



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Modelo Eléctrico - Térmico para LEDs de Potencia

presentada por

Ing. Heriberto Adamas Pérez

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

Codirector de tesis

Dr. René Osorio Sánchez

Cuernavaca, Morelos, México. Marzo de 2019.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Morelos, **28/febrero/2019**

OFICIO No. SAC/106/2019

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. HERIBERTO ADAMAS PÉREZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Modelo Eléctrico - Térmico para LEDs de Potencia", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"2019. Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor., 18 de febrero de 2019.

OFICIO No. DIE/032/2019

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Heriberto Adamas Pérez**, con número de control **M17CE001** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Modelo Eléctrico – Térmico para LEDs de Potencia"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. René Osorio Sánchez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5606160

REVISOR 1

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9526506

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente

RFEJ/lrr.

Contenido

Dedicatoria.....	5
Agradecimientos	6
Lista de Figuras.....	8
Lista de tablas	10
Simbología	11
Acrónimos.....	13
Resumen.....	16
Abstract.....	17
1. Introducción.....	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Planteamiento del problema	19
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Justificación.....	19
1.5 Alcance	20
2. Modelos.....	20
2.1.1 Clasificación de modelos.....	20
2.2 LEDs	21
2.2.1 Principio de operación del LED.....	22
2.3 Efecto de la temperatura de unión en los LEDs.....	23
2.4 Modelos eléctricos del LED	23
2.5 Modelos térmicos	26
2.6 Modelos fotométricos.....	26
2.7 Propuesta de solución.....	27
3. Modelo Eléctrico - térmico para LEDs de Potencia.....	29
3.1 Modelo Eléctrico	29
3.2 Modelo térmico	32
3.3 Modelo eléctrico-térmico propuesto.....	35
3.4 Modelo eléctrico (12 LEDs).....	36
3.5 Modelo Térmico (12 LEDs)	37
4. Resultados experimentales y modelados.....	40
4.1 Metodología para el desarrollo de pruebas	40

4.2 Simulación del modelo	40
4.2.1 Simulación térmica	40
4.2.2 Simulación electro-térmica	42
4.3 Caracterización eléctrica	43
4.3.1 Resultados electro térmicos	43
4.3.2 Resultados experimentales y modelados	45
4.4 Caracterización térmica	47
4.5 Resultados	50
4.6 Modelo eléctrico (12 LEDs)	53
4.7 Modelo térmico (12 LEDs)	54
4.8 Resultados eléctricos experimentales y modelados (12 LEDs).....	56
4.9 Resultados térmicos experimentales y modelados (12 LEDs)	61
4.10 Resultados modelados (12 LEDs conectados en paralelo).....	62
4.10 Simulación de un convertidor CD-CD con el modelo (12 LEDs).....	63
5. Conclusiones	66
Referencias.....	67
Anexos	69
Anexo 1. Protocolo de pruebas.....	69
Anexo 2. Curvas I-V modeladas y experimentales.....	74
Anexo 3. Temperatura de disipador y encapsulado (Modeladas y experimentales).....	76
Anexo 4. Mediciones de Corriente y Voltaje en el LED a diferentes temperaturas	79
Anexo 5. Hoja de datos del módulo de potencia (LMT-P12W-77-N).....	99

*Jeoshúa ha dicho: Soy la luz quien está sobre todos, soy el todo.
Todo salió de mí, y todo vuelve a mí. Partid la madera, allí estoy.
Levantad la piedra y allí me encontraréis.
Áhyh Áshx Áhyh (Soy Quien Soy).*

Dedicatoria

A Dios Supremo del Universo, su luz infunde en mí el aliento de vida.

A la Madre Divina, hasta aquí me has ayudado.

A mi madre por su apoyo incondicional.

A mi prima Remy, si no hubiese sido por ese obsequio no sé si estaría aquí.

A mi novia, Jasmín, por este primer año juntos. Te amo.

A mi hermano Jesús, por estar en los tiempos difíciles.

A mi padre Martín, por todas sus oraciones.

A mi abuelo Pedro.

A mi abuela Dolores

A Yaretzi.

A mi tía Magdalena.

A mi tío Lidio.

A mi Suegra, Suegro, Cuñados, Concuñas, y toda la familia de mi novia.

