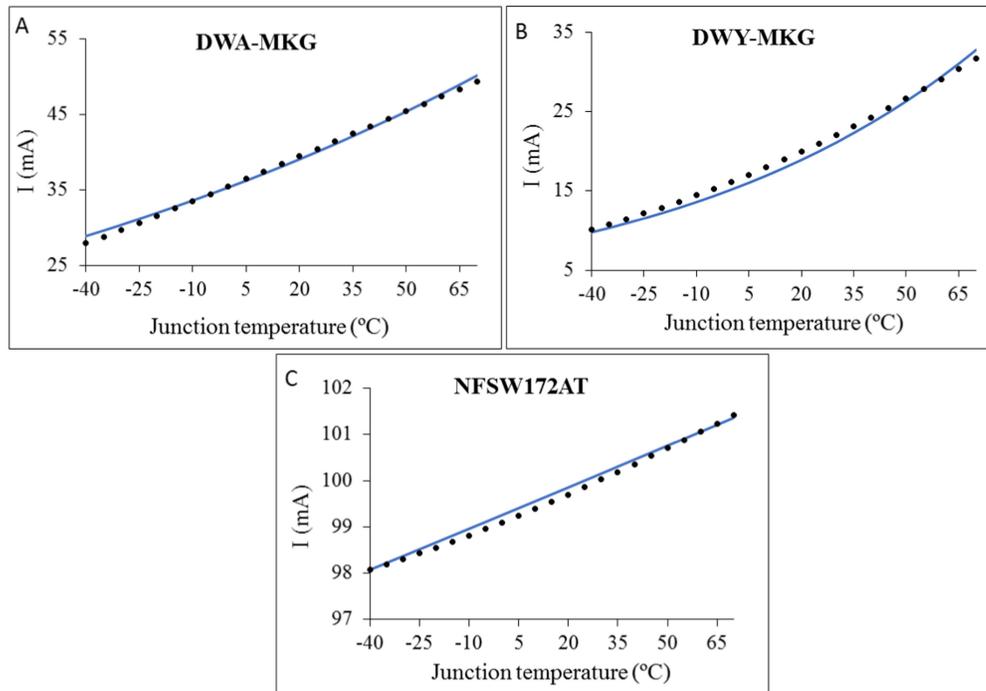


Figura 2.6: Corrientes de polarización teóricas para compensación térmica: requeridas (línea azul) y calculadas con el modelo propuesto (puntos negros).

El circuito de control propuesto descrito en la sección anterior se implementó con éxito utilizando los componentes especificados en la Tabla 2.2 y en la Tabla 2.3. Los LED polarizados con este circuito fueron sometidos a una caracterización óptica siguiendo la metodología previamente descrita, que implicaba medir el flujo luminoso dentro de un rango de temperatura de -40 a 60 °C. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2.7. En este gráfico, la línea negra representa el flujo luminoso relativo medido obtenido de los LED cuando la corriente de polarización se modifica de acuerdo con la temperatura de la unión, lo que indica el flujo luminoso compensado térmicamente. La corriente de polarización generada requerida para esta compensación también se representa en la Figura 2.7 como la línea azul. Para fines de comparación, el flujo luminoso relativo medido cuando la corriente de polarización está fija en el valor equivalente al flujo nominal a temperatura ambiente, calculada como: 40 mA, 20 mA y 100 mA, respectivamente; también se incluye en el gráfico como la línea naranja.

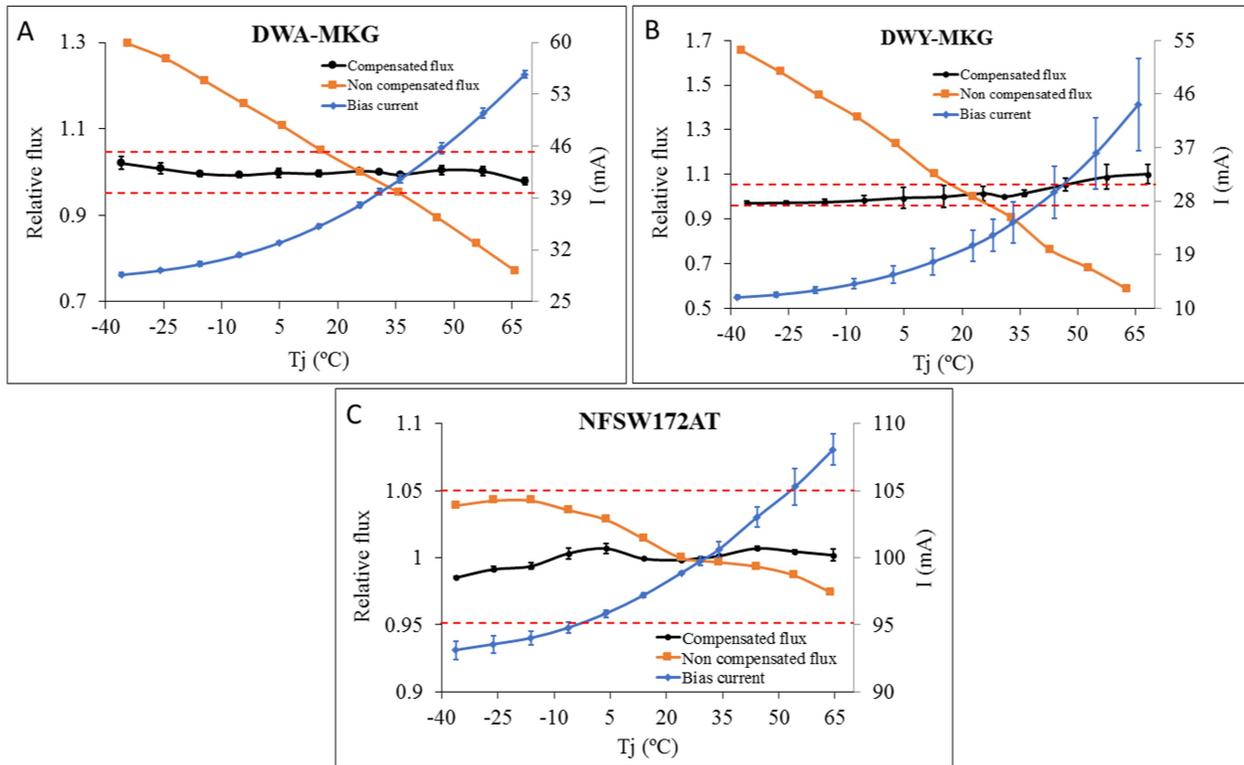


Figura 2.7: Flujo óptico relativo y corriente de polarización con compensación térmica

Como se muestra en la Figura 2.7, el flujo relativo dentro del rango de temperatura evaluado permanece más estable cuando los LED se polarizan a través del sistema propuesto (línea negra) en comparación con el caso de una corriente de polarización constante (línea naranja). Como era de esperar, esta corriente aumenta con la temperatura para producir un incremento correspondiente en la luz emitida, compensando así las pérdidas en el flujo luminoso. En caso de temperaturas más altas, la corriente puede alcanzar el límite máximo de corriente proporcionado por el controlador integrado. Sin embargo, incluso bajo tales circunstancias, los LED no se dañarían ya que la corriente máxima está limitada por el controlador integrado. La normativa aplicable [6] estipula que los flujos luminosos reales de cada fuente de luz utilizada no deben desviarse más del $\pm 5\%$ del valor medio a la temperatura de referencia de 25 °C. Estos límites se han indicado en los gráficos de la Figura 2.7 para demostrar cómo la técnica de compensación propuesta mantiene el flujo luminoso dentro de este intervalo en casi todo el rango de temperatura.

Como medida de mérito, la Tabla 2.4 muestra la variación porcentual máxima del flujo relativo $\Delta\varphi_r$ y su sensibilidad a la temperatura δ_r (obtenida como la pendiente de la regresión lineal de las curvas de flujo relativo en la Figura 2.7) observada en los LED analizados dentro del rango de temperatura evaluado, considerando los valores medios a través de diferentes réplicas, tanto para los casos compensados como no compensados.

A la luz de estos resultados, se hace evidente el significativo mejoramiento en la estabilización del flujo luminoso para los tres LED seleccionados. La desviación máxima del flujo se reduce en un factor que oscila entre 14.2 y 3.7, mientras que la sensibilidad a la temperatura se reduce en más de 7 veces en el peor de los casos. Es digno de destacar que la mejora es más evidente para los LED que

Tabla 2.4: Variación máxima ($\Delta\varphi_r$) y sensibilidad a la temperatura (δ_r) del flujo lumínico relativo

LED Model	$\Delta\varphi_r$ (no compensado)	$\Delta\varphi_r$ (compensado)	δ_r (no compensado)	δ_r (compensado)
DWA-MKG	59.7 %	4.2 %	$5.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$0.2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
DWY-MKG	115 %	13.1 %	$11 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
NFSW172AT	8.2 %	2.2 %	$0.7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$0.1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

muestran una mayor dependencia de la temperatura, mientras que para el modelo menos influenciado por la temperatura (NFSW172AT), el nivel de estabilización es menos pronunciado. Además, las diferentes muestras analizadas exhiben una buena repetitibilidad en los resultados, con variaciones inferiores al 5 %.

Con fines de comparación, se ha estimado la variación máxima del flujo luminoso ($\Delta\varphi_r$) para el modelo de LED DWA-MKG al utilizar un controlador de corriente complejo que incluye convertidor DC/DC y microcontrolador para el control de la corriente de polarización en diferentes rangos de temperatura. Cuando la compensación térmica se lleva a cabo a través de un dispositivo con estas características, el parámetro $\Delta\varphi_r$ alcanza un valor superior al 50 %, lo cual es significativamente mayor que el resultado obtenido para el mismo LED con la técnica de compensación térmica presentada aquí (4.2 %).

La eficiencia luminosa del LED se define como la relación entre el flujo luminoso generado y la potencia suministrada al LED [15], como se expresa en la Ecuación 2.15.

$$\text{Eficiencia luminosa} = \frac{\Phi_{lum}}{I \cdot V} \quad (2.15)$$

Este parámetro depende fuertemente de la temperatura de unión, ya que el flujo luminoso decae con la temperatura, como se explica en la Sección 3. Cuando la corriente de polarización del LED es fija, la eficiencia luminosa depende únicamente de la temperatura externa, lo que afecta en última instancia a la temperatura de unión, como se expresa en la Ecuación 2.10. Por lo tanto, en este caso, la eficiencia luminosa del LED disminuye con la temperatura. Cuando se aplica la compensación térmica presentada en este trabajo al LED, el flujo luminoso generado permanece más estable cuando varía la temperatura. Sin embargo, para lograr esta estabilización, la corriente de polarización debe aumentar cuando la temperatura sube, como se deduce de los resultados en la Figura 2.7. Este aumento en la corriente de polarización, siguiendo un comportamiento exponencial con la temperatura, conduce a una mayor potencia suministrada al dispositivo y, en consecuencia, a una disminución significativa en la eficiencia.

En ambas situaciones (polarización del LED con compensación térmica o sin compensación), la eficiencia luminosa disminuye con la temperatura. En el caso de la compensación térmica, se espera que esta disminución sea más pronunciada a altas temperaturas. La eficiencia luminosa de los LED analizados en este trabajo se ha evaluado en el rango de temperatura de -40 a 60 °C, y los resultados se presentan en la Figura 2.8. Como se puede ver, la eficiencia disminuye con la temperatura en ambos casos de polarización compensada y no compensada, como era de esperar. Sin embargo, en el caso

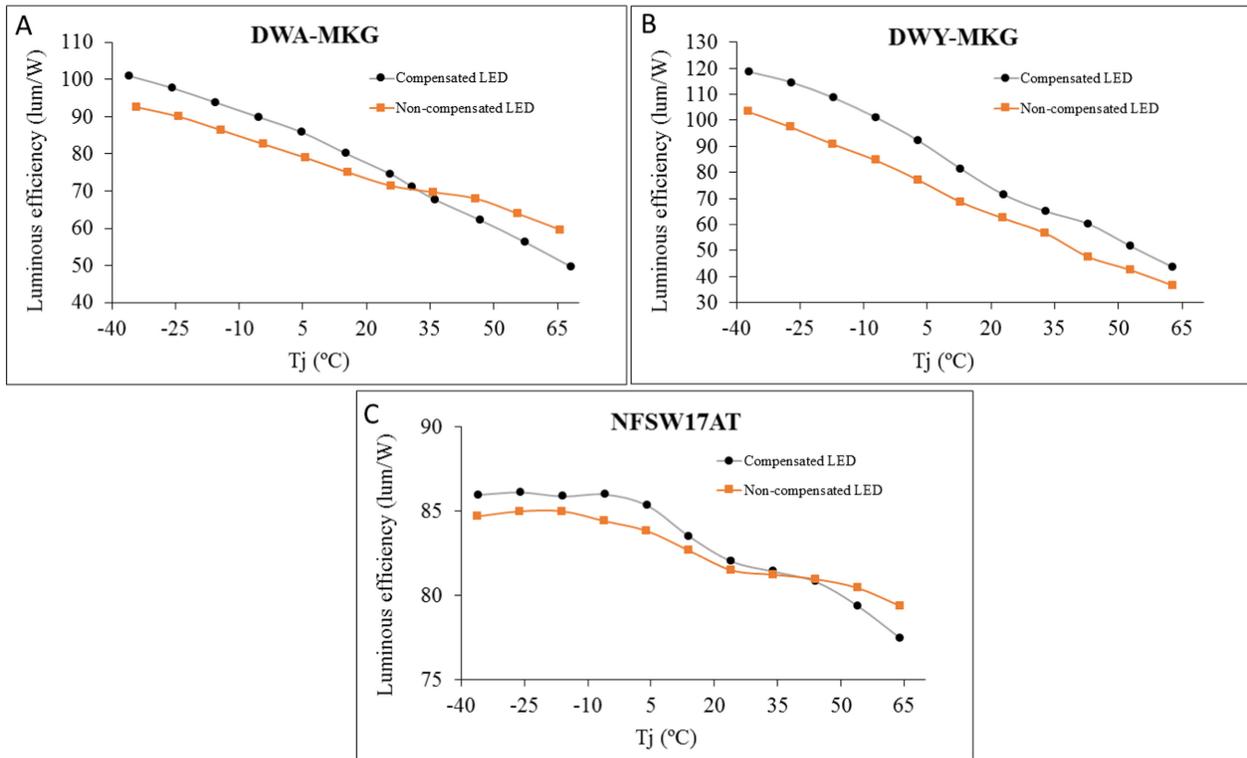


Figura 2.8: Eficiencia luminosa de los LED estudiados

compensado, se alcanzan valores más altos para la mayor parte del rango estudiado, especialmente para las temperaturas.

La técnica propuesta ajusta la corriente de polarización en función de la temperatura real de unión de los LED para mantener un flujo luminoso estable, como se puede observar en los resultados mostrados en la Figura 2.7. A temperaturas más bajas, la corriente de polarización se reduce por debajo del valor nominal proporcionado por el fabricante, lo que disminuye el estrés eléctrico en los LED. Por el contrario, a temperaturas más altas, la corriente se incrementa de manera exponencial. Aunque esta corriente elevada puede inducir estrés eléctrico que potencialmente podría reducir la vida útil de los LED, es importante tener en cuenta que la corriente de polarización está limitada por el controlador a valores dentro de las especificaciones de los LED. Por lo tanto, la vida útil de los LED (L90B10, más de 100.000 h) está garantizada incluso en entornos con temperaturas de hasta 70 °C.

2.1.5 Conclusiones

Puede comprobarse como la compensación térmica del flujo luminoso generado por LED comerciales comúnmente utilizados en la industria automotriz, es sencillo y fiable con pequeñas modificaciones sobre las soluciones actualmente en serie. El enfoque propuesto ofrece una solución analógica puramente basada en hardware, eliminando la necesidad de sistemas basados en microcontroladores o aplicaciones de software para ajustar el flujo de salida mediante modulación de amplitud de corriente (a diferencia de otros métodos como el ajuste PWM) y sin necesidad de detectores de

flujo luminoso. La solución desarrollada utiliza un controlador de corriente integrado que incorpora un elemento dependiente de la temperatura, específicamente un termistor NTC, para generar una corriente de referencia que se amplifica para polarizar los LED. Este elemento produce una variación de la corriente con la temperatura, contrarrestando así la disminución en la luz emitida por el LED a medida que la temperatura aumenta. La técnica de compensación propuesta se ha aplicado a tres modelos de LED comúnmente utilizados en iluminación automotriz (DWA-MKG, DWY-MKG y NFSW172AT). Los resultados muestran que el flujo luminoso generado en todos los casos permanece mucho más estable en un amplio rango de temperatura de -40 a 60 °C en comparación con cuando los LED están polarizados con una corriente fija. Las variaciones máximas en el flujo luminoso se reducen en 14.2, 8.8 y 3.7 veces, respectivamente. La variación relativa del flujo luminoso se limita al 13.1 % en el peor de los casos. Además, la sensibilidad del flujo luminoso relativo a la temperatura se reduce en 26.5, 9.2 y 7 veces para los tres LED. La técnica de compensación de deriva térmica también proporciona una mejor eficiencia luminosa para los LED en los tres casos a temperaturas inferiores a 25 - 35 °C. Con la técnica propuesta para compensar las deriva térmica en el flujo luminoso, los tres modelos de LED analizados en este trabajo cumplen con estos requisitos legales no solo a la temperatura de referencia sino en casi todo el rango de -40 a 60 °C.

2.2 Métodos de compensación térmica de la tensión para mallas de LED

Tendencias de diseño de última generación para la iluminación de automoción (delanteros y traseros) se está centrando cada vez más en los módulos de señalización por la capacidad de proyectar una firma característica con la que poder asociar al fabricante.

Las parrillas iluminadas discretizadas ([73]), las funciones complejas de DRL / PL, funciones matriciales en la función posición trasera, con muchos LED u OLED utilizados como fuentes de luz son el núcleo de estos módulos complejos de señalización que se están convirtiendo en la firma de los fabricantes de automóviles.

Este nuevo enfoque para los módulos conduce a nuevas arquitecturas, principalmente fuentes de voltaje, controlando ramas de LED / OLED en paralelo y polarizadas por un controlador de corriente.

Las soluciones tradicionales, donde el mismo convertidor DC/DC se encarga de generar una corriente constante de salida para la polarización de los LED [74], no puede aplicarse en circuitos más complejos donde se combinan ramas de LED (bien como una única rama o como una malla) junto con un driver de corriente lineal (Por ejemplo porque la topología quiera controlar de forma selectiva diferentes ramas para separar funciones o animaciones).

En la Figura 2.9 puede comprobarse como en un DC/DC de corriente al añadir un driver lineal que pueda controlar de forma selectiva las ramas de LED no funcionará correctamente, al tener dos elementos que intentarán fijar la corriente en el sistema por separado; sin tener sincronización alguna; por lo que la topología del DC/DC debe pasar a ser controlado por tensión.

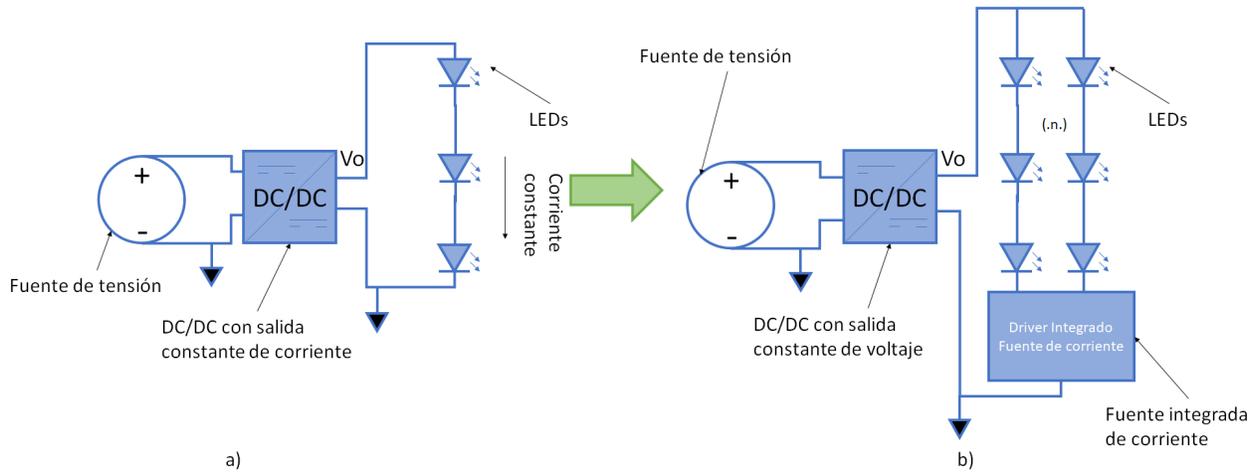


Figura 2.9: Topologías: DC/DC de corriente (a) y DC/DC de tensión con driver lineales (b)

Con el fin de mejorar la eficiencia de los componentes, el comportamiento térmico y la eficiencia energética, ayudando a la reducción de emisiones de CO_2 ; en este trabajo se propone el enfoque de adaptar dinámicamente el valor de la fuente de voltaje a la tensión necesaria en función de la temperatura ambiente, similar a los mecanismos que ya incluyen las ramas sencillas de LED como puede verse en [75], [76] ó [77]. En estos sistemas polarizados a corriente constante, la tensión generada por el convertidor será la demandada por los propios LED.