A la familia Ojeda: Paul, Guadalupe y Eduardo.

A la familia Pérez Manuel.

A mi tía Martina por iniciarme en el camino.

A mis amigos fraternos: Carlos Eduardo y Berenice.

Agradecimientos

Al Dios Supremo del Universo, por permitirme estar en este mundo a esta altura de este sendero llamado vida.

A la Madre Divina del Universo, por escucharme en todo momento y no permitir que mi pie resbale.

A mi madre, por forjarme como persona.

A mi novia Jasmín, por todo el amor que me brinda todos los días.

A mi hermano Jesús, por su apoyo en los tiempos difíciles.

A mi padre, por sus oraciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado en la maestría y en la estancia en España.

A la Escuela Politécnica de Ingeniería de la Universidad de Oviedo.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

A mi asesor el Dr. Mario Ponce Silva.

A mi co-asesor el Dr. René Osorio Sánchez.

Al Dr. José Marcos Alonso Álvarez.

A mi revisor el Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez.

A mi revisor el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino.

Lista de Figuras

Figura 1. Tendencia de la tecnología en iluminación (Cortesía de http://www.f2e.es/es/iluminacion-desde-la-bombilla-de-edison-al-ano-de-la-luz).....	18
Figura 2. Mapa mental de la tesis.	18
Figura 3. Principio de operación y recombinación en un LED (Tomado de [4]).	23
Figura 4. Ecuación de Shockley para un diodo de unión p-n [4].	24
Figura 5. Efectos parásitos del diodo: (izquierda) Resistencia serie y paralelo (derecha) equivalente Thevenin [3].	25
Figura 6. Modelo del LED con resistencia equivalente [4].	25
Figura 7. Circuito electro – térmico de analogía eléctrica equivalente de un LED montado sobre un disipador [2].	26
Figura 8. Modelo térmico propuesto que incluye efectos de disipador.	28
Figura 9. Curva I-V, del LED bajo condiciones estables [5].	29
Figura 10. Resistencia equivalente en función de la potencia.....	31
Figura 11. Modelo propuesto implementado en Simulink®.	32
Figura 12. Modelo térmico.	32
Figura 13. Modelo electro-térmico en Simulink®.	36
Figura 14. Resistencia equivalente en función de la potencia (12 LEDs).	37
Figura 15. Modelo térmico propuesto implementado en Simulink®.	40
Figura 16. Temperatura en el encapsulado.	41
Figura 17. Temperatura en el disipador.	42
Figura 18. Modelo eléctrico- térmico.	43
Figura 19. Esquema de prueba.	44
Figura 20. Dispositivo LED dentro de la cámara ambiental.	44
Figura 21. Curvas I-V del LED a diferentes temperaturas.....	45
Figura 22. Resultados experimentales y modelados (20°C)	46
Figura 23. Resultados experimentales y modelados (-30°C).....	46
Figura 24. Curva térmica en encapsulado del LED a -5°C.	47
Figura 25. Curva térmica en encapsulado del LED a 12.5°C.	48
Figura 26. Curva térmica en encapsulado del LED a 60°C.	48
Figura 27. Curva térmica en disipador del LED a -5.7°C.....	49
Figura 28. Curva térmica en disipador del LED a -20.7°C.....	49
Figura 29. Curva térmica en disipador del LED a 39.5°C.	50
Figura 30. Temperatura en encapsulado (35°C 0.5W).....	51
Figura 31. Temperatura en encapsulado (35°C 0.9W).....	51
Figura 32. Temperatura en encapsulado (60°C 0.9W).....	52
Figura 33. Temperatura en disipador (60°C 0.9W).	52
Figura 34. Temperatura en disipador (35°C 0.5W).	53
Figura 35. Resistencia equivalente en función de la potencia (12 LEDs)	54
Figura 36. Curvas I-V a diferentes temperaturas (12 LEDs).	57
Figura 37. Curva I-V a -30°C.....	58
Figura 38. Curva I-V a -15°C.....	58
Figura 39. Curva I-V a 0°C.	59
Figura 40. Curva I-V a 15°C.	59
Figura 41. Curva I-V a 30°C.	60
Figura 42. Curva I-V a 60°C.	60