2.2.1 Análisis básico

Analizando el circuito básico que se tomará de partida que puede verse en la Figura 2.10. Partiendo de un diseño básico, se considerará que V_o es constante durante toda la operación del sistema.

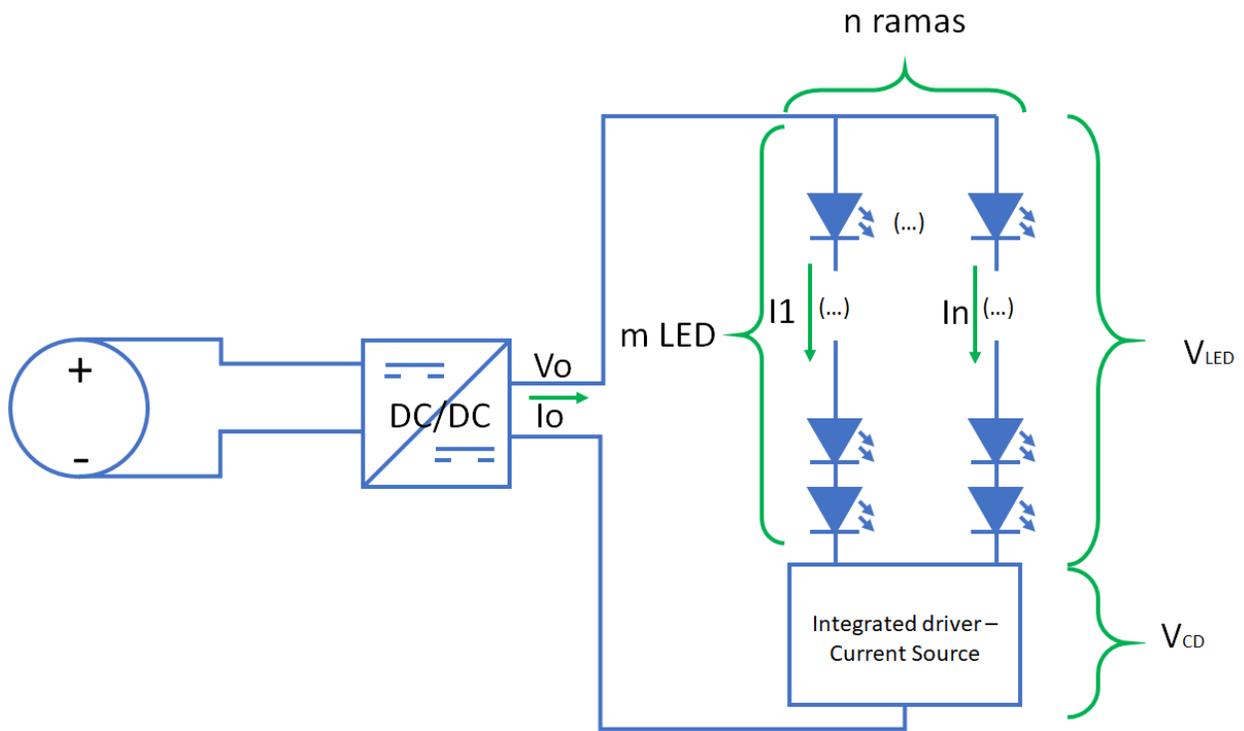


Figura 2.10: Convertidor DC/DC y drivers de corriente

Como puede comprobarse, el circuito de ejemplo de la Figura 2.10 está compuesto por n ramas, cada una de ellas por m LED.

En esta configuración la generación de la tensión V_o vendrá dada por el convertidor DC/DC. Por contra la corriente I_o será la fijada por el driver de corriente integrado.

La corriente de salida del convertidor vendrá definida por I_o que será la sumatoria de las corrientes de todas las ramas de los LED (Ecuación 2.16)

$$I_o = \sum_{i=1}^{i=n} I_i \quad (2.16)$$

La potencia entregada al sistema de iluminación; compuesto por los LED y el driver de corriente, vendrá dado por:

$$P_o = V_o \cdot I_o \quad (2.17)$$

El valor de V_o tendrá que calcularse para asegurar la polarización del circuito en el peor caso; tal y como se ha visto en el capítulo anterior, la mayor tensión necesaria para la polarización de los LED se producirá a la menor temperatura ambiente de la aplicación; en este caso $-40^\circ C$.

$$V_o = V_{LED} + V_{CD} \quad (2.18)$$

Sin embargo, como explicado anteriormente, el término V_{LED} no permanecerá constante en todo el rango de temperatura de la aplicación; si se considera una V_o constante establecida en el convertidor DC/DC, este exceso de tensión se desplazará al término V_{CD} que verá aumentada la tensión de entrada y por tanto la potencia a disipar.

Si se considera que la tensión directa de un LED V_F depende de la temperatura, esta tensión puede modelarse, como una primera aproximación, mediante la Ecuación 2.19 [78], cuando la corriente de polarización es constante.

$$V_F = V_i + k_T (T - T_i) \quad (2.19)$$

donde V_i y T_i son la tensión y temperatura de referencia, típicamente a temperatura ambiente; k_T es la constante de proporcionalidad y T la temperatura actual del LED.

Por tanto el cálculo de la tensión de salida V_o en un sistema con ramas de “ m ” LED en serie, será:

$$V_o(T) = m \cdot (V_i + k_T (T - T_i)) + V_{CD} \quad (2.20)$$

puediendo evaluarse a la menor temperatura de la aplicación como:

$$V_o(T_{min}) = m \cdot (V_i + k_T (T_{min} - T_i)) + V_{CD} \quad (2.21)$$

donde V_o es la tensión calculada a la menor temperatura de la aplicación, que asegurará en el convertidor el funcionamiento del sistema a la menor temperatura de la aplicación, V_{CD} es la tensión mínima necesaria por el driver de corriente para asegurar su funcionamiento y T_{min} la temperatura mínima de la aplicación.

Por contra, evaluando el sistema a la mayor temperatura de la aplicación:

$$V_o(T_{max}) = m \cdot (V_i + k_T (T_{max} - T_i)) + V_{CD} \quad (2.22)$$

Calculando la diferencia de la V_o necesaria entre las dos temperaturas extremas, T_{min} y T_{max} :

$$\Delta V_o = V_o(T_{min}) - V_o(T_{max}) \quad (2.23)$$

$$\Delta V_o = m \cdot k_T \cdot (T_{min} - T_{max}) \quad (2.24)$$

Los convertidores DC/DC utilizados para la polarización de los sistemas de iluminación, incluyen lazos de realimentación que permiten, a través de elementos pasivos externos (resistencias) fijar la tensión de salida al valor deseado o adaptarla a la carga [79].

Para el circuito de la Figura 2.11.a, la tensión de salida generada por el convertidor viene dada por [80]:

$$V_o = \alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.25)$$

Donde el parámetro α es un coeficiente específico del convertidor DC-DC. Como se desprende de la ecuación 2.25, la tensión de salida del convertidor es un valor constante que depende de los valores R_1 y R_2 .

Para que un DC/DC integrado, como el mostrado en la Figura 2.11.a genere una tensión que se adapte térmicamente a la tensión dependiente de la temperatura como calculada en la Ecuación 2.30, es necesario incluir en el lazo de realimentación externo un elemento resistivo dependiente de la temperatura. Tal elemento puede ser un termistor, cuya resistencia varía fuertemente con la temperatura ambiente. Puesto que la constante k_T es siempre negativa para un LED (como visto, su tensión disminuye con la temperatura a corriente constante); se propone el uso de una NTC en el lazo de realimentación externo del convertidor DC/DC en dos posibles configuraciones, que se corresponde con las Figuras 2.11.a y .b; donde la resistencia R_1 del divisor original se substituye por una red de resistencias donde se incluye un termistor NTC.

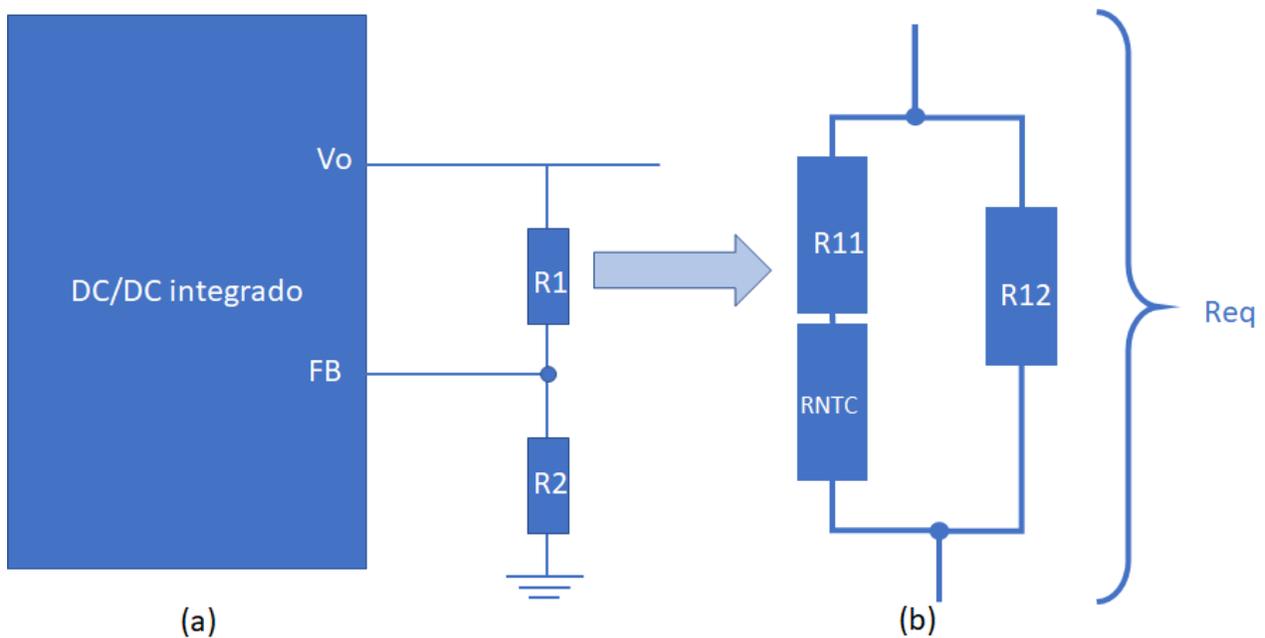


Figura 2.11: Configuración de un convertidor DC/DC mediante un lazo de realimentación resistivo (a). Configuración Resistencia / NTC para substituir R_1 (b).

De este modo, la resistencia R_1 sería substituida por el bloque equivalente:

$$R_{eq} = (R_{11} + R_{NTC}) || R_{12} \quad (2.26)$$

Recordando que la resistencia de NTC se rige por la Ecuación 2.27:

$$R_{NTC}(T) = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.27)$$

donde $R_{NTC}(T)$ es la resistencia a la temperatura T , R_0 es la resistencia que presenta la NTC a la temperatura T_0 , y B la constante del termistor.

A partir de la Ecuación 2.25, aplicando las ecuaciones 2.26 y 2.27, puede obtenerse la tensión de salida del convertidor DC/DC utilizando las configuraciones A y B, al substituir la resistencia $R1$ de (Figura 2.11.a) obteniendo:

$$V_o(T) = \alpha \left(1 + \frac{R_{12} \cdot \left(R_{11} + R_0 e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \right)}{R_2 \left(R_{11} + R_{12} + R_0 e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \right)} \right) \quad (2.28)$$

Si se iguala la ecuación 2.28, con la 2.20

$$m \cdot (V_i + k_T (T - T_i)) + V_{CD} = \alpha \left(1 + \frac{R_{12} \cdot \left(R_{11} + R_0 e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \right)}{R_2 \left(R_{11} + R_{12} + R_0 e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \right)} \right) \quad (2.29)$$

pudiéndose de esta forma, despejar el valor de cada componente como:

$$\Delta V_o = V_o(T_{min}) - V_o(T_{max}) \quad (2.30)$$

2.2.2 Materiales y métodos

En la Tabla 2.6 puede verse a partir de los modelos de los LED que se estudiarán a continuación, la tensión que demandará el sistema LED + Driver de corriente y la tensión generada por un conversor constante. (Se considera la tensión a la corriente nominal para simplificar los cálculos)

Puede verse como la tensión estática frente a la dinámica, que adapta la tensión demandada por los LED a la generada por el convertidor, van separándose conforme aumenta la tensión.

Esta diferencia de tensión es finalmente absorbida por el driver de corriente (y por tanto la potencia) desperdiciada en el proceso. Se ha elegido el LED Dominant DWA MKG, [35] para construir la tabla.

Tabla 2.5: Diferentes configuraciones de número de LED (m) y parámetros V_o

Temperatura (°C)	V LED (V)	Sistema con 1 LED		Sistema 2 con LED		Sistema con 3 LED		Sistema con 4 LED	
		V_o Dinámico	V_o Estático						
-40	2.9	3.875	3.875	6.75	6.75	9.625	9.625	12.5	12.5
-20	2.8	3.775	3.875	6.55	6.75	9.325	9.625	12.1	12.5
0	2.72	3.71	3.875	6.42	6.75	9.13	9.625	11.84	12.5
20	2.67	3.67	3.875	6.34	6.75	9.01	9.625	11.68	12.5
40	2.61	3.61	3.875	6.22	6.75	8.83	9.625	11.44	12.5
60	2.57	3.57	3.875	6.14	6.75	8.71	9.625	11.28	12.5
80	2.53	3.53	3.875	6.06	6.75	8.59	9.625	11.12	12.5
100	2.475	3.475	3.875	5.95	6.75	8.425	9.625	10.9	12.5
120	2.45	3.45	3.875	5.9	6.75	8.35	9.625	10.8	12.5

Donde V_{LED} es la tensión de un sólo LED a la temperatura considerada,

V_o Dinámico es la tensión propuesta que garantiza la polarización de la rama de n número de LEDs (En la Tabla 2.6 tomaría los valores 1..4) más la tensión necesaria en V_{CD} (1 V).

V_o Estático será la tensión que debe garantizar el convertidor para asegurar que el sistema funciona a la T_{min} de la aplicación. Al no adaptar su tensión a la temperatura ambiente del sistema permanecerá constante en todo el rango de tensión de la aplicación. Es el estado del arte actual.

Se partirá de un sistema con dos LED rojos, del proveedor Dominant (Dominant Opto Technologies, Melaka, Malasia), modelos DRS MKS y DRA HKS, polarizados con un chip Elmos E522.95 (Elmos Semiconductor, Dortmund, Alemania); capaz de polarizar hasta 16 ramas y hasta 100 mA por rama; conectados a un DC/DC, de tipo Buck, modelo MPQ4322GLE (Monolithic Power systems, Washington, Estados Unidos), tal y como puede verse en la Figura 2.12.

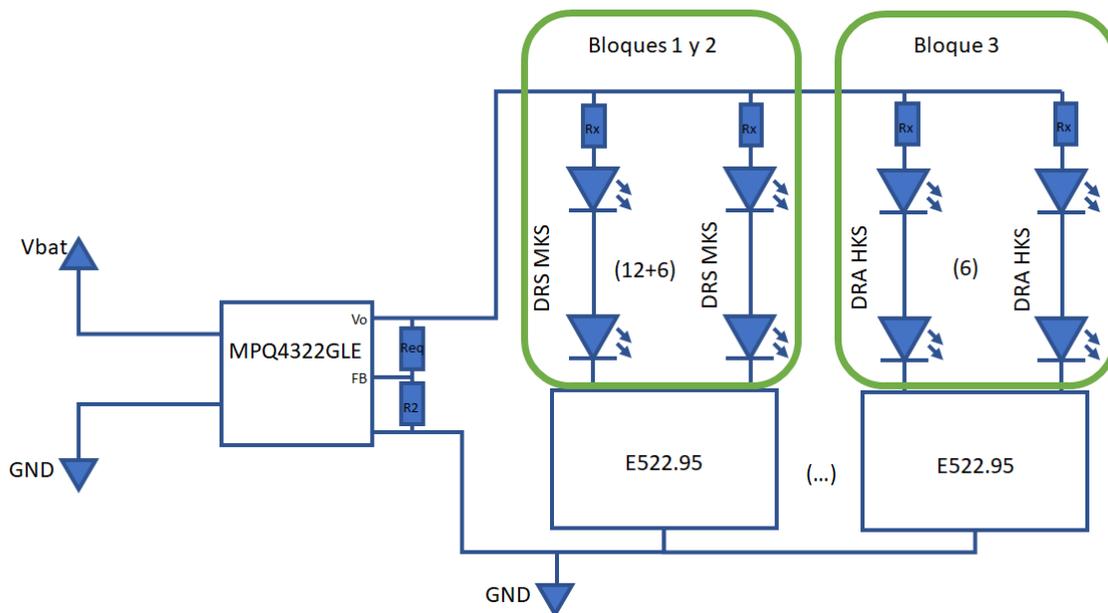


Figura 2.12: Circuito evaluado

Los principales parámetros relevantes que habrá que considerar para el estudio serán los detallados en la Tabla 2.6: tipo de LED, número de ramas (n) y número de LEDs por rama (m), así como

la corriente por rama y los componentes utilizados como convertidor DC/DC y como driver de corriente.

Tabla 2.6: Configuración del sistema evaluado

Característica	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3
Número de ramas (n)	12	6	6
LED / rama (m)	2	2	2
Modelo LED	DRS MKS	DRS MKS	DRA HKS
Corriente por rama (mA)	13	9	30
Corriente total (mA)	156	54	180
Convertidor DC/DC	MPS MPQ4322GLE		
Driver de corriente	E522.59	E522.59	E522.59

En la Figura 2.13 se muestra una fotografía de uno de los sistemas evaluados.