Figura 43. Temperatura de encapsulado (30°C 12.3W).....	61
Figura 44. Temperatura en disipador (15.4°C 6.0688W).....	62
Figura 45. Curva I-V 12 LEDs conectados en paralelo.	63
Figura 46. Convertidor CD-CD conectado al modelo.	64
Figura 47. Corriente y voltaje en el modelo con el convertidor CD-CD.....	64

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación y tipos de modelos para LEDs.	20
Tabla 2. Diferentes curvas I-V modeladas y experimentales.	74
Tabla 3. Temperaturas de disipador y encapsulado (Experimentales).	76
Tabla 4. Temperatura de encapsulado y disipador (Modeladas y experimentales).	77
Tabla 5. Mediciones de corriente y voltaje a -30°C y -25°C	79
Tabla 6. Mediciones de corriente y voltaje a -20°C y -15°C	82
Tabla 7. Mediciones de corriente y voltaje a -10°C y -5°C	84
Tabla 8. Mediciones de corriente y voltaje a 0°C y 5°C	86
Tabla 9. Mediciones de corriente y voltaje a 10°C y 15°C	88
Tabla 10. Mediciones de corriente y voltaje a 20°C y 25°C	90
Tabla 11. Mediciones de corriente y voltaje a 30°C y 35°C	92
Tabla 12. Mediciones de corriente y voltaje a 40°C y 45°C	94
Tabla 13. Mediciones de corriente y voltaje a 50°C y 55°C	96

Simbología

A_0 Coeficiente de temperatura en función del flujo luminoso

A_1 Coeficiente luminoso en función de la temperatura ambiente

B_1 Constante dada en $\frac{\Omega}{W}$ en función de la potencia

B_2 Constante sin unidad en función de la potencia

B_3 Constante dada en Ω en función de la potencia

C_j Capacitancia térmica de encapsulado

C_{sh} Capacitancia térmica de disipador

c_0 c_1 Coeficiente luminoso en función de la temperatura de unión

D Ciclo de trabajo

d_0 Coeficiente luminoso en función de la corriente nominal

d_1 Coeficiente luminoso en función de la corriente nominal

F_T Flujo total

I Corriente

i_D Corriente del LED

I_f Corriente nominal del LED

I_{f0} Corriente nominal inicial del LED

I_s corriente de saturación

K_v Coeficiente de flujo luminoso

n Coeficiente de emisión

p_{Dx} Potencia disipada del LED en un punto de operación

P_d Potencia disipada del LED

p_D Potencia del LED

q Constante de Boltzman

R_D Resistencia equivalente del LED

R_{th} Resistencia térmica de encapsulado

R_{tsh} Resistencia térmica de disipador

R_{hs} Resistencia térmica

R_p Resistencia en paralelo del LED
 R_s Resistencia serie del LED
 R_{jc} Resistencia térmica de unión
 T_0 Temperatura de referencia
 $T_1(t)$ Temperatura de juntura en función del tiempo
 $T_2(t)$ Temperatura de disipador en función del tiempo
 T_a Temperatura ambiente
 T_e Temperatura de encapsulado
 T_{amb} Temperatura ambiente
 T_j Temperatura de unión
 T_{ref} Temperatura de referencia
 T_{sh} Temperatura de disipador
 v_D Voltaje del LED
 V_f Voltaje de umbral
 V Voltaje
 V_{in} Voltaje de entrada
 V_o Voltaje de salida
 τ_{hs} Constante de tiempo térmica de disipador
 τ_j Constante de tiempo térmica de encapsulado
 ΔV_f Incremento de tensión de umbral
 φ_v Flujo luminoso
 $\varphi_{v,ref}$ Flujo luminoso de referencia

Acrónimos

DC Corriente directa

GaN Nitruro de Galio

LED Diodo emisor de Luz

MATLAB® (Abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

RC Resistencia – capacitor

SiC Carburo de Silicio

Simulink® Es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Resumen

Hoy en día, los diodos emisores de luz (*LEDs*) de potencia son una buena alternativa para aplicaciones de iluminación porque nos ofrecen una muy larga vida y alta eficiencia luminosa.