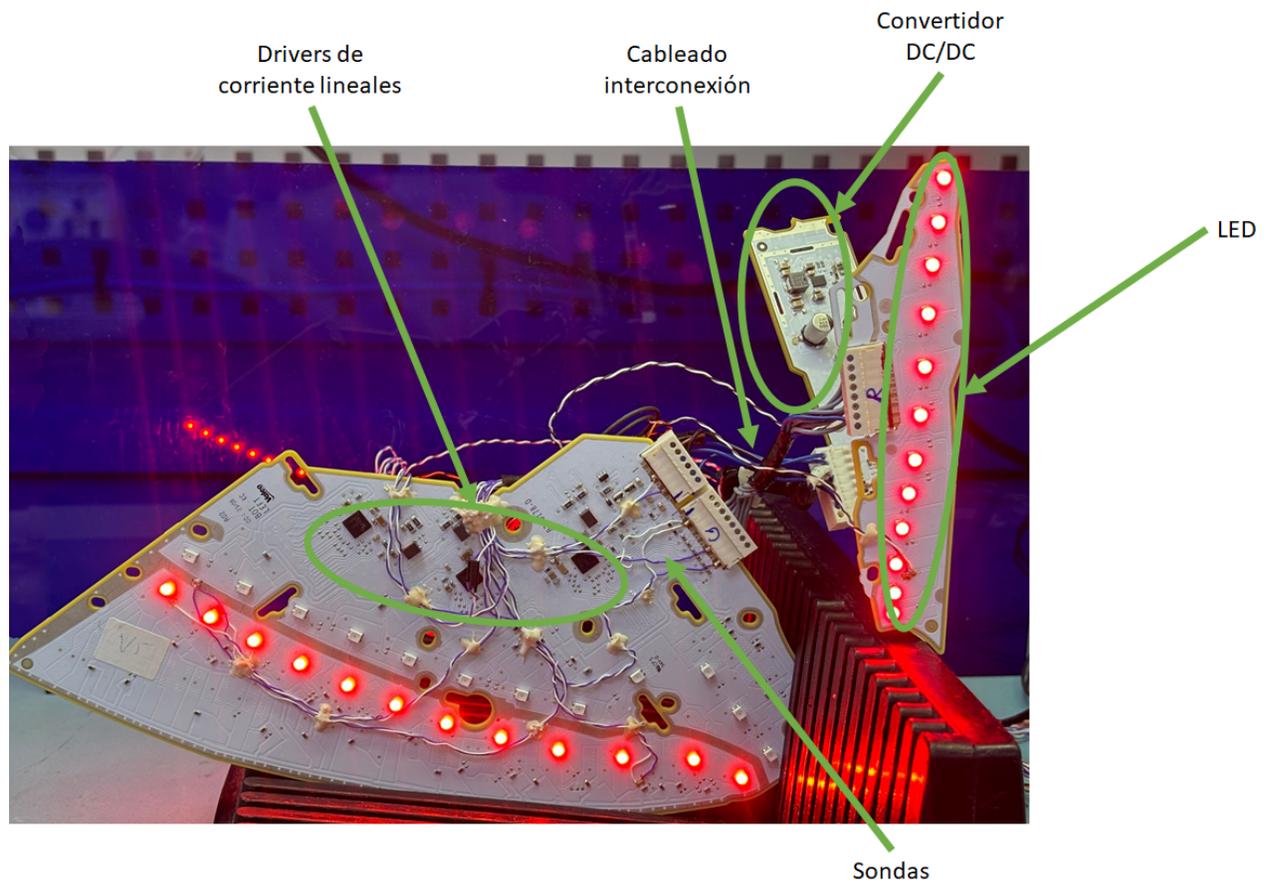


Figura 2.13: Fotografía de las placas implementando la configuración del DC/DC y LED con drivers de corriente lineales

En la Figura 2.12 aparece un componente llamado “Rx”; son resistencias que se colocan en serie con los LED para compensar, parcial o totalmente la gestión de bins de tensión de los LED: que asegurar

el mismo comportamiento eléctrico entre diferentes bins de tensión de los LED y no desplazar la menor tensión para los LED más eficientes a los drivers de corriente, el valor de Rx tomará un mayor valor de tal forma que la tensión V_{LED} incluyendo la tensión que cae en los LED y en Rx será similar independientemente del bin de tensión.

Cuando se consideren todos los bins de voltaje disponibles para los LED seleccionados en el diseño, tal y como puede comprobarse en la hoja de características [35]; habrá 5 bins de voltaje (Tabla: 2.7). Para poder usar un DC/DC con una salida de tensión común, se propone usar la resistencia “Rx” de tal forma que absorba la tensión de cada bin de tensión:

- Para el bin V5 se utilizará una resistencia de 0Ω y con 0 V de caída de tensión; al ser el “peor” bin a considerar en el diseño (el de mayor voltaje).
- Para el bin V4 se calculará una resistencia tal que la caída de tensión cuando la carga esté polarizada de 150 mV por LED.
- Para el bin V3 se calculará una resistencia tal que la caída de tensión cuando la carga esté polarizada de 300 mV por LED.
- Para el bin V2 se calculará una resistencia tal que la caída de tensión cuando la carga esté polarizada de 450 mV por LED.
- Para el bin V1 se calculará una resistencia tal que la caída de tensión cuando la carga esté polarizada de 600 mV por LED.

Tabla 2.7: Bins de tensión considerados para los LED elegidos y variación con la temperatura

Temperatura (°C)	ΔV_f (V)	Bin V1 (V)	Bin V2 (V)	Bin V3 (V)	Bin V4 (V)	Bin V5 (V)
-40	0.25	[2.05 - 2.2]	[2.2 - 2.35]	[2.35 - 2.5]	[2.5 - 2.65]	[2.65 - 2.8]
-20	0.15	[1.95 - 2.1]	[2.1 - 2.25]	[2.25 - 2.4]	[2.4 - 2.55]	[2.55 - 2.7]
0	0.07	[1.87 - 2.02]	[2.02 - 2.17]	[2.17 - 2.32]	[2.32 - 2.47]	[2.47 - 2.62]
20	0.02	[1.82 - 1.96]	[1.96 - 2.12]	[2.12 - 2.27]	[2.27 - 2.42]	[2.42 - 2.57]
25	0	[1.8 - 1.9]	[1.9 - 2.1]	[2.1 - 2.25]	[2.25 - 2.4]	[2.4 - 2.55]
40	-0.04	[1.76 - 1.91]	[1.91 - 2.06]	[2.06 - 2.21]	[2.21 - 2.36]	[2.36 - 2.51]
60	-0.08	[1.72 - 1.87]	[1.87 - 2.02]	[2.02 - 2.17]	[2.17 - 2.32]	[2.32 - 2.47]
80	-0.12	[1.68 - 1.83]	[1.83 - 1.98]	[1.98 - 2.13]	[2.13 - 2.28]	[2.28 - 2.43]
100	-0.175	[1.62 - 1.77]	[1.77 - 1.92]	[1.92 - 2.07]	[2.07 - 2.22]	[2.22 - 2.37]

Este sistema se ha evaluado en dos situaciones: Generando una tensión de polarización V_o para las ramas de LED a través del convertidor DC/DC con un lazo de realimentación resistivo clásico (tensión constante en todo el rango de tensión) y generando la tensión mediante un lazo con un termistor para compensar la dependencia térmica de los LED del sistema, según visto en la Figura 2.11 b y c.

La potencia generada por el convertidor DC/DC se ha analizado en el rango de temperatura de automoción, entre -40°C y 100°C , introduciéndola en una cámara térmica CTS T-70/600 (CTS GmbH, Kall, Alemania) que permite la generación de temperaturas constantes en el rango de -70°C a 180°C .

Con el objetivo de seleccionar una de las configuraciones propuestas para el lazo de realimentación del convertidor DC/DC, así como los valores más apropiados de las resistencias y del termistor elegido

en estas configuraciones, se han hecho diferentes simulaciones numéricas de la tensión generada por este dispositivo con diferentes valores de los componentes en el lazo y las dos configuraciones propuestas. Para los modelos de LED considerados en este diseño, tal y como refleja la Tabla 2.6, a -40°C puede considerarse un incremento positivo de 225 mV, y de 175 mV a 100°C

Para un m de 2 LED, y considerando que el driver de corriente seleccionado necesita una tensión de 1 V, la tensión V_o necesaria generada por el DC/DC tendrá que ser al menos de 7.6 V, incluyendo 1 V de margen, aproximadamente, para absorber posibles tolerancias de componentes en el estudio del peor caso - este último margen podrá reducirse en producción industrial una vez se conozca el modelo concreto de todos los componentes a utilizar).

Dentro de este margen es importante considerar que si bien el sensor térmico, NTC, que se usará para generar la referencia de la tensión del convertidor puede no estar cerca de los LEDs, cuya tensión queremos controlar; por lo tanto sería de esperar alguna diferencia de temperatura [81], será importante considerar que tiene que existir alguna relación entre la temperatura del sensor y la de los LED. Tendrán que estar confinados en el mismo elemento de iluminación (proyector delantero o piloto trasero), por lo que habrá una influencia térmica recíproca entre cada elemento. Será por tanto importante contar con una simulación térmica [82] en diferentes condiciones de temperatura externa e interna, tensiones de alimentación e incluso velocidad del aire [83] para poder calcular con precisión la dispersión existente entre la temperatura de los LED y la del propio termistor.

A la temperatura máxima de operación en automoción, 120°C , la tensión máxima necesaria para las ramas propuesta es de 6.7 V aproximadamente. Por tanto se necesita elegir los elementos del lazo para la que la tensión generada varíe, de una forma que siga la curva de tensión vs. temperatura de los LED de la forma más similar posible en el rango de temperatura especificado. (Tabla 2.6)

Con este objetivo se han evaluado diferentes configuraciones, que proporcionarán los valores extremos (a -40°C y 120°C) especificados, pero con diferentes curvas entre ambos puntos.

2.2.3 Resultados experimentales

La primera medida experimental que se hizo fue comprobar que la deriva térmica de los LED evaluados coincidía con la referenciada en la hoja de características, al ser las condiciones diferentes (corriente de polarización).

Evaluando el sistema en el rango de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$ se comprobó experimentalmente que la deriva térmica media medida en la aplicación en los LED era de 220 mV frente a la información referida en la hoja de características (Tabla 2.7), evaluados en condiciones nominales, sería de 375 mV según la hoja de características.

Así pues, el convertidor DC/DC tiene que tener una corrección de la tensión de salida en el rango de unos 440 mV, para compensar las ramas de dos LEDs del sistema descrito anteriormente.

Evaluado el sistema descrito anteriormente en una cámara climática, se propusieron las siguientes configuraciones:

Tabla 2.8: Diferentes configuraciones evaluadas para el convertidor DC/DC

Componente	Estático	Configuración #1	Configuración #2	Configuración #3
R2 ($k\Omega$)	4.75	4.3	0.23	0.815
RNTC ($k\Omega$)	∞	10B3380	10B3380	100B4250
R11 ($k\Omega$)	∞	200	13	77
R12 ($k\Omega$)	43	43	2.1	7.2
V_o (-40°C) (V)	8.04	8.08	8.04	7.85
V_o (80°C) (V)	8.04	7.39	7.19	7.33
Δ (mV)	0	690	815	520

Según la nomenclatura seguida en el trabajo, y que puede comprobarse en la Figura 2.14

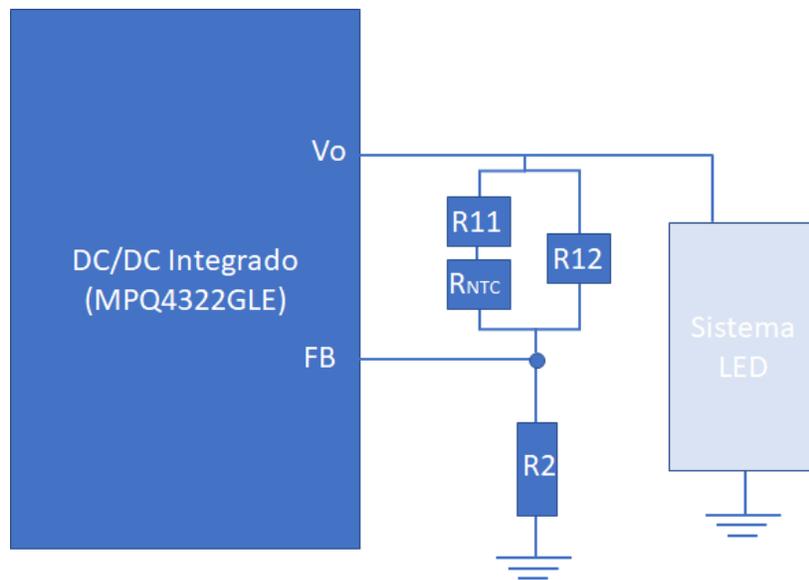


Figura 2.14: Nomenclatura de componentes propuesta

La configuración estática sería el estado del arte actual. Para ver el rendimiento actual, las configuraciones listadas de la 1 a la 3 proponen diferentes curvas de compensación para el cambio de tensión de los LED con la temperatura.

Se normalizaron todas las curvas obtenidas al valor de 8.04V a -40°C; junto con el cambio de tensión de los LED, tanto según el modelo teórico a partir de los datos de la hoja de características como a partir de las medidas experimentales.

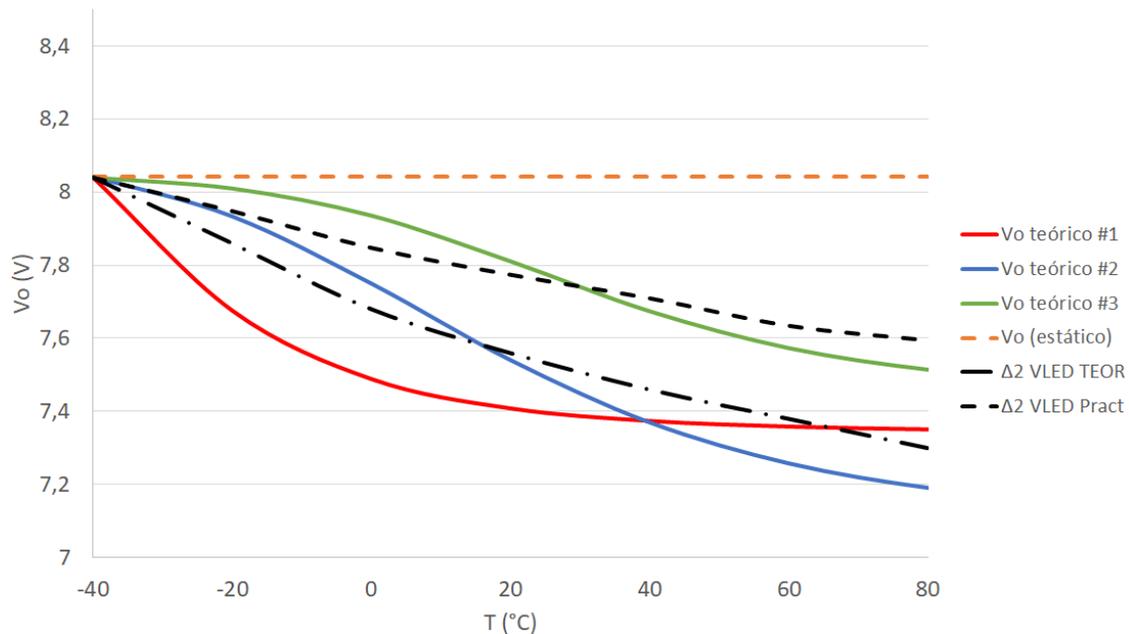


Figura 2.15: Comparación de diferentes curvas y tensión demandada por los LEDs normalizada

donde:

- V_o teórico #1: Será la curva de salida, normalizada, para el modelo #1.
- V_o teórico #2: Será la curva de salida, normalizada, para el modelo #2.
- V_o teórico #3: Será la curva de salida, normalizada, para el modelo #3.
- V_o (estático): Será el estado del arte actual: La tensión permanece constante en todo el rango de temperatura de la aplicación.
- $\Delta 2$ VLED TEOR: Es la caída de tensión de una rama compuesta por dos LED en serie, en el rango de temperatura señalado, según la hoja de características del fabricante.
- $\Delta 2$ VLED Pract: Es la caída de tensión de una rama compuesta por dos LED en serie, en el rango de temperatura señalado, según medidas experimentales.

En primer lugar puede verse como la curva de tensión de los LEDs experimental varía ligeramente frente a la teórica: 370 mV según la hoja de características y 223 mV según las medidas experimentales para cada LED.

La curva del modelo #3 es la que mejor sigue la curva experimental de la tensión de los LEDs, mientras que las curvas del modelo #1 y #2 siguen la tensión teórica de la hoja de características.

Esta diferencia explicará el porqué la curva que muestra un menor cambio de potencia en el driver de corriente en todo el rango de temperatura será la del modelo #3.

Como refleja la Figura 2.16 Una vez adquiridos los datos, se apreció una diferencia entre la tensión de salida simulada y la medida; debido a tolerancias de componentes, valores de resistencias no

normalizados, etc. La diferencias son absorbidas por el sistema, dentro de los límites de seguridad que se consideraron en los cálculos.

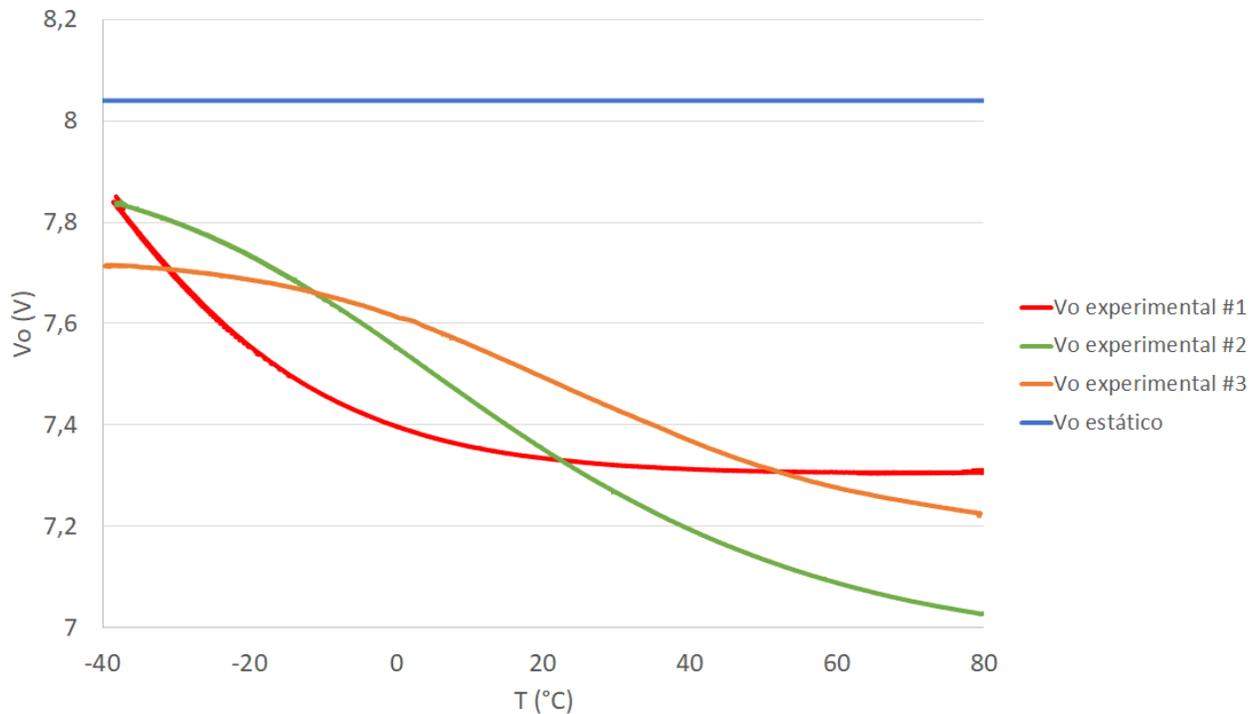


Figura 2.16: Tensión de salida medida para los diferentes modelos

Se midió la tensión en el punto del circuito marcado como V_{CD} en las diferentes configuraciones para comprobar la potencia disipada por el driver de corriente, de cara a poder comparar la potencia disipada por el componente, comparando la configuración estática con con alguna de las 3 curvas anteriormente descritas.

Tabla 2.9: Caída de tensión en el driver de corriente (V) frente a temperatura

$T(^{\circ}C)$ \ $V_{CD}(V)$	Estático	Configuración #1	Configuración #2	Configuración #3
-40°C	3.24	3.08	3.06	3.41
-20°C	3.35	2.87	3.02	3.47
0°C	3.45	2.8	2.96	3.48
20°C	3.52	2.82	2.85	3.44
40°C	3.6	2.85	2.78	3.37
60°C	3.67	2.91	2.75	3.34
80°C	3.73	2.97	2.74	3.37

Con estos datos, puede verse como la tensión caída en el driver de corriente, identificado como V_{CD} ; la solución “estática” presenta un incremento conforme aumenta la temperatura por otro lado, las configuraciones dinámicas limitan la caída de tensión máxima

Puesto que puede simplificarse el modelo como que la caída en el driver de corriente tiene que ser al menos de 1 V en todo el rango de temperatura, la curva podría ajustarse incluso con 2 V menos.

Al ser la corriente de la aplicación 390 mA, la potencia puede calcularse como se muestra a continuación.

Tabla 2.10: Potencia disipada en los drivers de corriente con diferentes configuraciones y a diferentes temperaturas

$T(^{\circ}\text{C})$ \backslash $P_{CD}(\text{W})$	Estático	Configuración #1	Configuración #2	Configuración #3
-40°C	1.42	1.37	1.37	1.33
-20°C	1.47	1.29	1.37	1.35
0°C	1.51	1.27	1.32	1.36
20°C	1.54	1.28	1.28	1.34
40°C	1.57	1.29	1.24	1.31
60°C	1.60	1.31	1.22	1.31
80°C	1.63	1.32	1.22	1.31
Pmax	1.63	1.37	1.37	1.36
Pmin	1.42	1.27	1.22	1.31
Δ	0.21	0.10	0.14	0.05
Variación	13 %	7 %	11 %	3 %

Como puede apreciarse en los datos, la potencia disipada en el driver corriente puede reducirse por 4 (Aproximadamente un 25 % de la potencia inicial) con un correcto dimensionamiento de la compensación térmica del convertidor DC/DC que alimenta el sistema.

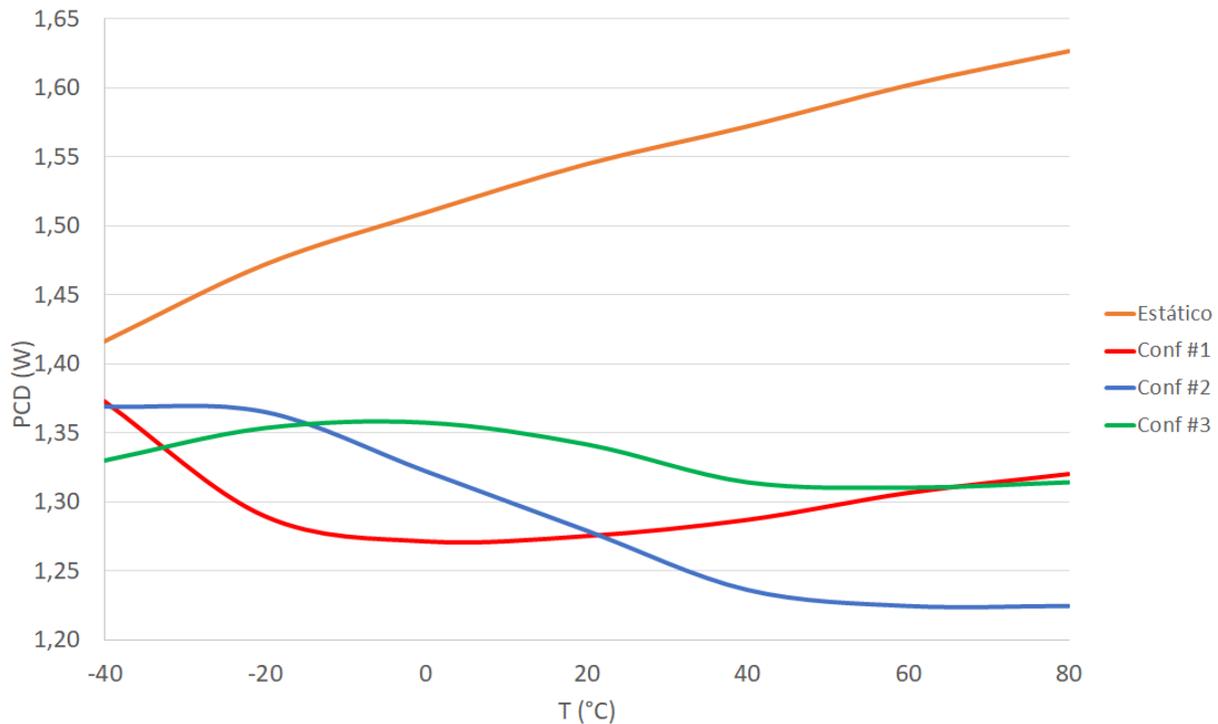


Figura 2.17: Potencia disipada en el driver de corriente (W) frente a temperatura

Centrándose en la potencia consumida por el sistema, puede representarse gráficamente la potencia total de entrada y de salida del convertidor DC/DC; formulado como: Potencia de entrada:

$$P_i = V_i \cdot I_i \quad (2.31)$$

donde, P_i es la potencia de entrada al sistema calculada por la tensión de entrada, V_i por la corriente de entrada I_i .

Potencia de salida:

$$P_o = V_o \cdot I_o \quad (2.32)$$

donde, P_o es la potencia de entregada al sistema LEDs y driver de corriente, calculada por la tensión de salida, V_o (generada por el convertidor DC/DC según la metodología explicada) por la corriente de salida I_o .

Adicionalmente se calculará la eficiencia, como el coeficiente entre la potencia de salida, P_o entre la potencia de entrada P_i :

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_o}{P_i} \quad (2.33)$$

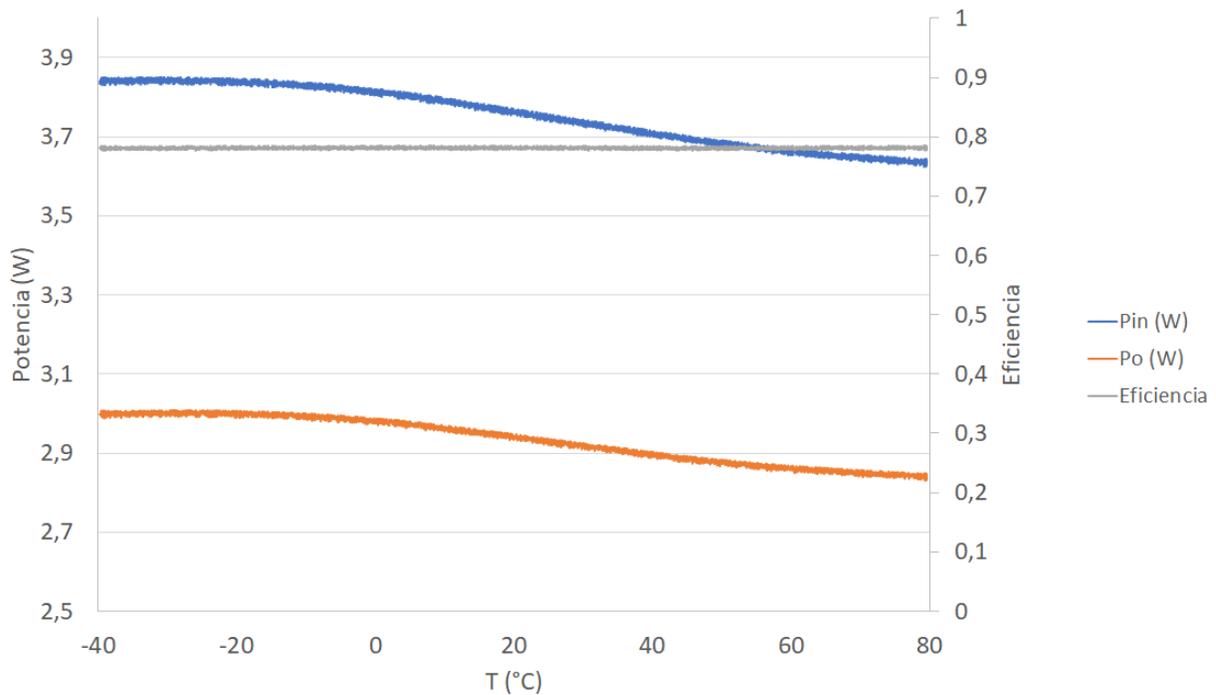


Figura 2.18: Potencia de entrada y salida de la configuración #3 evaluada en este trabajo, junto con la eficiencia en función de la temperatura ambiente

También puede estudiarse la eficiencia como la potencia entregada al sistema (P_i (W)) frente a la potencia eléctrica entregada únicamente a los LED; obviando el resto de la potencia disipada en el resto de elementos (driver de corriente, convertidor DC/DC, etc.).

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{LED}}{P_i} \quad (2.34)$$

Normalizando la potencia a -40°C para absorber la tolerancia explicada anteriormente, puede verse como la eficiencia del sistema estático decrece más (hasta un 10 %) frente a la eficiencia del modelo #3 que tan sólo empeora un 4.5 % a alta temperatura.

Puede comprobarse en la Figura 2.19 como la potencia se reduce - se adapta - a altas temperaturas, lo cual no solamente será una mejora de la gestión térmica de los componentes electrónicos, (driver de corriente) (menor potencia, menor masa del sistema de gestión térmico y más sencillo) sino que también habrá una reducción del consumo del sistema a altas temperaturas, mejorando de esta forma el consumo en general del vehículo, reduciendo las emisiones de CO_2 .

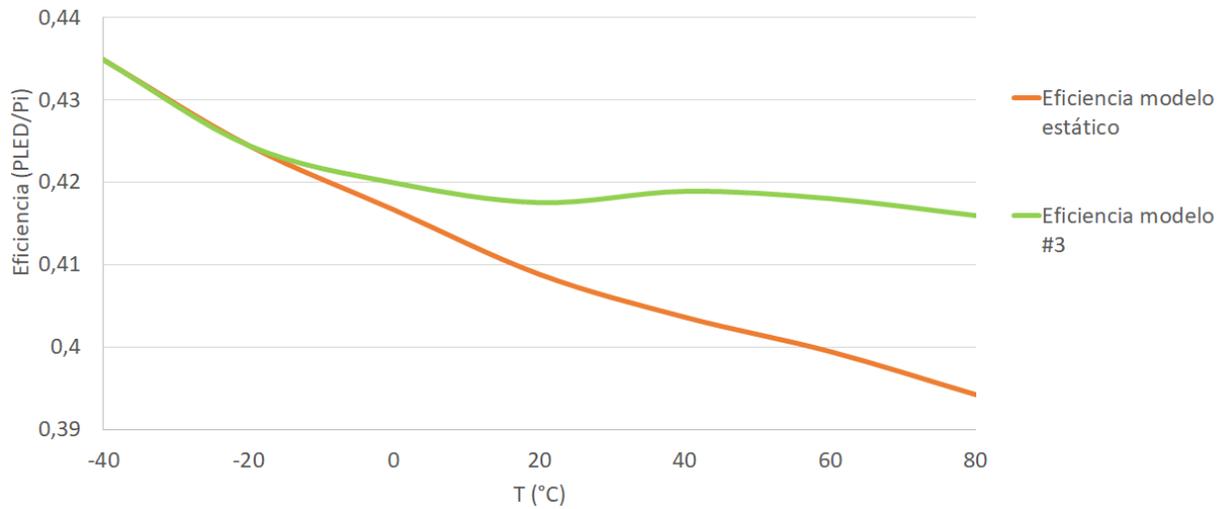


Figura 2.19: Eficiencia del modelo estático y dinámico como potencia de entrada frente a potencia entregada a los LED

Tabla 2.11: Potencia y eficiencia del modelo estático y dinámico como potencia de entrada frente a potencia entregada a los LED

Temperatura (°C)	PLED (W)	P modelo estático (W)	P modelo #3(W)	Eficiencia modelo estático	Eficiencia modelo #3
-40	1.67	3.84	3.84	0.435	0.435
-20	1.63	3.84	3.84	0.424	0.424
0	1.6	3.84	3.81	0.417	0.420
20	1.57	3.84	3.76	0.409	0.418
40	1.55	3.84	3.7	0.404	0.419
60	1.53	3.83	3.66	0.399	0.418
80	1.51	3.83	3.63	0.394	0.416

2.2.4 Conclusiones

Claramente puede verse como al incluir un elemento térmico (NTC) en el bucle de control del DC/DC permite crear un sistema dinámico que permita compensar parcial o incluso completamente la deriva eléctrica de los LED frente a la temperatura. (Como se ha visto un decremento de la tensión en directo a mayores temperaturas). Estas mejoras permitirán:

- Adaptar el consumo de energía a las necesidades reales de los componentes de iluminación, sin malgastar energía cuando la tensión en directa de los LED disminuya. Esto también permitirá una reducción de las emisiones de CO₂.
- Disminuir la potencia disipada por los drivers de corriente en las mayores temperaturas de la aplicación, permitiendo reducir los sistemas térmicos y/o el número de chips a utilizar en la aplicación; reduciendo con ello el coste de la aplicación, al simplificar el sistema de disipación térmica: En caso de usar ventiladores y/o radiadores podrán reducirse o incluso eliminarse, y en caso de usar tan sólo el substrato (FR4) para la disipación pasiva, podrá reducirse el área necesaria de este.

Capítulo 3

Detección avanzada de LED en cortocircuito para aplicaciones de iluminación de automoción

El método actual para diagnosticar posibles fallos de LED en los sistemas de iluminación / señalización, cuando se usan topologías de convertidores DC/DC y LED en serie (Ver Figura 3.1), según se vió en el capítulo 1.4.1 se basa en medir la caída de voltaje a través de la rama completa y compararlo con unos valores umbral calculados estáticamente que cubren los mejores y peores casos estudiados para la topología concreta [84].

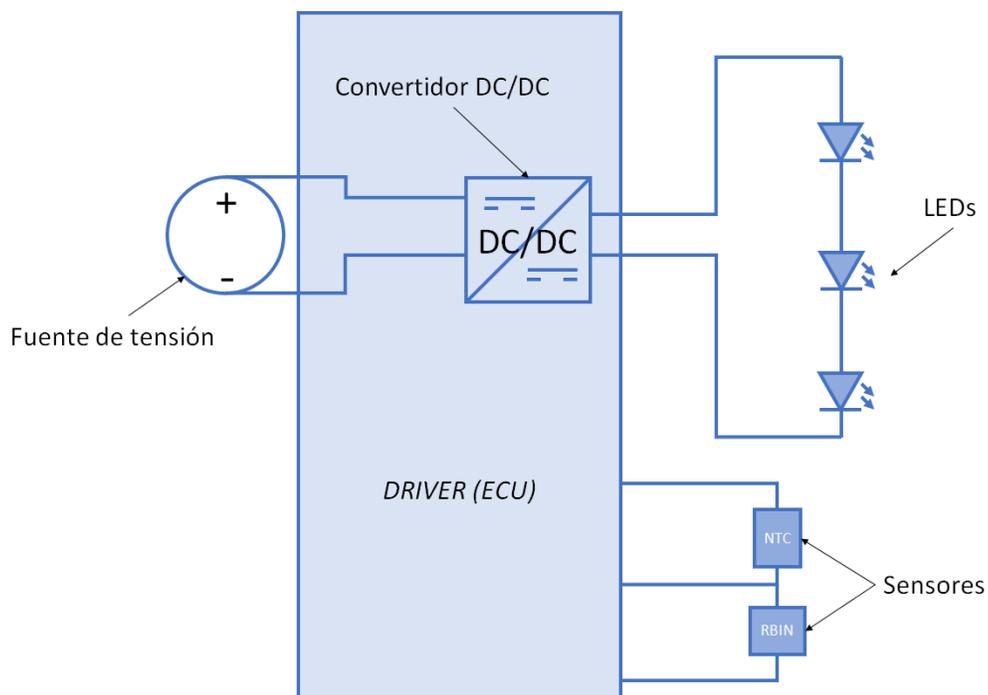


Figura 3.1: Circuito tipo con una unidad driver integrado con una carga compuesta por LED y sensores

Donde el Driver (ECU) será el dispositivo integrado que incluye el convertidor DC/DC para adaptar la energía entregada por la fuente de tensión del vehículo en la corriente y tensión necesaria para polarizar los LED. Adicionalmente, la unidad se encargará de leer la información de la NTC (Sensor térmico) para proteger la carga en caso de sobre-temperatura reduciendo su corriente, y leyendo la Resistencia “Rbin” para adaptar la corriente al “bin” de flujo lumínico de los LED y asegurar la homogeneidad entre diferentes piezas.

Considerando todo el rango de temperatura, bins y tolerancias, la detección de un sólo LED en cortocircuito puede ser muy complicado en algunos casos.

Aquí se estudiarán diferentes modelos dinámicos que en tiempo de ejecución medirán la tensión en directo y la compararán con el resultado de un modelo matemático considerando las condiciones presentes en el sistema o bien evaluarán en sistema de IA (Una red neuronal) la posible ocurrencia del fallo. Este estudio se centrará en el estudio de la detección de LED en cortocircuito puesto que para fallos en circuito abierto puede haber métodos más sencillos, como medir la corriente que circula por la carga.

El diagnóstico permitirá a la ECU comunicar al coche el estado de la función; que tiene especial importancia en caso de cualquier tipo de fallo que impida la correcta operación de la función de iluminación / señalización.

3.1 Detección de fallos estáticamente mediante umbrales

Los sistemas actuales descritos se basan en el cálculo estático, durante el desarrollo del producto los umbrales inferior y superior de la caída de tensión a través de la rama de LED, considerando para ello el mejor y el peor caso, definiéndose los incrementos / decrementos de tensión por:

- Tensión menor y mayor nominal debido a la dispersión de la tensión en directo por fabricación del componente.
- Incremento de tensión menor y mayor por la menor y mayor corriente que se vaya a usar en la aplicación; considerando también la tolerancia de corriente.
- Incremento de la tensión menor y mayor por las temperaturas extremas de operación del sistema; considerando que el mayor incremento de la tensión en directo por temperatura se alcanzará a -40°C y el mayor decremento de la tensión en directo por temperatura se alcanzará a $+150^{\circ}\text{C}$.

Adicionalmente habrá que incluir también la caída de tensión en componentes auxiliares: conectores, cables, pistas, etc.

De esta forma, los umbrales superiores e inferiores se calculará como:

$$V_{fmax} = \sum_{i=0}^n V_{fimax} + \Delta V_{fi}(T_{min}) + \Delta V_{fi}(I_{max}) \quad (3.1)$$

$$V_{fmin} = \sum_{i=0}^n V_{fimin} + \Delta V_{fi}(T_{max}) + \Delta V_{fi}(I_{min}) \quad (3.2)$$

donde:

- V_{fmax} : Cálculo del umbral superior; calculado como la mayor tensión calculada para una rama de n LED a la corriente máxima de la aplicación (incluyendo tolerancias) y la temperatura mínima de la aplicación (peor caso).
- n : Es el número de LED en serie que componen la rama.
- $V_{fi_{max}}$: Tensión máxima para el LED i -ésimo. (Parte superior del bin de tensión considerado en la aplicación)
- $V_{fi}(T_{min})$: Incremento de la tensión para el LED i -ésimo a la temperatura mínima de la aplicación.
- $\Delta V_{fi}(I_{max})$: Incremento de la tensión para el LED i -ésimo a la mayor corriente de la aplicación.
- V_{fmin} : Cálculo del umbral inferior; calculado como la menor tensión calculada para una rama de n LED a la corriente mínima de la aplicación (incluyendo tolerancias y posible protección térmica) y la temperatura máxima de la aplicación (peor caso).
- $V_{fi_{min}}$: Tensión mínima para el LED i -ésimo. (Parte inferior del bin de tensión considerado en la aplicación)
- $V_{fi}(T_{max})$: Incremento de la tensión para el LED i -ésimo a la temperatura máxima de la aplicación.
- $\Delta V_{fi}(I_{min})$: Incremento de la tensión para el LED i -ésimo a la menor corriente de la aplicación.

Una vez calculados los umbrales de forma estática en la fase de desarrollo del producto, se programarán en el driver [84] y [85]; que los comparará durante la fase de operación del sistema, en el que dinámicamente se medirá la tensión en directa de la rama de LED (V_f en la ecuación) y se comprobará que cae dentro de los umbrales, de la forma: $V_{umbral_min} < V_f < V_{umbral_max}$.

3.2 Modelos alternativos propuestos

La gran desventaja que tiene al modelo de detección de fallo por umbrales es que es un modelo completamente estático sin capaz de cambiar los umbrales en función de la unidad concreta fabricada, la corriente real o la temperatura a la que esté operando el sistema en un momento dado.

Lo que se propondrá serán modelos dinámicos, uno basado en un modelo dinámico, donde el umbral de cortocircuito se calcule dinámicamente dependiendo de las condiciones de contorno.