Se han propuesto diversos convertidores *DC-DC* para alimentar *LEDs* de potencia. Por lo que se debe de tener un buen modelo eléctrico – térmico para que las simulaciones de estos sistemas ofrezcan información confiable acerca del comportamiento del *LED*. De esta manera, será una excelente herramienta para analizar el comportamiento del dispositivo semiconductor.

Un modelo avanzado de un *LED* requiere conocimientos específicos en materia de semiconductores, óptica, termodinámica. Esto implica utilizar equipo de laboratorio especializado del que se dispone solamente en pocos lugares del país. Sin embargo, tomando mediciones simples de corriente, voltaje, temperatura se obtendrá un modelo simplificado del *LED* que tendrá resultados aceptables en simulación. Estas mediciones se pueden realizar en un laboratorio convencional de electrónica.

La temperatura de unión (T_j) afecta directamente el comportamiento del *LED*, desplazando sus curvas características de operación e impactando considerablemente la eficiencia del dispositivo. Por lo tanto, la T_j se vuelve un parámetro importante de estudio para entender las características del dispositivo y poder predecir su comportamiento.

Considerando lo expuesto, este trabajo de investigación abordará el planteamiento del problema, el estado del arte, así como la metodología a seguir para resolver esta problemática. El resultado que se pretende lograr es un *modelo eléctrico – térmico* para *LEDs* de potencia.

Abstract

Currently, light emitting diodes (LEDs) of power are a good alternative for lighting applications because they offer a very long life and high luminous efficiency.

Various DC-DC converters have been proposed to power LEDs. So it must have a good electrical - thermal model so that the simulations of these systems offer reliable information about the behavior of the LED. In this way, it will be an excellent tool to analyze the behavior of the semiconductor device.

An advanced model of an LED requires specific knowledge in the field of semiconductors, optics, thermodynamics. This implies using specialized laboratory equipment that is available only in a few places in the country. However, taking simple measurements of current, voltage, temperature, you will obtain a simplified model of the LED that will have acceptable results in simulation. These measurements can be made in a conventional electronics laboratory.

The junction temperature (T_j) directly affects the behavior of the LED, displacing its operating characteristic curves and significantly impacting the efficiency of the device. Therefore, the T_j becomes an important parameter of study to understand the characteristics of the device and to predict its behavior.

Considering the above, this research work will address the approach to the problem, the state of the art, as well as the methodology to be followed to solve this problem. The result to be achieved is an electric - thermal model for power LEDs.

1.Introducción

1.1 Antecedentes

Los LEDs ofrecen diversas ventajas sobre las lámparas incandescentes, fluorescentes y lámparas de descarga. Entre las ventajas se encuentra una larga vida, escala pequeña de dispositivo y mayor resistencia mecánica. Consecuentemente los LEDs están reemplazando las fuentes tradicionales de luz. Véase la Figura 1 , (en numerosas aplicaciones de iluminación e incluso para la transmisión de datos) [1]. Por estas razones, los LEDs están siendo la tendencia en iluminación [2].

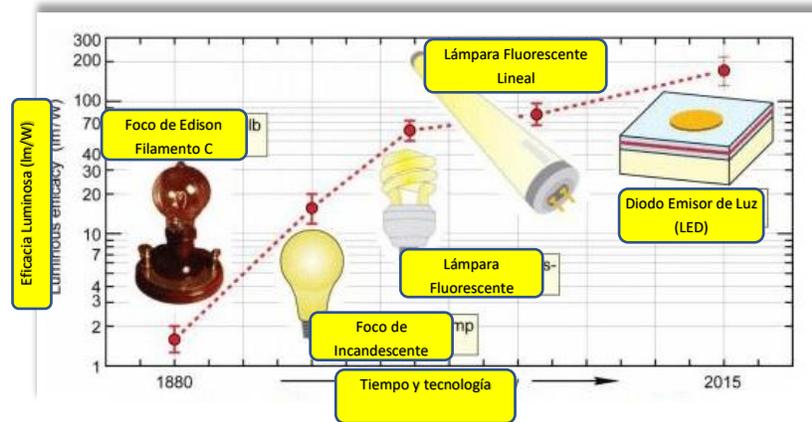


Figura 1. Tendencia de la tecnología en iluminación (Cortesía de <http://www.f2e.es/es/iluminacion-desde-la-bombilla-de-edison-al-ano-de-la-luz>).