3.2.1 Modelo matemático

Centrándose en el cálculo del umbral inferior que determina la detección de un LED en cortocircuito; como se ha visto anteriormente, la fórmula que determina el umbral inferior será [86]:

$$V_{fn} = V_{drop} + \sum_{i=0}^n V_{fi} + \Delta V_{fi}(T) + \Delta V_{fi}(I) \quad (3.3)$$

Si se centra cada uno de los térmicos que participan en la ecuación, se podrá encontrar cómo afecta a cada sistema:

- V_{fi} será la tensión específica de los LED que tenga un sistema concreto; dependerá del proceso de fabricación de los LED que hayan caído en este sistema concreto y se supone que su valor no cambiará con el tiempo (Salvo por el pequeño factor del envejecimiento), y será diferente entre unidades diferentes. Así pues este contribuidor puede ser medido para cada unidad y almacenado en memoria. Se propone hacerlo durante la fabricación del sistema de iluminación durante el EOL.
- $\Delta V_{fi}(T)$. Conociendo la temperatura (por ejemplo mediante un sensor térmico tipo NTC) en la que opere el sistema y el modelo de LED, puede trazarse la curva V/T y de esta forma calcular dinámicamente el cambio en la tensión de los LED por la temperatura. (Ver Figura 3.4 como ejemplo).
- $\Delta V_{fi}(I)$. Conociendo la corriente de polarización del sistema y el modelo de LED, puede trazarse la curva V/I y de esta forma calcular dinámicamente el cambio en la tensión de los LED por el cambio de la corriente; la corriente no sólo puede cambiar por el bin de flujo; también puede estar influenciado por la tolerancia del driver, temperatura de operación, aplicación de protección térmica, etc. (Ver Figura 3.3 como ejemplo).

El algoritmo que se propone aquí es calibrar la tensión en directa de la rama de LED, conociendo la temperatura y la corriente de calibración; después durante el tiempo de la aplicación se volverá a medir continuamente la tensión en directa de la rama de LED, adquiriendo también la corriente y la temperatura actual, comparándola con la tensión que devuelva el modelo matemático evaluado a la temperatura y corriente actual. Cuando la diferencia entre ambas tensiones; la calculada (esperada) y la medida, difieran un determinado valor, se considerará que existe un error. Esta diferencia debe de ser similar a la caída de tensión de un único LED. Aquí se considerará un factor δ inferior a uno, multiplicado por la mínima tensión en directo del LED considerado a la temperatura a la que esté operando el sistema. Matemáticamente:

$$\text{si } \frac{V_{fn_0} - V_{fn_{actual}}}{V_{fmin}} > \delta \rightarrow nOK \quad (3.4)$$

$$V_{calibrated} - V_{actual} + n\Delta V(T_{actual}) + n\Delta V(I_{actual}) - n\Delta V(T_{calibrated}) - n\Delta V(I_{calibrated}) > \delta V_{fmin} \quad (3.5)$$

El flujo de trabajo del algoritmo sería como puede verse en la Figura 3.2.

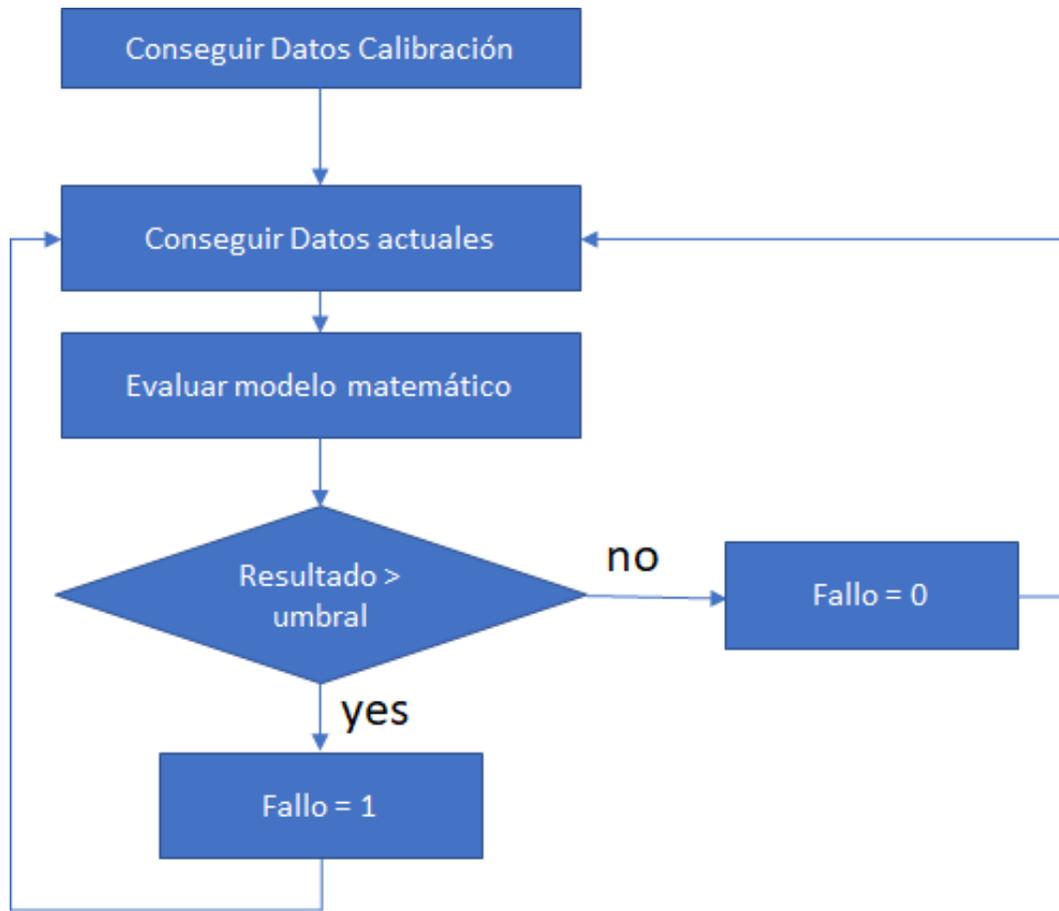


Figura 3.2: Diagrama de flujo del modelo matemático de detección de fallo en cortocircuito

3.2.2 Red Neuronal

Las redes neuronales, son modelos matemáticos inspirados en las redes neuronales biológicos, y que son buenas soluciones para clasificar sistemas; aquí se están clasificando los sistemas como correctos (cuando todos los LED funcionan) o incorrectos (cuando al menos un LED se haya cortocircuitado). [87], [88]

Las redes neuronales, inspirados en los modelos biológicos neuronales, cada elemento (neurona) está interconectada con la capa anterior, mediante la ecuación 3.6 [89]:

$$a = f \left(\sum_{i=1}^m w_i \cdot p_i + b \right) \quad (3.6)$$

donde:

- f es la función de activación.
- w_i es la función de pesos obtenida una vez entrenada la red.
- p_i es el valor de la neurona anterior.

- b es la función bias para la neurona actual.

El primer paso será definir las variables que van a usarse a la entrada de la Red Neuronal y la salida. Aquí se proponen usar como variables de entrada:

n : Número de LED de la rama a evaluar.

Corriente calibrada : Corriente medida durante la calibración del sistema.

Temperatura calibrada : Temperatura medida durante la calibración del sistema.

Voltaje calibrado : Voltaje medido durante la calibración del sistema.

Corriente actual : Corriente medida durante la operación del sistema en el momento actual.

Temperatura actual : Temperatura medida durante la operación del sistema en el momento actual.

Voltaje actual : Voltaje medido durante la operación del sistema en el momento actual.

De la misma forma la salida se propone que tenga valor 1 para un sistema correcto y un valor 0 para un sistema en estado de fallo (Al menos un LED cortocircuitado).

Una vez definido el modelo de Red Neuronal, será necesario construir un conjunto de datos, suficientemente grande para evaluar cualquier combinación que pueda encontrarse en la vida real. Este conjunto de datos podría obtenerse a partir de medidas de sistemas reales, o bien obtenidos mediante simulación con un modelo matemático, siguiendo las ecuaciones vistas en la sección anterior.

En este estudio puramente experimental, se propuso la segunda aproximación, generando el conjunto de datos como sigue:

n : Número de LED del sistema concreto.

Corriente calibrada : Se calcula la corriente máxima y mínima de la aplicación; para la gestión de los diferentes bins de flujo que puedan usarse. Posteriormente se aplicará una tolerancia de $\pm 5\%$ a los valores obtenidos, simulando posibles tolerancias de los drivers.

Temperatura calibrada : Calculada como un valor aleatorio en el rango $[20 / 30]^\circ \text{C}$. la T_j se calcula como:

$$T_j = [T_{calibrada}] + R_{th} \cdot P$$

Voltaje calibrado : Calculado como la suma de los $[n]$ LED contribuyentes de la rama; la V_f de cada LED se calcula como un valor aleatorio dentro del rango definido por el fabricante en el Datasheet entre los valores mínimos y máximos, a los que se le suman $\Delta V(T)$ y $\Delta V(I)$.

Corriente actual : Misma corriente que la calibrada, a la que se se aplica un factor de $\pm 10\%$ simulando posibles tolerancias del driver, junto con una reducción de la corriente, en caso de usar protección térmica por disminución de corriente.

Temperatura actual : Temperatura aleatoria en el rango $[-40 / 105]^\circ \text{C}$.

Voltaje actual : Si la evaluación en el conjunto de datos es correcta (70% de las ocurrencias), se calcula como la suma de los $[n]$ LED usados en el cálculo de [Voltaje calibrado] a los que se suman $\Delta V(T_{actual})$ y $\Delta V(I_{actual})$. En caso de que la evaluación sea en modo fallo (30% de las ocurrencias, se calcula como la suma de los $[n-1]$ LED.

La **salida** tendrá un valor de “1” un sistema correcto y de “0” para un sistema en modo fallo.

En un sistema real, durante la calibración durante el EOL se almacenarán los tres valores calibrados", y durante la operación del sistema, se medirán los valores actuales; introduciendo todos ellos en la Red Neuronal que devolverá el estado; idealmente valores cercanos a 1 para sistemas correctos y cercanos a 0 para sistemas en estado de fallo.

Para la implementación serie, los valores calibrados durante el EOL del producto podrán almacenarse en memoria no volátil (EEPROM) del sistema.

3.3 Validación experimental

3.3.1 Ejemplo de cálculo de umbrales

Experimentalmente, se puede poner como ejemplo uno de los LED que se usará para la evaluación del sistema: Nichia NCSW170DT [90]:

Valores nominales a corriente nominal y 25 °C:

Tabla 3.1: Dispersión tensión en directo LED NCSW170DT (Bin de tensión)

	Mínimo	Máximo	Unidades
Tensión en directo	2.75	3.55	V

De la misma forma, de la hoja de características se pueden extraer las curvas voltaje vs. corriente (Figura 3.3) a temperatura ambiente y voltaje vs. temperatura a corriente nominal (Figura 3.4):

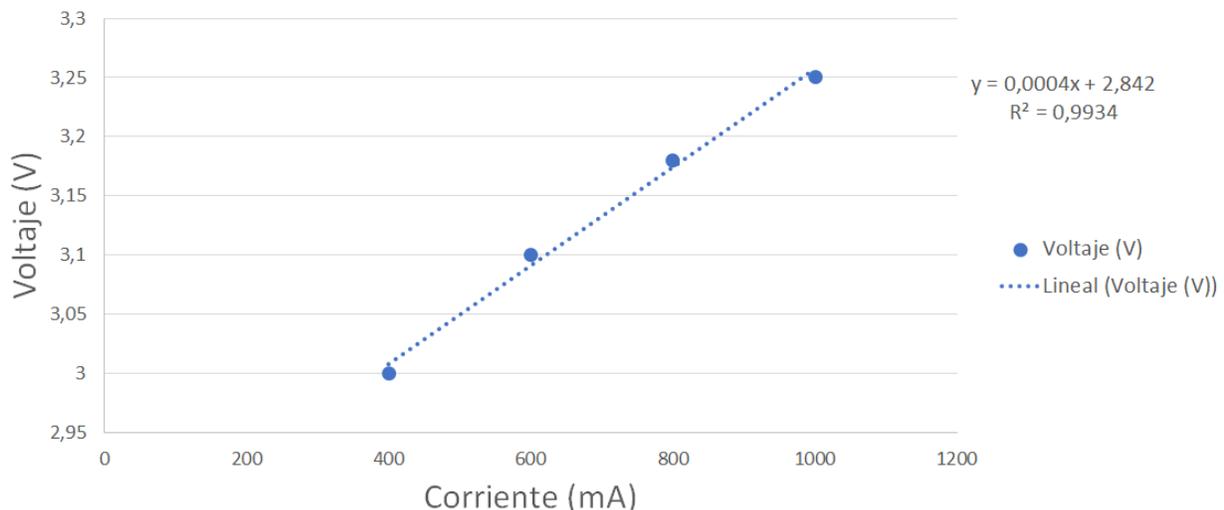


Figura 3.3: Curva tensión vs. corriente para Nichia NCSW170DT

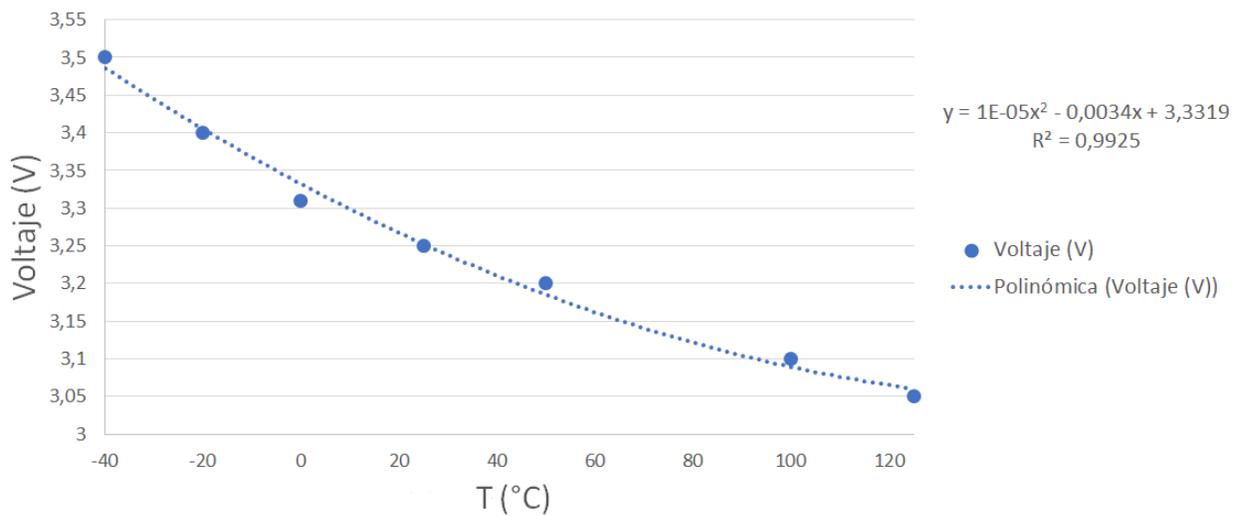


Figura 3.4: Curva corriente vs. temperatura para Nichia NCSW170DT

De esta forma, podrá calcularse para un LED individual los valores mínimos y máximos, considerando una aplicación que tendrá tres bins de flujo, uno polarizado a 950 mA, un segundo a 900 mA y un tercero a 850 mA, sin protección térmica y con un 5% de tolerancia, considerando, según los modelos vistos en 3.3 y 3.4:

- $\Delta -40^\circ \text{C}$: 0.25 V.
- $\Delta 125^\circ \text{C}$: -0.2 V.
- $\Delta 1000 \text{ mA}$: 0 V.
- $\Delta 800 \text{ mA}$: -0.07 V.
- Caída de tensión por los cableados y conectores: [50 - 70] mV

$$Vf_{min} = 2.75 - 0.2 - 0.07V \quad (3.7)$$

$$Vf_{min} = 2.48V \quad (3.8)$$

$$Vf_{max} = 3.55 + 0.25 + 0V \quad (3.9)$$

$$Vf_{min} = 3.8V \quad (3.10)$$

Se puede representar gráficamente los umbrales inferiores y superiores para diferente número de LED en serie:

Como puede verse gráficamente en la Figura 3.5, conforme aumenta el número de LED, aumenta también la distancia entre umbrales máximos y mínimos; si consideramos un número de LED $n = 15$,

Tabla 3.2: Umbrales estáticos para diferente número de LED NCSW170DT en serie

N. LED	Min Vf. (V)	Max Vf. (V)
1	2.48	3.8
2	4.96	7.6
3	7.44	11.4
4	9.92	15.2
5	12.4	19
6	14.88	22.8
7	17.36	26.6
8	19.84	30.4
9	22.32	34.2
10	24.8	38
11	27.28	41.8
12	29.76	45.6
13	32.24	49.4
14	34.72	53.2
15	37.2	57

la diferencia entre ambos umbrales es de 19.82 V; pudiendo esconder el fallo de hasta 7 LED en el peor de los casos.

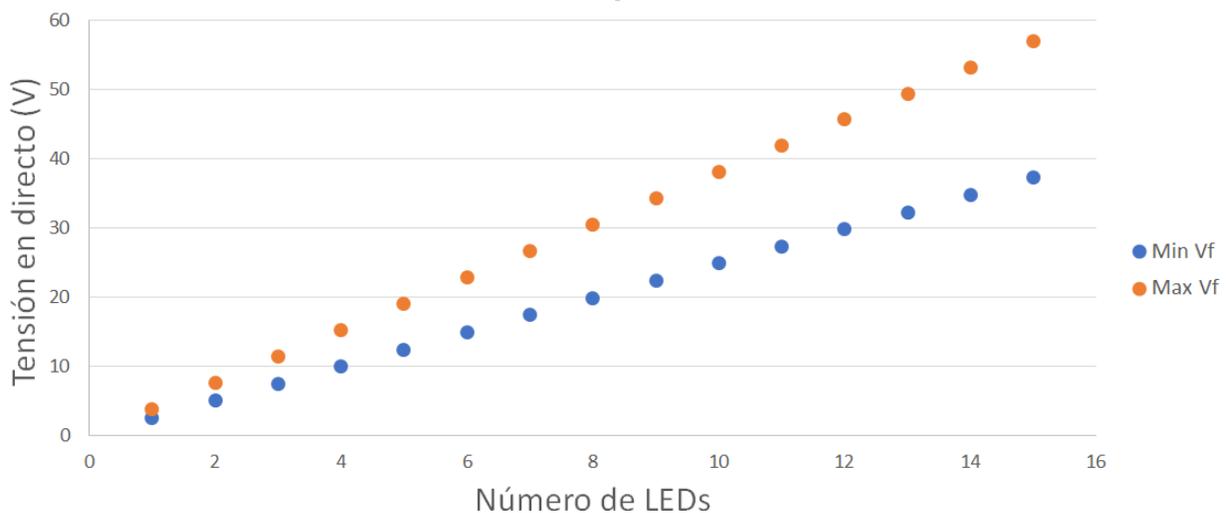


Figura 3.5: Umbrales máximos y mínimos para diferente número de LED NCSW170DT en serie

Es decir, midiendo umbrales, habrá sistemas diseñados con 15 LED y necesitarán que fallen hasta 7 LED en cortocircuito (en un peor caso) para que la tensión medida sea inferior al umbral mínimo y el sistema pueda reconocer el fallo para poder notificarlo; esto hace que el fallo de un único LED en cortocircuito sea muy difícil de poder ser detectado mediante el cálculo de comparación de umbrales. [91]

3.3.2 Ejemplos numéricos

Puede simularse un sistema de la siguiente forma: 10 LED Nichia NCSW170DT, caracterizados como:

- Temperatura de calibración: $25^{\circ}C$.
 $\Delta V_f(T) = 0.00315V$
- Corriente: 850 mA: $\Delta V(I) = -0.068V$.
- $V_{actual} = 33.35V$.

Posteriormente, durante la operación del sistema se evaluó de la siguiente forma (sin fallo):

- Temperatura: $-35^{\circ}C$. $\Delta V_f(T) = 0.21315V$.
- Corriente: 845 mA: $\Delta V(I) = -0.07V$.
- $V_{actual} = 35.45V$.

Aplicando la ecuación 3.5: $33.35 - 35.45 + 10 \cdot 0.21315 + 10 \cdot (-0.07) - 10 \cdot 0.00315 - 10 \cdot (-0.068) = -0.02V$

En una segunda evaluación, con fallo, se midió:

- Temperatura: $-35^{\circ}C$. $\Delta V_f(T) = 0.21315V$.
- Corriente: 845 mA: $\Delta V(I) = -0.07V$.
- $V_{calibrated} = 32.3V$.

Aplicando la ecuación 3.5 a la evaluación en modo fallo: $33.35 - 32.3 + 10 \cdot 0.21315 + 10 \cdot (-0.07) - 10 \cdot 0.00315 - 10 \cdot (-0.068) = 3.13V$

A 845 mA, la tensión mínima V_f para este LED será:

- Temperatura: $-35^{\circ}C$. $\Delta V_f(T) = 0.21315V$.
- Corriente: 845 mA: $\Delta V(I) = -0.07V$.
- $V_{f_{min}} = 2.75V$.
- La tensión mínima absoluta será de 2.893 V.

Se puede comprobar que el valor δ para este ejemplo debería ser inferior a $2.893V/3.13V = 0.924$

Por contra, aplicando la ecuación 3.5 a la evaluación en modo correcto: $33.35 - 35.45 + 10 \cdot 0.21315 + 10 \cdot (-0.07) - 10 \cdot 0.00315 - 10 \cdot (-0.068) = -0.632V$

3.3.3 Modelos evaluados

Se propone la evaluación de ambos modelos (modelo matemático y modelo usando una red neuronal) de detección de fallo en diferentes combinaciones de número de LED y corriente para comprobar su correcto comportamiento:

- Un sistema con 12 LED blancos polarizados a 150 mA.

- Un sistema con 6 LED blancos polarizados a 150 mA.
- Un sistema con 7 LED blancos polarizados a 750 mA.

Los LED usados han sido Nichia NCSW170DT (Nichia Coprotation, Tokushima, Japón) y Cree AHG (Cree Inc, Durham, Estados Unidos).

Junto a un driver externo para generar la potencia necesaria para polarizar la carga, se usó un Arduino Micro (Arduino, Somerville, Estados Unidos) con un microcontrolador ATmega32U4 (Microchip Technology Inc. Chandler, Estados Unidos), donde se implementarán ambos métodos.

Una NTC, modelo NCP108X103xSRB (Murata Manufacturing Co. Ltd., Nagaokakyo, Tokyo), se usaba para caracterizar la temperatura del sistema. Una resistencia en serie con los LED se utilizaba para medir la corriente que circulaba por la carga; así como un divisor de tensión en paralelo para medir la tensión en la rama completa de los LED.

Un relé, gestionado por una salida digital del Arduino se encargaba de simular un LED cortocircuitado. En la Figura 3.6 puede verse el circuito propuesto para la evaluación de los algoritmos propuestos.

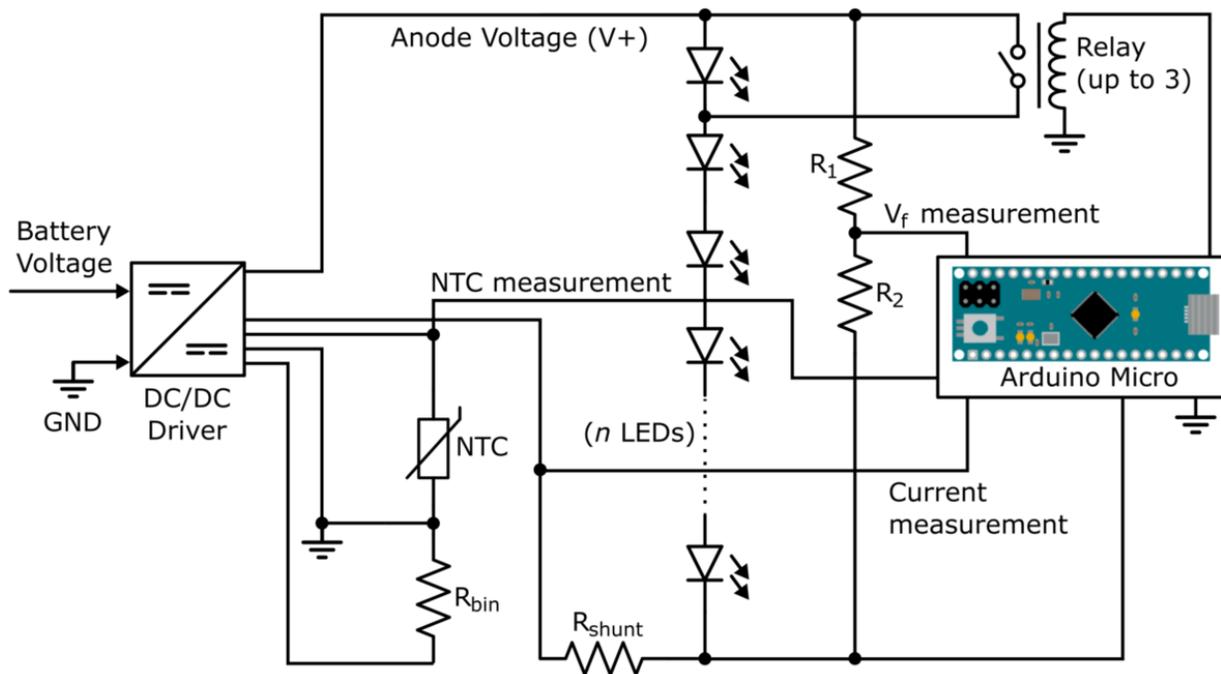


Figura 3.6: Circuito propuesto para evaluar la detección de LED en cortocircuito

Una cámara climática modelo CTS T 70/600 (CTS GmbH, Kall, Alemania), capaz de generar temperaturas entre -70°C y 180°C , para evaluar el comportamiento del sistema en un rango de temperatura de automoción; se propone hacer un ciclo térmico entre -40°C y 105°C , para la evaluación del sistema.

3.3.4 Red Neuronal

Una vez definida la capa de entrada de la Red Neuronal y la de salida, queda pendiente definir las capas ocultas (internas) de la Red Neuronal. Se propone que a partir del conjunto de datos, dividirlo en dos partes; aleatoriamente un 70 % se utilizará para entrenar la Red Neuronal y un 30 % para evaluarla de forma independiente; el objetivo será maximizar la tasa de aciertos a partir del subconjunto de entrenamiento.

Se proponen las topologías con una y dos capas ocultas, y diferente número de nodos en cada una de ella. Para construir la Red Neuronal, cargar los datos y entrenarla, se usó un script en Python. En la Tabla 3.3 pueden verse los valores obtenidos, con diferentes configuraciones de redes neuronales (señalando el número de capas en la primera columna), así como la configuración utilizada; siendo 7 siempre el número de nodos en la capa de entrada y uno el número de nodos de la salida; el número de nodos de las capas ocultas internas viene señalado en la correspondiente columna.

Tabla 3.3: Evaluación de diferentes Redes Neuronales

Capas	Configuración	Training Set Fit	Evaluation set fit	Mult.	Sumas	Capas	Configuración	Training Set Fit	Evaluation set fit	Mult.	Sumas
2	7-1	7.03	0.0089	7	1	4	7-4-6-1	0.0208	0.0122	53	11
3	7-1-1	0.0269	0.0088	8	2	4	7-4-7-1	0.0408	0.0109	57	12
3	7-2-1	0.0091	0.0075	16	3	4	7-4-8-1	0.0098	0.0076	61	13
3	7-3-1	0.0084	0.0075	24	4	4	7-4-9-1	0.0196	0.0076	65	14
3	7-4-1	0.0473	0.01	32	5	4	7-5-1-1	0.0481	0.0119	41	7
3	7-5-1	0.0438	0.0091	40	6	4	7-5-2-1	0.0289	0.0093	46	8
3	7-6-1	0.0158	0.0096	48	7	4	7-5-3-1	0.0109	0.008	51	9
3	7-7-1	0.0378	0.0096	56	8	4	7-5-4-1	0.0095	0.0075	56	10
3	7-8-1	0.026	0.0079	64	9	4	7-5-5-1	0.0419	0.009	61	11
3	7-9-1	0.0086	0.0074	72	10	4	7-5-6-1	0.0379	0.0137	66	12
4	7-1-1-1	0.0083	0.0075	9	3	4	7-5-7-1	0.0264	0.0072	71	13
4	7-2-1-1	0.0215	0.0091	17	4	4	7-5-8-1	0.0636	0.0134	76	14
4	7-3-1-1	0.0244	0.0099	25	5	4	7-5-9-1	0.0205	0.0095	81	15
4	7-4-1-1	0.0233	0.0108	33	6	4	7-6-1-1	0.0387	0.0089	49	8
4	7-5-1-1	0.0086	0.0075	41	7	4	7-6-2-1	0.0229	0.0098	55	9
4	7-6-1-1	0.0155	0.009	49	8	4	7-6-3-1	0.0497	0.0078	61	10
4	7-7-1-1	0.0419	0.0096	58	9	4	7-6-4-1	0.0462	0.0124	67	11
4	7-8-1-1	0.0142	0.0088	64	10	4	7-6-5-1	0.0489	0.0108	73	12
4	7-9-1-1	0.0092	0.0082	73	11	4	7-6-6-1	0.0325	0.01	79	13
4	7-1-2-1	0.01	0.0078	11	4	4	7-6-7-1	0.0201	0.0082	85	14
4	7-1-3-1	0.0086	0.0078	13	5	4	7-6-8-1	0.0323	0.0129	91	15
4	7-1-4-1	0.0104	0.008	15	6	4	7-6-9-1	0.0187	0.0075	97	16
4	7-1-5-1	0.0076	0.0071	17	7	4	7-7-1-1	0.0221	0.0081	57	9
4	7-1-6-1	0.0079	0.0074	19	8	4	7-7-2-1	0.0096	0.0084	65	10
4	7-1-7-1	0.0084	0.0074	21	9	4	7-7-3-1	0.0503	0.0116	73	11
4	7-1-8-1	0.0078	0.0072	23	10	4	7-7-4-1	0.0116	0.0076	81	12
4	7-1-9-1	0.0284	0.0108	25	11	4	7-7-5-1	0.0105	0.0071	89	13
4	7-2-1-1	0.0079	0.0073	17	4	4	7-7-6-1	0.0388	0.0139	97	14
4	7-2-2-1	0.0185	0.0086	20	5	4	7-7-7-1	0.0546	0.0136	105	15
4	7-2-3-1	0.0147	0.0079	23	6	4	7-7-8-1	0.0296	0.0075	113	16
4	7-2-4-1	0.0144	0.0075	26	7	4	7-7-9-1	0.0424	0.0168	121	17
4	7-2-5-1	0.0644	0.0233	29	8	4	7-8-1-1	0.0117	0.0095	65	10
4	7-2-6-1	0.0105	0.0076	32	9	4	7-8-2-1	0.0261	0.0075	74	11
4	7-2-7-1	0.0098	0.0078	35	10	4	7-8-3-1	0.0088	0.0071	83	12
4	7-2-8-1	0.0291	0.0101	38	11	4	7-8-4-1	0.0314	0.0097	92	13
4	7-2-9-1	0.0338	0.0096	41	12	4	7-8-5-1	0.017	0.0094	101	14
4	7-3-1-1	0.0091	0.0078	25	5	4	7-8-6-1	0.0219	0.0079	110	15
4	7-3-2-1	0.0306	0.0101	29	6	4	7-8-7-1	0.0227	0.0078	119	16
4	7-3-3-1	0.0302	0.012	33	7	4	7-8-8-1	0.0387	0.0109	128	17
4	7-3-4-1	0.0333	0.0152	37	8	4	7-8-9-1	0.0202	0.0097	137	18
4	7-3-5-1	0.0277	0.0083	41	9	4	7-9-1-1	0.0291	0.0097	73	11
4	7-3-6-1	0.0122	0.0091	45	10	4	7-9-2-1	0.0492	0.0105	84	12
4	7-3-7-1	0.0086	0.0075	49	11	4	7-9-3-1	0.1084	0.0147	93	13
4	7-3-8-1	0.0083	0.0071	53	12	4	7-9-4-1	0.0496	0.0134	103	14
4	7-3-9-1	0.0399	0.0093	57	13	4	7-9-5-1	0.0283	0.0116	113	15
4	7-4-1-1	0.0248	0.0073	33	6	4	7-9-6-1	0.0339	0.0176	126	16
4	7-4-2-1	0.0209	0.0081	37	7	4	7-9-7-1	0.0411	0.0104	133	17
4	7-4-3-1	0.0256	0.0097	41	8	4	7-9-8-1	0.0191	0.0078	143	18
4	7-4-4-1	0.0316	0.0114	45	9	4	7-9-9-1	0.0403	0.0131	153	19
4	7-4-5-1	0.0102	0.009	49	10						

Gráficamente, puede comprobarse en la Figura 3.7; la que mejor resultados proporcionó y la que se utilizó para evaluar el método propuesto fue la configura 7-5-3-1; correspondiente con la representada en la Figura 3.8; la función a minimizar fue “mean_squared_error”, otros parámetros usados en la configuración de la red fueron “enteramente interconectada” y la función de activación “sigmoide”. El conjunto de entrenamiento estaba formado por 20000 evaluaciones aleatorias siguiendo el método definido anteriormente. El conjunto de entrenamiento estaba formado por el 70 % de los datos y el de ensayo por el 30 % restante.

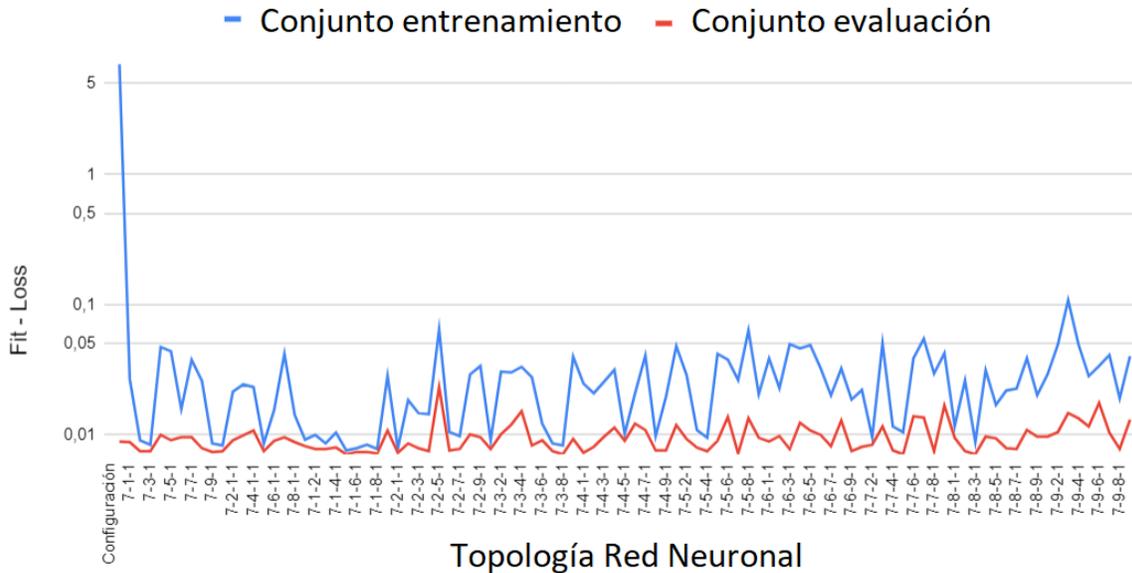


Figura 3.7: Evaluación de diferentes configuraciones de RRNN

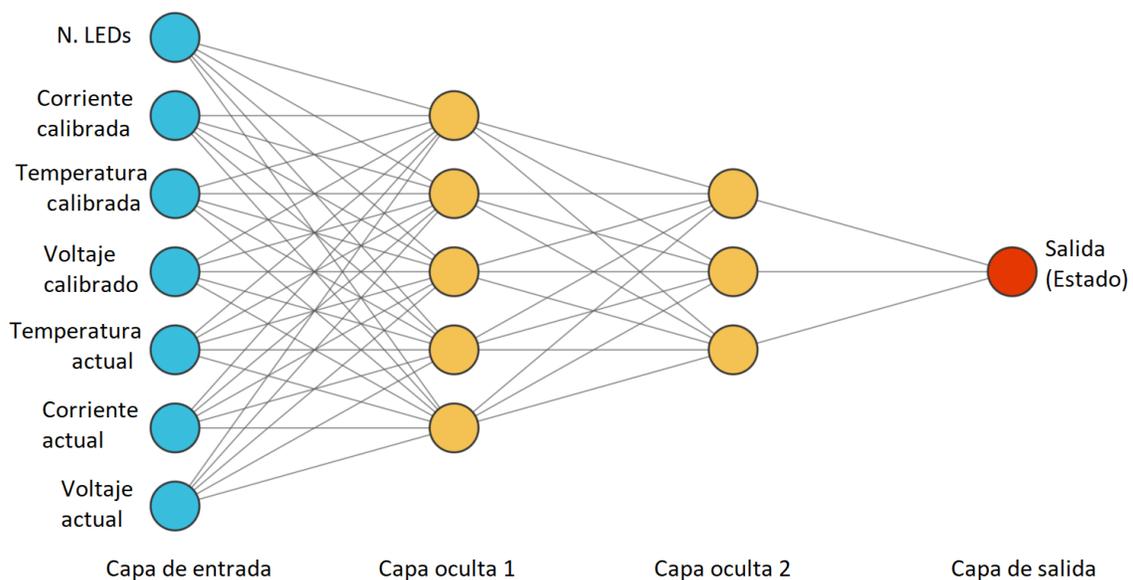


Figura 3.8: Configuración final de la RRNN utilizada

La salida de la Red Neuronal es un valor continuo; centrado en 0 y en 1; se propone definir un valor δ para determinar el umbral de la consideración de “fallo” o funcionamiento correcto.

Una vez definida la Red Neuronal para cada configuración a evaluar se introduce en el código a ejecutar de Arduino los valores de la misma, para proceder a su evaluación de forma continua.

3.3.5 Diagrama de flujo

Se implementó un software, que seguía el flujo de trabajo que puede verse en la Figura 3.9. El propósito de este software era únicamente la evaluación del algoritmo de detección de fallo; por lo que el resto de tareas que típicamente ejecutaría un driver de iluminación no se recogen aquí.

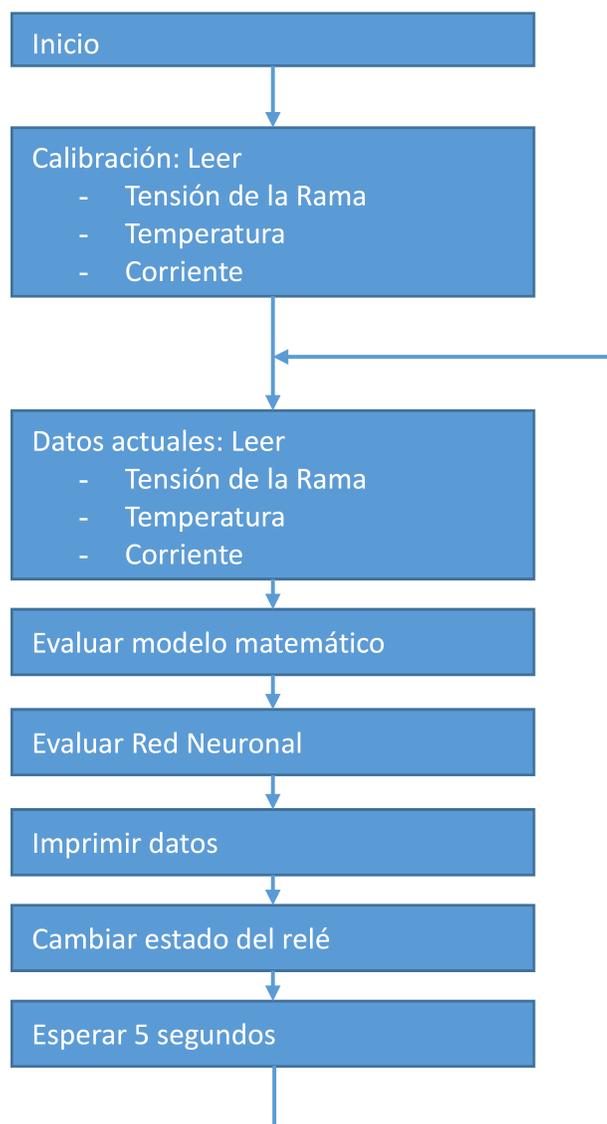


Figura 3.9: Flujo de control utilizado para la evaluación del modelo

La fase de calibración debe hacerse a condiciones nominales, tal y como se ha visto con anterioridad; en torno a 25 ° C; para después pasar a la evaluación continua mientras se aplica un ciclo térmico que cambia de -40° C a 105°C en 8 horas; con un cambio aproximado de 0.3°C por minuto; el sistema Arduino se dejó fuera de la cámara al no ser un componente de automoción.