Existen diversos modelos comunes de un LED, estos se muestran en el siguiente mapa mental. Véase la Figura 2.

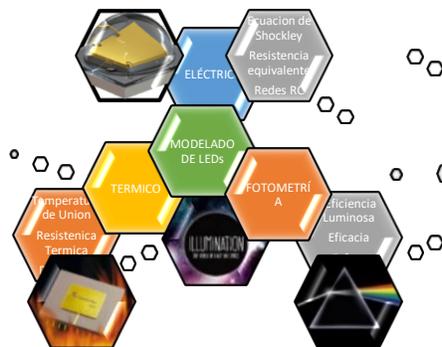


Figura 2. Mapa mental de la tesis.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente los LEDs se han convertido en una tendencia en aplicaciones de iluminación principalmente debido a su larga vida útil de cientos de miles de horas [3]. En los últimos años, se han desarrollado LEDs con características deseables para aplicaciones de iluminación. El éxito de estas fuentes de luz dependen del diseño de su sistema [4]. Este diseño deberá comprender aspectos eléctricos y fotométricos bajo el efecto de temperatura en el rendimiento del dispositivo.

Haciendo una revisión de investigaciones anteriores, la mayoría de los artículos sobre modelado de LEDs se centran en el modelo eléctrico [5-7], otros con un modelado térmico [8-10] y algunos pocos con una estimación del flujo luminoso [11, 12].

Sin embargo, actualmente, en la literatura no se ha reportado un modelo (ET) que se base en el concepto de resistencia (equivalente o dinámica) [5]. Por lo tanto, esta propuesta busca desarrollar un modelo para LEDs de potencia donde se incluyan los efectos de temperatura. Con los resultados obtenidos, se complementará el modelo presentado en [5].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo eléctrico – térmico para LEDs de potencia. El cual solo contenga solo dos variables de entrada (Corriente y temperatura de operación). Con este modelo se pueda predecir el comportamiento de LEDs de potencia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar un LED de potencia a diferentes temperaturas.
- Modelar el efecto de la temperatura e incluirlo en el modelo eléctrico.
- Validar del modelo propuesto.
- Simular una fuente de alimentación para LEDs con el modelo propuesto.

1.4 Justificación

Investigaciones previas han confirmado que la temperatura de unión induce variaciones en la resistencia dinámica y equivalente de los LEDs [3]. Este es el interés fundamental de esta propuesta de tesis.

Obtener un modelo (ET) de un LED de potencia, sería de gran utilidad para la comunidad de investigadores dentro del área de iluminación electrónica. Con él se podría establecer una relación entre la temperatura de unión con la cual estaría operando y las variables eléctricas del dispositivo. Se espera que este modelo sea una mejor alternativa para realizar simulaciones del comportamiento de un LED de potencia.

1.5 Alcance

El desarrollo de la esta propuesta servirá de apoyo para futuros trabajos de modelado en LEDs, ya que se podría aplicar a cualquier tecnología de LEDs, solucionando así en un solo modelo efectos eléctricos y térmicos. En caso de incluir un modelo fotométrico será este un modelo muy completo que podrá usarse a futuro en la línea de investigación en iluminación.

2. Modelos

Un modelo es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre él [13]. Cuando es necesario conocer el comportamiento de un sistema en determinadas condiciones y entradas, se recurre a experimentar sobre dicho sistema y observar sus salidas. Sin embargo, en algunos casos la experimentación puede resultar compleja o imposible de llevar a cabo, lo que hace necesario trabajar con algún tipo de representación que se aproxime a la realidad, y a la que se conoce como *modelo* [13].

2.1.1 Clasificación de modelos

Una clasificación de modelos, en función del grado de formalismo matemático que poseen, se muestra en la tabla 1. [14]:

Tabla 1. Clasificación y tipos de modelos para LEDs.

<i>Clasificación</i>	<i>Tipos</i>	<i>Uso</i>
Numéricos	Físicos	Diseño y construcción de LEDs
Representación	Térmicos	Análisis y dinámicas de las constantes de las térmicas
	Pequeña señal	Dinámica del LED (Análisis en frecuencia)
Identificación de sistemas	Gran señal	Simulación
	Estáticos	Diseño de fuentes para LEDs

Una clasificación más extensa es la siguiente [13].