Cada evaluación se hacía cada 5 segundos, así pues dentro de las 8 horas del ciclo térmico se evaluaría unas 5760 veces. Así pues el bucle para comprobar los fallos se hará:

- Adquisición de los parámetros.
- Evaluar el modelo matemático.
- Evaluar la Red Neuronal.
- Mostrar los resultados.
- Un relé es capaz de cortocircuitar un LED al estar conectado en paralelo o no; de esta forma es posible evaluar el sistema en modo fallo (el relé activado cortocircuita su LED en paralelo con una caída de tensión cercana a 0), o el modo correcto (el relé desactivado, deja que la corriente fluya por el LED); una salida digital irá alternando los dos estados.
- Se esperan 5 segundos antes de volver a hacer una nueva evaluación.

El driver utilizado en los ensayos implementaba una protección térmica aplicando una señal PWM y se usaron tres sistemas diferentes para poder evaluar posibles variaciones entre sistemas. Gráficamente, en la Figura 3.9 puede verse el flujo de control propuesto.

En la Figura 3.10 puede verse el sistema en operación dentro de la cámara climática.

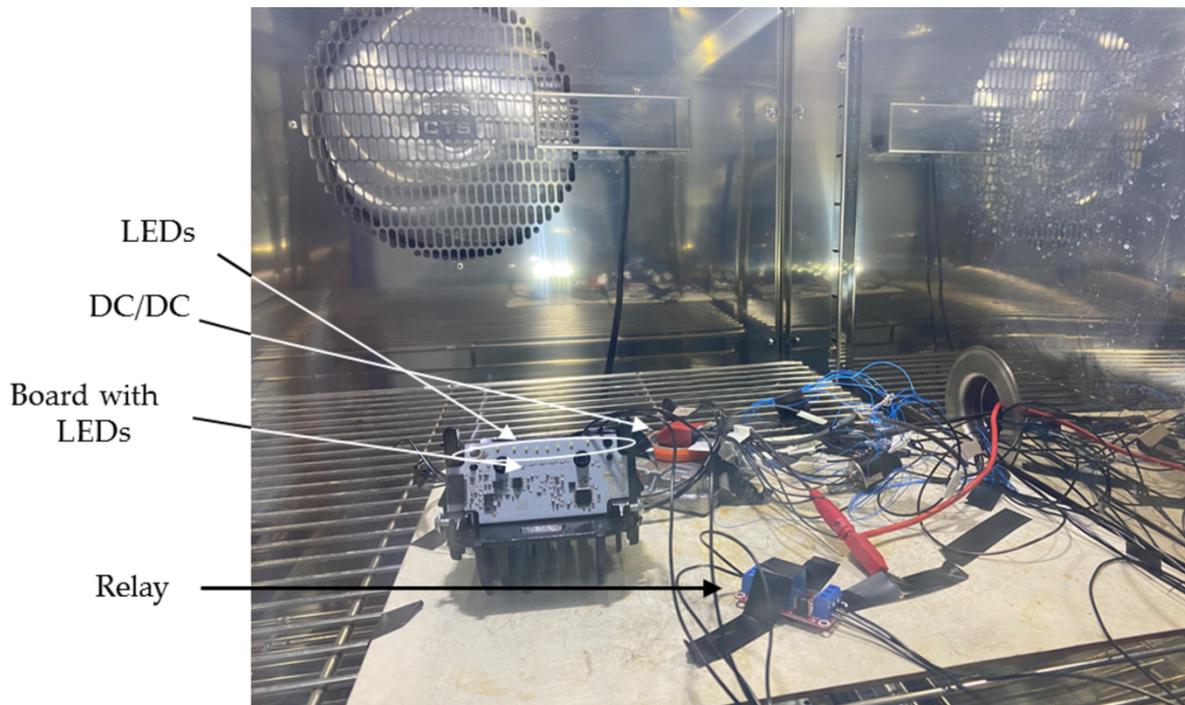


Figura 3.10: Evaluación experimental del sistema en la cámara climática

3.4 Resultados

En un principio se evaluará la detección del fallo de un único LED en cortocircuito; comenzando con un valor de δ de 0.5 para ambos métodos.

En la Tabla 3.4, se comprobará la correcta detección de los sistemas correctos: tan importante como la correcta detección de un fallo en cortocircuito es el hecho de no reportar un fallo inexistente, que pueda llevar a generar molestias al usuario final del vehículo con falsos fallos que no existen.

Se estudió el valor óptimo para el parámetro σ , mostrándose los resultados en la Tabla 3.4, tanto para sistemas correctos, como para sistemas con un fallo (1 LED en cortocircuito):

Tabla 3.4: Resultados con un LED en cortocircuito

Modelo	Modo	Umbrales	Modelo matemático			Red Neuronal		
			$\delta = 0.35$	$\delta = 0.5$	$\delta = 0.75$	$\delta = 0.35$	$\delta = 0.5$	$\delta = 0.75$
6 LED #1	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	99 %	100 %	100 %
6 LED #2	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	94 %	100 %	100 %
6 LED #3	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	88 %	100 %	100 %
12 LED #1	OK	100 %	98.7 %	100 %	100 %	100 %	100 %	71.4 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	99.2 %	99.3 %	100 %	100 %
12 LED #2	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	99.5 %	99.1 %	100 %	100 %
12 LED #3	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	96.2 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	88 %	100 %	100 %
7 LED #1	OK	100 %	98.7 %	100 %	100 %	100 %	100 %	83 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	99.3 %	100 %	100 %
7 LED #2	OK	100 %	98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	97.7 %	100 %	100 %
7 LED #3	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	53 %
	NOK	0 %	100 %	100 %	100 %	88 %	100 %	100 %

Tomando de base el sistema con 12 LED, se propone a continuación hacer un estudio más en detalle, modificando el sistema para la detección de 1, 2 ó 3 LED; para ello se añadieron dos relés más en el ensayo, conectados a sendas salidas digitales, y se entrenaron Redes Neuronales de diferentes formas:

- Red Neuronal entrenada con un único fallo. (Red 1).
- Red Neuronal entrenada con varios fallos (Red 2):
 - 1: OK. No LED cortocircuitados.
 - 0: 1, 2 ó 3 LED cortocircuitado.
- Red Neuronal entrenada con varios fallos (Red 3):
 - 1: OK. No LED cortocircuitados
 - 0: 1 LED cortocircuitado.
 - -1: 2 LED cortocircuitados.
 - -2: 3 LED cortocircuitados.

En la Tabla 3.5 pueden verse los resultado experimentales obtenidos utilizando cada una de las redes neuronales previamente especificadas.

Tabla 3.5: Resultados con un LED en cortocircuito en sistemas con 12 LED

Modelo	Modo	Umbrales	Modelo matemático			Red Neuronal		
			$\delta = 0.35$	$\delta = 0.5$	$\delta = 0.75$	$\delta = 0.35$	$\delta = 0.5$	$\delta = 0.75$
12 LED #1	OK	100 %	98.7 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 98.8 %	Red 1: 71.4 % Red 2: 8 % Red 3: 55.5 %
	NOK: 1 F	0 %	100 %	100 %	99.2 %	Red 1: 99.3 % Red 2: 0.1 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 99.5 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 2 F	83 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 3 F	100 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
12 LED #2	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 71.4 % Red 2: 99.6 % Red 3: 100 %
	NOK: 1 F	0 %	100 %	100 %	99.5 %	Red 1: 99.1 % Red 2: 0 % Red 3: 99.6 %	Red 1: 100 % Red 2: 99.6 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 2 F	96 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 3 F	100 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
12 LED #3	OK	100 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 96.2 % Red 2: 15 % Red 3: 81 %
	NOK: 1 F	0 %	100 %	100 %	99.5 %	Red 1: 100 % Red 2: 0 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 2 F	66 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %
	NOK: 3 F	100 %	100 %	100 %	100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %	Red 1: 100 % Red 2: 100 % Red 3: 100 %

Una vez la evaluación de la Red Neuronal devuelva su valor, puede aplicarse el siguiente criterio para estimar el número de LED que han fallado:

- $0.5 < x < 2$: El sistema se considera correcto.
- $-1 < x < 0$: Se considera un LED cortocircuitado.
- $-2 < x < -1$: Se consideran dos LED cortocircuitados.
- $-3 < x < -2$: Se consideran tres LED cortocircuitados.

De entre todas las redes consideradas,

- Red Neuronal entrenada con un único fallo. (Red 1).
- Red Neuronal entrenada con varios fallos (Red 2), con salida 1/0.
- Red Neuronal entrenada con varios fallos (Red 3), con salida 1/0/-1/-2.

fue la Red 3 la que obtuvo mejores resultados, como puede verse en la Tabla 3.6

Tabla 3.6: Tasa de aciertos para sistemas con varios fallos

Número de LED en fallo	0	1	2	3
Rango de salida de la Red Neuronal	[0.5 / 2]	[-1 / 0.5]	[-2 / -1]	[-3 / -2]
Sistema #1	98.84 %	100 %	99.8 %	98 %
Sistema #2	100 %	100 %	100 %	100 %
Sistema #3	100 %	100 %	100 %	100 %

En la Figura 3.11 puede verse las medidas experimentales de un sistema con 12 LED durante el ensayo; desde la menor temperatura a -40°C hasta la máxima temperatura de 105°C ; pudiendo ver la tensión del sistema con los 12 LED funcionando y con un LED simulando un fallo en cortocircuito. Como puede verse en ningún punto se llega a alcanzar el umbral inferior para diagnosticar un fallo.

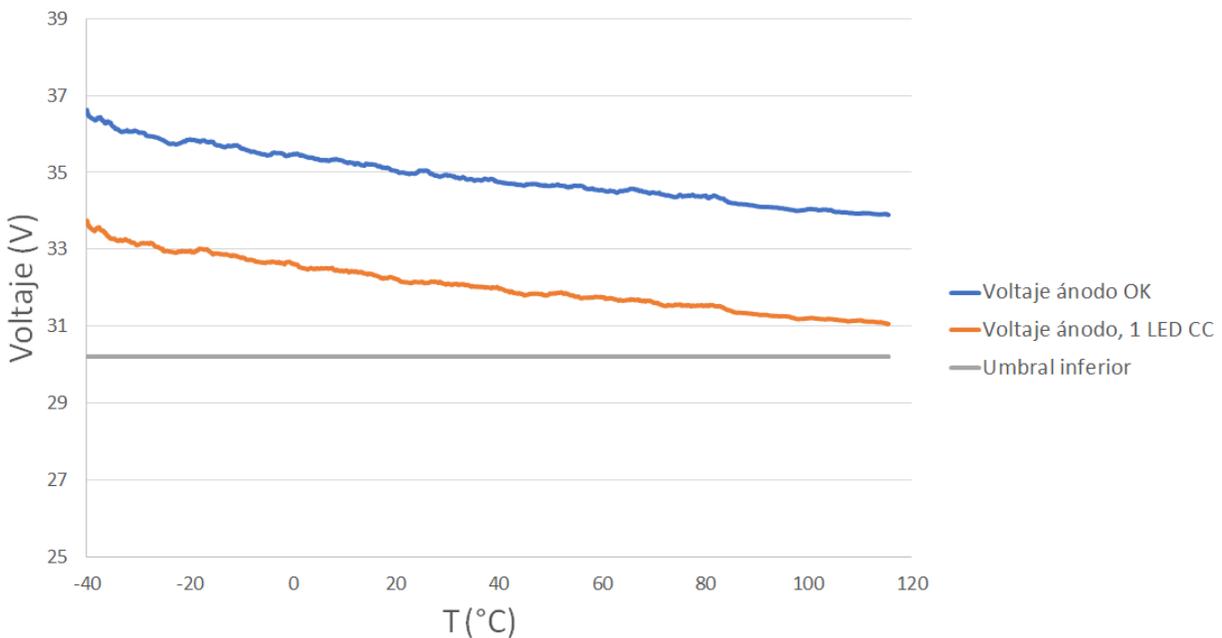


Figura 3.11: Medidas experimentales de un sistema con 12 LED

En la Figura 3.12 puede verse el offset (La diferencia entre la tensión predicha y la medida) del modelo matemático entre un sistema OK, y un sistema con un LED cortocircuitado; como puede verse tiene una dependencia con la temperatura. Claramente hay una gran diferencia entre el offset del sistema OK, que está en torno a 0 V, como el offset del sistema NOK con 1 LED en cortocircuito, centrado en torno a 3 V; coincidiendo con la tensión en directa de un LED.

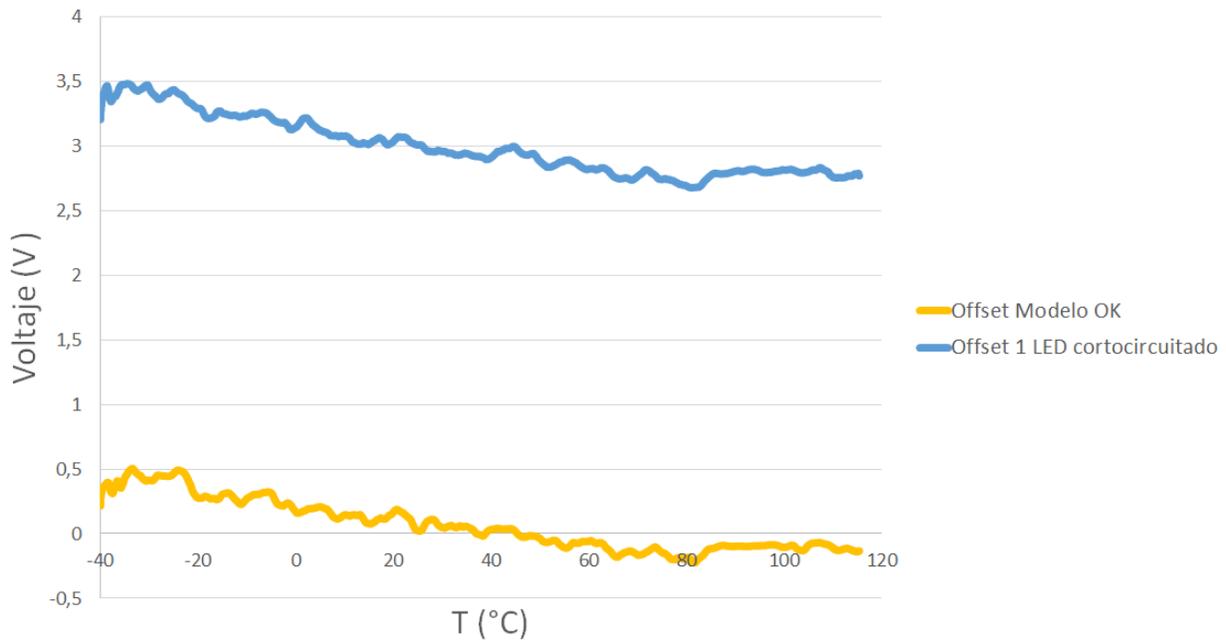


Figura 3.12: Medidas experimentales y calibradas de un sistema con 12 LED. La línea amarilla para sistemas OK está en torno a 0; la línea azul está en torno a la tensión en directo de un LED blanco

3.4.1 Esfuerzo computacional

Finalmente cabe destacar que la evaluación de los métodos propuestos suponen una carga computacional adicional a los recursos de los que disponga el Driver LED. Es importante evaluar la carga computacional que se añadirá a los recursos disponible de los sistemas.

Capacidad de procesamiento

Si se tienen en cuenta las operaciones matemáticas necesarias para cada método, puede resumirse en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Esfuerzo computacional de cada método

Operaciones	Método umbrales	Modelo matemático	Evaluación red neuronal
Suma de enteros	0	0	315
Multiplicaciones de enteros	0	0	105
Sumas en coma flotante	0	16	105
Multiplicaciones en coma flotante	0	27	105
Comparaciones en coma flotante	1	1	1

Se procedió también a medir el tiempo de ejecución de cada método; en el sistema descrito anteriormente, un Arduino equipado con un microcontrolador ATmega32U4 (Microchip Technology Inc, Arizona, Estados Unidos) (16 MIPS 16 MHz), obteniéndose los datos de la siguiente tabla:

Si consideramos una evaluación del proceso “detección de cortocircuito” cada 100 ms., obtendremos una sobrecarga del software que puede comprobarse en la Tabla 3.8. Como puede comprobarse los

métodos propuestos suponen una mayor carga computacional frente a la comparación los umbrales de los métodos actuales.

Una ejecución cada 100 ms, con su correspondiente algoritmo de filtrado de posibles errores espúreos, permitiría hasta 5 evaluaciones, dentro de un tiempo de respuesta de 500 milisegundos, valor más crítico solicitado en la norma [45].

Tabla 3.8: Estimación de recursos computacionales (Tiempo de ejecución y sobrecarga)

	Método umbrales	Modelo matemático	Evaluación red neuronal
Tiempo de ejecución (μ s.)	10	400	1500
Sobrecarga cada 100 ms.	0.01 %	0.4 %	1.5 %

De la misma forma, los métodos propuestos tendrán mayor necesidad de almacenamiento, tanto de los datos de las constantes de los modelos matemáticos o de las constantes de la Red Neuronal seleccionada, como del código necesario para la implementación de los algoritmos propuestos. En la Tabla 3.9 puede verse una estimación de la memoria necesaria para cada uno de estos campos

Tabla 3.9: Estimación de recursos computacionales (memoria)

	Método umbrales	Modelo matemático	Evaluación Red Neuronal
Código (EEPROM) (bytes)	62	1100	2500
Constantes (bytes)	8	72	504

3.5 Conclusiones

Como ha podido comprobarse una mejora substancial del actual estado del arte de los mecanismos disponibles en los sistemas de iluminación para automoción para la detección de un LED en cortocircuito puede hacerse sin un gran esfuerzo.

Por un lado el hardware actual, que ya incluyen una NTC para conocer la temperatura aproximada de operación de los LED, junto con la monitorización de la corriente y la tensión de una rama de los LED pueden utilizarse para mejorar los sistemas de detección de fallo. Tan sólo modificando el proceso de fabricación y calibración de los sistemas de iluminación para almacenar algunos datos durante la fabricación del sistema permitirán que añadiendo una pequeña modificación del software, pueda disponerse de más información sobre el estado de la función, si los LED funcionan correctamente o si alguno ha fallado tanto en corto circuito como en circuito abierto, mejorando tanto la seguridad como la información disponible para el usuario final.

Capítulo 4

Conclusiones y Méritos

4.1 Conclusiones

Como ha podido comprobarse en el presente trabajo, con la aparición de las nuevas tecnologías de iluminación LED y OLED que han llegado a una industria tan dinámica como la de la automoción, abre un inmenso campo de investigación para posibles mejoras, que incrementen sus prestaciones y fiabilidad, sin caer en sobre ingeniería ni en grandes costes.

La correcta modelización matemática de los componentes en estudio, y el uso de componentes con comportamientos análogos al de los LEDs, en este caso los termistores - NTC - son los que permiten un mejor control de los mismos.

Como ha podido verse en el capítulo 2; con la correcta modelización de la dependencia térmica de los LED, para su flujo y su tensión, permite que la electrónica sea capaz de generar la corriente necesaria para obtener el flujo objetivo, o la tensión necesaria para mantener una potencia optimizada de tal forma que el consumo energético y los sistemas térmicos puedan ajustarse más. A día de hoy la llegada del coche eléctrico, y la necesidad de la reducción de las emisiones de CO₂ hacen más importante que nunca la optimización del consumo energético de todos los componentes del vehículo. Además es interesante ver cómo son soluciones que pueden aplicarse directamente sobre el diseño hardware del sistema, sin tener que introducir nuevos sistemas complejos como microcontroladores ejecutando software.

Es importante considerar que las curvas de compensación dependerá del modelo concreto del LED, y de su tecnología, que se quiera compensar, de ahí la importancia del correcto modelo matemático que subyace y sobre el que se trabaja. También es importante considerar que los resultados que se muestran pueden ser modificados en un diseño específico en caso de que la compensación quiera ser de mayor o menor grado, dependiendo de las condiciones específicas de cada sistema.

El trabajo presentado en el capítulo 3, mejora la detección de fallos en sistemas de iluminación, también mediante una correcta modelización matemática del LED, para conocer su tensión esperada a partir de la monitorización de la temperatura y la corriente, comparándola con el valor real. Esto supone una gran mejora frente al estado del arte donde el valor medido se compara con unos umbrales estáticos que tienen que cubrir los peores casos calculados para toda la producción del elemento.

Además el modelo matemático puede evaluarse mediante una forma tradicional - con las ecuaciones correspondientes - así como con una forma alternativa, usando herramientas de inteligencia artificial como las redes neuronales, las cuales podrían permitir la incorporación de más parámetros y incorporar posible información no recogidas en las hojas de características de los fabricantes; puesto que incorporaría un posible proceso de aprendizaje. Supone un gran avance en la detección de fallos y por tanto del aumento de la seguridad de los sistemas de iluminación, y su interacción con el ambiente, de especial importancia para los vehículos autónomos.

4.2 Artículos

- LED biasing scheme with thermal compensation for automotive industry applications. Autores: J.R. Martínez Pérez, A. Martínez-Olmos, J.J. Santaella, P. Escobedo, N. López-Ruiz, M.A. Carvajal Revista: Results in Engineering. Volume 21, March 2024, 101699 (Q1) <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101699> [92].
- Advanced Detection of Failed LEDs in Short-Circuit for Automotive Lighting Applications: Autores: J.R. Martínez Pérez, Miguel A. Carvajal, J.J. Santaella, Nuria López-Ruiz, Pablo Escobedo, Antonio Martínez-Olmos. Revista: Sensors 2024 24(9) 2802 (Q2) <https://doi.org/10.3390/s24092802> [93].

En preparación: “Dynamic thermal voltage adaptation for LED branches – DC/DC thermal compensated for automotive industry applications”.

4.3 Patentes

- Patente, **EP3691414A1**, “Automotive lighting device and method.”. Fecha de publicación: 5/8/2020. Aplicante: Valeo Iluminación SA. Inventores: Martínez-Perez, José Ramón; Santaella, Juan-José; López, José-Luis. Estado: Publicada. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/065529601/publication/EP3691414A1?q=EP3691414A1> [94].
- Patente, **EP23382613**, “Lighting circuit for an automotive lighting device producing a constant level of luminous flux”. Aplicante: Valeo Iluminación SA y Universidad de Granada. Inventores: Martínez-Perez, José Ramón; Santaella, Juan-José; Carvajal, Miguel; Martínez-Olmos, Antonio. Estado: “filed”.

4.4 Próximos trabajos

- Estudio y caracterización de LEDs fuera de condiciones nominales - Fuera de las condiciones dadas por los fabricantes en las hojas de características: Flujo óptico frente a corriente a temperatura diferente de la ambiente; tensión frente a corriente a temperatura diferente de la ambiente.
- OLED. Reguladores DC/DC sin Software, incluyendo corrección del envejecimiento.

- Convertidores DC/DC (Sepic) de corriente para flujo óptico constante.

Referencias

- [1] Donald Hoffman Burkard Wördenweber Jörg Wallaschek Peter Boyce. *Automotive Lighting and Human Vision*. 2007.
- [2] Xingming Long et al. “A review on light-emitting diode based automotive headlamps”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015), págs. 29-41. DOI: [j.rser.2014.08.028](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.028).
- [3] Mario A Campos. *Automotive Lighting and Its Effects on Consumers*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 2000. DOI: [10.4271/2000-01-0321](https://doi.org/10.4271/2000-01-0321).
- [4] Sam Burnett. *Top Gear - Car Review - Audi Q4 e-tron review*. Accedido el 22 de Julio de 2024. 2023.
- [5] UNITED NATIONS. *R48 - CONCERNING THE ADOPTION OF UNIFORM TECHNICAL PRESCRIPTIONS FOR WHEELED VEHICLES, EQUIPMENT AND PARTS WHICH CAN BE FITTED AND/OR BE USED ON WHEELED VEHICLES AND THE CONDITIONS FOR RECIPROCAL RECOGNITION OF APPROVALS GRANTED ON THE BASIS OF THESE PRESCRIPTIONS*. 2010.
- [6] United Nations. *Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations - Addendum 147 – UN Regulation No. 148*. 2019.
- [7] United Nations. *Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations - Addendum 148 – UN Regulation No. 149*. United Nations, 2019.
- [8] G. Leschhorn et al. *Handbook of LED and SSL Metrology*. Pro BUSINESS, 2017.
- [9] Andrew Stockman. “CIE Physiologically Based Color Matching Functions and Chromaticity Diagrams”. En: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Ed. por Ming Ronnier Luo. New York, NY: Springer New York, 2016, págs. 165-173. DOI: [10.1007/978-1-4419-8071-7_326](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8071-7_326).
- [10] Osram. *Original Line H7*. Nov. de 2019.
- [11] Osram. *Original - Metal base P21/5W*. Nov. de 2019.
- [12] Osram. *Original - Metal base PY21W*. Nov. de 2019.
- [13] Philips. *Señalización e interior convencional - PR21*. Nov. de 2019.
- [14] Osram. *Xenarc Original D3S*. Nov. de 2019.

- [15] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes*. 2.^a ed. Cambridge University Press, 2006. doi: <https://doi.org/10.1017/CB09780511790546>.
- [16] Shuji Nakamura, Stephen Pearton y Gerhard Fasol. “The blue laser diode. The complete story”. En: *Measurement Science and Technology* 12.6 (2001), págs. 755-756.
- [17] Tatsuo Teratani. “Impact of DC 48 V on Automotive Power Supply Systems: Comparison with DC 42 V and Future View under DC 60 V”. En: *Electrical Engineering in Japan* 197.2 (2016), págs. 48-55. doi: [10.1002/eej.22867](https://doi.org/10.1002/eej.22867).
- [18] Robert B Northrop. *Introduction to instrumentation and measurements*. CRC press, 2018.
- [19] Satyaki Mukherjee et al. “A two-stage automotive LED driver with multiple outputs”. En: *IEEE Transactions on Power Electronics* 36.12 (2021), págs. 14175-14186. doi: [10.1109/TPEL.2021.3077528](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3077528).
- [20] Muhammad Wasif Umar, Norzaihar B Yahaya y Zuhairi B Baharuddin. “PWM dimming control for high brightness LED based automotive lighting applications”. En: *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 7.5 (2017), págs. 2434-2440.
- [21] Yijie Wang, J Marcos Alonso y Xinbo Ruan. “A review of LED drivers and related technologies”. En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.7 (2017), págs. 5754-5765. doi: [10.1109/TIE.2017.2677335](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2677335).
- [22] Xiaobing Luo Sheng Liu. *LED Packaging for Lighting Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, págs. i-xxi. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470827857>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470827857>.
- [23] Xiaobing Luo et al. “Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications”. En: *Progress in Energy and Combustion Science* 56 (2016), págs. 1-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.05.003>.
- [24] Clemens J.M. Lasance y András Poppe. *Thermal Management for LED Applications*. 2013.
- [25] Moon Hwan Chang et al. “Light emitting diodes reliability review”. En: *Microelectronics Reliability* 52 (5 2012), págs. 762-782. doi: [10.1016/j.microrel.2011.07.063](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.07.063).
- [26] Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan y Guo Qi Zhang. *Solid State Lighting Reliability Part 2 - Components to Systems*. 2018.
- [27] Automotive Electronics Council. *AEC-Q101-Rev - C - Stress Test Qualification for Automotive Grade Discrete Semiconductors*. 2005.
- [28] WD Van Driel et al. “Lumen maintenance predictions for LED packages using LM80 data”. En: *2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. IEEE. 2015, págs. 1-5.
- [29] L-R Trevisanello et al. “Thermal stability analysis of high brightness LED during high temperature and electrical aging”. En: *Seventh International Conference on Solid State Lighting*. Vol. 6669. SPIE. 2007, págs. 231-240.
- [30] International Accrediation Japan. “LM-80 Test Report - NFSL757G”. En: *Nichia*. 2019.
- [31] János Hegedüs, Gusztáv Hantos y András Poppe. “Lifetime modelling issues of power light emitting diodes”. En: *Energies* 13.13 (2020), págs. 3370.
- [32] Matteo Meneghini et al. “Degradation mechanisms of high-power LEDs for lighting applications: An overview”. En: *IEEE Transactions on Industry Applications* 50.1 (2013), págs. 78-85.
- [33] Matteo Buffolo et al. “Long-term degradation mechanisms of mid-power LEDs for lighting applications”. En: *Microelectronics Reliability* 55.9-10 (2015), págs. 1754-1758.
- [34] Osram Optosemiconductors. *LA ETSF Datasheet*. 2021.
- [35] Dominant Opto Technologies. *DWx MKG Datasheet*. 2022.

- [36] Osram Optosemiconductors. *LW C6CP Datasheet*. 2022.
- [37] Lei Chen et al. “Light converting inorganic phosphors for white light-emitting diodes”. En: *Materials* 3.3 (2010), págs. 2172-2195.
- [38] Philippe F. Smet, Anthony B. Parmentier y Dirk Poelman. “Selecting Conversion Phosphors for White Light-Emitting Diodes”. En: *Journal of The Electrochemical Society* 158.6 (abr. de 2011), R37. DOI: [10.1149/1.3568524](https://doi.org/10.1149/1.3568524).
- [39] Dominant Opto Technologies. *DWW EZKG Datasheet*. 2022.
- [40] Osram Optosemiconductors. *LY ETSF Datasheet*. 2021.
- [41] Osram Optosemiconductors. *LS E67F Datasheet*. 2021.
- [42] Ingo Speier y Marc Salsbury. “Color temperature tunable white light LED system”. En: *Sixth international conference on solid state lighting*. Vol. 6337. SPIE. 2006, págs. 301-312. DOI: [10.1117/12.679688](https://doi.org/10.1117/12.679688).
- [43] Osram Optosemiconductors. *KW-CWLN3 Datasheet*. 2021.
- [44] Nichia. *NFSW172AT Datasheet*. 2021.
- [45] International Organization for Standardization (ISO). *Road vehicles - Functional safety - ISO26262*. 2018.
- [46] Rob Palin et al. “ISO 26262 safety cases: Compliance and assurance”. En: (2011).
- [47] John Birch et al. “Safety cases and their role in ISO 26262 functional safety assessment”. En: *Computer Safety, Reliability, and Security: 32nd International Conference, SAFECOMP 2013, Toulouse, France, September 24-27, 2013. Proceedings 32*. Springer. 2013, págs. 154-165.
- [48] Qian Sun et al. “GaN-on-Si blue/white LEDs: epitaxy, chip, and package*”. En: *Journal of Semiconductors* 37.4 (abr. de 2016), pág. 044006. DOI: [10.1088/1674-4926/37/4/044006](https://doi.org/10.1088/1674-4926/37/4/044006).
- [49] John Barrington, Matthew Hildner y Aarash Navabi. “LEDs: Everything you wanted to know”. En: *White Paper: LJ STAR INCORPORATED* (2015).
- [50] H-C. Yang et al. “An optimal LED bin allocation system based on multi-level integer programming method”. En: *2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2012, págs. 1223-1227. DOI: [10.1109/IEEM.2012.6837938](https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6837938).
- [51] Ron Lenk y Carol Lenk. *Practical lighting design with LEDs*. John Wiley & Sons, 2017.
- [52] Osram Optosemiconductors. *KW CELNM1.TG Datasheet*. 2022.
- [53] Te-Yuan Chung. “Thermal Management: Component to Systems Level”. En: *Handbook of Advanced Lighting Technology*. Ed. por Robert Karlicek et al. Cham: Springer International Publishing, 2017, págs. 239-267. DOI: [10.1007/978-3-319-00176-0_60](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00176-0_60).
- [54] Reena Cole et al. “Forced convection board level thermal design methodology for electronic systems”. En: *J. Electron. Packag.* 123.2 (2001), págs. 120-126.
- [55] Lian-Tua Yeh, RC Chu y WS Janna. “Thermal management of microelectronic equipment: heat transfer theory, analysis methods, and design practices. ASME press book series on electronic packaging”. En: *Appl. Mech. Rev.* 56.3 (2003), B46-B48.
- [56] J.R. de Bie y J.C.M.A. Ponsioen. “Life and luminous flux of halogen incandescent lamps related to filament temperature, pressure and CH₂Br₂ content”. En: *Lighting Research & Technology* 9.3 (1977), págs. 141-150. DOI: [10.1177/096032717700900302](https://doi.org/10.1177/096032717700900302). eprint: <https://doi.org/10.1177/096032717700900302>.
- [57] J Wang et al. “Design of automotive headlamp with high-power LEDs”. En: *International Journal of Automotive Technology* 15 (2014), págs. 673-681. DOI: [10.1007/s12239-014-0070-2](https://doi.org/10.1007/s12239-014-0070-2).

- [58] Yan Ling Cao y Ping Cao. “A derating control strategy based on the stator temperature of PMSM”. En: *Applied Mechanics and Materials* 727 (2015), págs. 683-686.
- [59] András Poppe y Clemens JM Lasance. “Standardization of LED thermal characterization”. En: *Thermal Management for LED Applications*. Springer, 2013, págs. 197-264. DOI: [10.1007/978-1-4614-5091-7_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5091-7_6).
- [60] Jeffrey Y Tsao et al. “Solid-state lighting: an integrated human factors, technology, and economic perspective”. En: *Proceedings of the IEEE* 98.7 (2010), págs. 1162-1179. DOI: [10.1109/JPROC.2009.2031669](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2031669).
- [61] Petar Atanasijevic y Pedja Mihailovic. “Temperature compensation of NTC thermistors based anemometer”. En: *Sensors and Actuators A: Physical* 285 (2019), págs. 210-215. DOI: [10.1016/j.sna.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.004).
- [62] Evgeny Kuznetsov. “Temperature-compensated silicon photomultiplier”. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 912 (2018), págs. 226-230. DOI: [10.1016/j.nima.2017.11.060](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.060).
- [63] PENA Miguel-Angel et al. *Automotive lamp with compensation of the luminous flux of the light source*. US Patent 10,485,075. Nov. de 2019.
- [64] Rabih Taleb Mohamed-Marouene Karray y Hafid El Idrissi. *Procédé de fonctionnement d'un dispositif d'éclairage automobile et dispositif d'éclairage automobile*. FR Patent 3,096,759. Nov. de 2019.
- [65] Dongsheng Peng y Kailong Liu. “Modeling Study of Red LED Spectral Characteristics”. En: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1746. 1. IOP Publishing, 2021, pág. 012003. DOI: [10.1088/1742-6596/1746/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1746/1/012003).
- [66] Jinyun Yan et al. “Temperature compensation for LED filament standard lamps”. En: *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications VI*. Vol. 11189. SPIE, 2019, págs. 327-333. DOI: [10.1117/12.2537712](https://doi.org/10.1117/12.2537712).
- [67] John G Webster y Ramón Pallás-Areny. *Sensors and signal conditioning*. Wiley New York, 1991.
- [68] Joseph Bielecki et al. “Thermal considerations for LED components in an automotive lamp”. En: *Twenty-Third Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. IEEE, 2007, págs. 37-43. DOI: [10.1109/STHERM.2007.352403](https://doi.org/10.1109/STHERM.2007.352403).
- [69] Elmos Semiconductor SE. *E522.9x Datasheet*. 2022.
- [70] Elmos Semiconductor SE. *E522.8x Datasheet*. 2022.
- [71] Infineon Technologies AG. *TLD2311EL Datasheet*. 2022.
- [72] Infineon Technologies AG. *TLD1114-1EP Datasheet*. 2022.
- [73] Mersida Janeva Azdejkovic et al. *Application of Color Light-Emitting Diodes in Automotive Exterior Lighting*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 2024. DOI: [10.4271/2024-01-50037](https://doi.org/10.4271/2024-01-50037).
- [74] Heinz Van der Broeck, Georg Sauerlander y Matthias Wendt. “Power driver topologies and control schemes for LEDs”. En: *APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE, 2007, págs. 1319-1325. DOI: [10.1109/APEX.2007.357686](https://doi.org/10.1109/APEX.2007.357686).
- [75] Lei Yang, Wenqian Yu y Jiaxiang Zhang. “Variable Frequency Constant Current Control Method for Switched-Capacitor Converter Based Automotive LED Driver”. En: *IEEE Access* 7 (2019), págs. 42094-42106. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2907983](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907983).

- [76] Bin-Juine Huang et al. “Development of constant-power driving control for light-emitting-diode (LED) luminaire”. En: *Applied Thermal Engineering* 50.1 (2013), págs. 645-651. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.030>.
- [77] Masahiro Nishikawa et al. “An LED Drive Circuit with Constant-Output-Current Control and Constant-Luminance Control”. En: *INTELEC 06 - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference*. 2006, págs. 1-6. doi: [10.1109/INTLEC.2006.251597](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2006.251597).
- [78] Hong-Liang Ke et al. “Junction temperature estimation for LED lamp with forward voltage method”. En: *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. 2016, págs. 1-4. doi: [10.1109/EuroSimE.2016.7463297](https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2016.7463297).
- [79] Christian Branas, Francisco J. Azcondo y J. Marcos Alonso. “Solid-State Lighting: A System Review”. En: *IEEE Industrial Electronics Magazine* 7.4 (2013), págs. 6-14. doi: [10.1109/MIE.2013.2280038](https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2280038).
- [80] Abraham Pressman. *Switching Power Supply Design*. McGraw-Hill Education, 2009.
- [81] Shailesh Kolhe y Shubham Chopra. “Thermal simulation for a lighting system”. En: *Materials Today: Proceedings* 72 (2023), págs. 1825-1828. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.578>.
- [82] Qiming Wu, Caihang Liang y Liansheng Huang. “Thermal design and simulation of LEDs automotive headlamps”. En: *2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE. 2020, págs. 1-5. doi: [10.1109/ICEPT50128.2020.9202953](https://doi.org/10.1109/ICEPT50128.2020.9202953).
- [83] Xin-Jie Zhao et al. “Thermal model design and analysis of the high-power LED automotive headlight cooling device”. En: *Applied Thermal Engineering* 75 (2015), págs. 248-258. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2014.09.066](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.066).
- [84] Apoorv Arora y Vaibhav Goel. “Real Time Fault Analysis and Acknowledgement System for LED String”. En: *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. IEEE. 2018, págs. 457-461. doi: [10.1109/GUCON.2018.8675118](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675118).
- [85] Hans Martin von Staudt et al. “Probeless DfT Scheme for Testing 20k I/Os of an Automotive Micro-LED Headlamp Driver IC”. En: *2022 IEEE International Test Conference (ITC)*. IEEE. 2022, págs. 365-371. doi: [10.1109/ITC50671.2022.00045](https://doi.org/10.1109/ITC50671.2022.00045).
- [86] David S Meyaard et al. “Analysis of the temperature dependence of the forward voltage characteristics of GaInN light-emitting diodes”. En: *Applied Physics Letters* 103.12 (2013). doi: [10.1063/1.4821538](https://doi.org/10.1063/1.4821538).
- [87] Mesfin Seid Ibrahim et al. “Machine learning and digital twin driven diagnostics and prognostics of light-emitting diodes”. En: *Laser & Photonics Reviews* 14.12 (2020), págs. 2000254. doi: [10.1002/lpor.202000254](https://doi.org/10.1002/lpor.202000254).
- [88] Haisu Jiang et al. “LED device fault diagnosis base on neural network and SVM model analysis”. En: *2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*. IEEE. 2017, págs. 45-47. doi: [10.1109/IFWS.2017.8245971](https://doi.org/10.1109/IFWS.2017.8245971).
- [89] Hosein Rafiai y Ahmad Jafari. “Artificial neural networks as a basis for new generation of rock failure criteria”. En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48.7 (2011), págs. 1153-1159. doi: [10.1016/j.ijrmms.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.001).
- [90] Nichia. *NCSW170DT Datasheet*. 2021.

- [91] Kim Fumagalli, Roberto Faranda y Lorenzo Farnè. “Analysis of possible LED failure mode”. En: *2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe*. IEEE. 2014, págs. 1-8. DOI: [10.1109/PCICEurope.2014.6900068](https://doi.org/10.1109/PCICEurope.2014.6900068).
- [92] JR Martinez-Perez et al. “LED biasing scheme with thermal compensation for automotive industry applications”. En: *Results in Engineering* 21 (2024), pág. 101699. DOI: [10.1016/j.rineng.2023.101699](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101699).
- [93] Jose R Martínez-Pérez et al. “Advanced Detection of Failed LEDs in a Short Circuit for Automotive Lighting Applications”. En: *Sensors* 24.9 (2024), pág. 2802. DOI: doi.org/10.3390/s24092802.
- [94] José Ramón Martínez-Perez, José-Luis López y Juan-José Santaella. *Automotive lighting device and method*. EP3691414A1. 2020.