1. Modelos mentales, intuitivos o verbales: Estos modelos carecen de formalismo matemático [13].

2. Modelos no paramétricos: Muchos sistemas quedan perfectamente caracterizados mediante un gráfico o tabla que describa sus propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros [13].

3. Modelos paramétricos o matemáticos: Para aplicaciones más avanzadas, es necesario utilizar modelos que describan las relaciones entre las variables del sistema mediante expresiones matemáticas como las ecuaciones diferenciales (para sistemas continuos) o en diferencias (para sistemas discretos) [13].

Métodos de obtención de modelos

Existen dos métodos principales para obtener el modelo de un sistema:

1. Modelado teórico. Se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso.

2. Identificación del sistema. Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio.

El modelado teórico tiene un campo de aplicación restringido a procesos muy sencillos de modelar aplicaciones que no requieran gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, además, la estructura del modelo posee un conjunto de parámetros desconocidos y sólo se determinan experimentando sobre el sistema real. De ahí la necesidad de recurrir a los métodos de *identificación de sistemas* [13].

Los modelos obtenidos mediante técnicas de identificación tienen, sin embargo, las siguientes desventajas:

1. Su rango de validez suele ser limitado (sólo son aplicables a un determinado punto de trabajo, un determinado tipo de entrada o un proceso concreto).

2. En muchos casos es difícil dar significado físico al modelo obtenido, puesto que los parámetros identificados no tienen relación directa con alguna magnitud física.

En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final [13].

2.2 LEDs

Introducción

El principio del desarrollo del LED se remonta a 1907 cuando Henry Joshep Ronda observó la electroluminiscencia fenómeno que ocurre cuando una corriente fluye a través de un cristal de Carburo de Silicio (SiC) [15]. Sin embargo, en ese momento, el proceso de emisión no fue bien entendido. En la década de 1920, Oleg Lossev hizo el primer intento de explicar científicamente la electroluminiscencia en uniones p-n [16].

El primer LED surge hasta 1962 y la invención se le atribuye a Nick Holonyak [17]. A partir de entonces los LEDs han sido comercialmente disponibles en colores tales como verde, ámbar y rojo [4].

Posteriormente en 1994 el LED azul fue desarrollado por Nakamura [18]. Esto produjo varias transformaciones en el mundo de la iluminación porque con el descubrimiento del Nitruro de Galio (GaN) se hizo posible obtener luz blanca de un semiconductor [4].

La luz blanca es básicamente obtenida por dos métodos; mezclando LEDs rojos, verdes y azules o añadiendo una capa de fósforo en un LED azul. Lo que modifica el espectro de emisión. Los LEDs blancos han transformado la tecnología en iluminación [4].

Características tales como alta eficacia luminosa, larga vida útil y alta confiabilidad hacen que los LEDs estén sustituyendo a las fuentes tradicionales de luz [19].

Los Diodos Emisores de Luz (LED) son uniones p-n que pueden emitir radiación espontánea como luz ultravioleta, visible o en regiones infrarrojas. El LED visible tiene una multitud de aplicaciones como enlace de información entre dispositivos electrónicos [20].

2.2.1 Principio de operación del LED

Un LED se construye básicamente con dopado de materiales semiconductores. El dopaje en la región n proporciona portadores de carga negativa conocidos como electrones, mientras que el dopante en la región p proporciona portadores de carga positiva referidos como huecos. Así, cuando una tensión directa se aplica a la unión $p-n$ desde la región p hasta la región n . Los portadores de carga cruzan en una zona donde se recombinan, liberan fotones los cuales se convierten en luz visible [4]. A este fenómeno se le conoce como electroluminiscencia [20].

Hay dos mecanismos de recombinación en semiconductores: la recombinación radiactiva y la no radiactiva. Durante la recombinación no radiactiva la energía del electrón es convertida en energía vibrante es decir en fotones. La energía radiada se convierte en calor [21]. Esto se muestra en la Figura 3.

El aumento en la temperatura de unión (T_j) de los LEDs es un parámetro crítico en su rendimiento debido a su gran influencia en la vida útil, flujo luminoso, eficacia y comportamiento eléctrico [4].

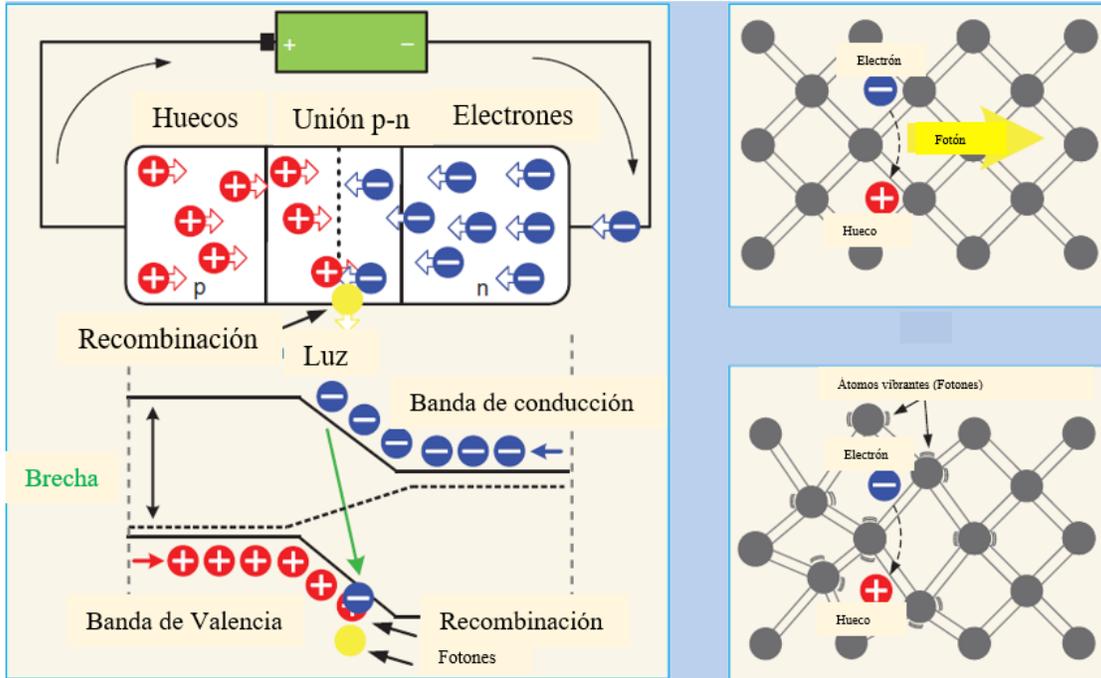


Figura 3. Principio de operación y recombinación en un LED (Tomado de [4]).

2.3 Efecto de la temperatura de unión en los LEDs

La temperatura de unión afecta directamente las curvas I-V de los LEDs. Por lo tanto la temperatura de unión induce variaciones en la resistencia dinámica [3]. También influye en las propiedades del diodo, particularmente en su tiempo de vida. Su valor depende de la temperatura ambiente y de efectos del disipador [22]. Un inconveniente para aplicaciones de iluminación con LEDs es que el flujo luminoso disminuye con la temperatura de unión [23]. La eficiencia luminosa típica de los LEDs varía aproximadamente de 0.2% a 1% por aumento de un grado centígrado en la temperatura. En algunas aplicaciones automotrices la temperatura ambiente puede ser muy alta y el tamaño del disipador es limitado [23]. Todo esto hace de la temperatura un problema serio en el funcionamiento de los LEDs.

2.4 Modelos eléctricos del LED

A continuación, se presenta una revisión de investigaciones realizadas anteriormente de los modelos eléctricos encontrados en la literatura.

En [24] se reporta el siguiente *modelo físico* basado en la ecuación de Shockley.

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{qV_D}{nKT_j}} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

I_s es la corriente de saturación,

q es la carga del electrón ($1.602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ C)

V_D es el voltaje del diodo

n es el coeficiente de emisión

k es la constante de Boltzmann ($8.617\ 342 \times 10^{-5}$ eV K⁻¹)

T_j es la temperatura de unión

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la ecuación de Shockley.

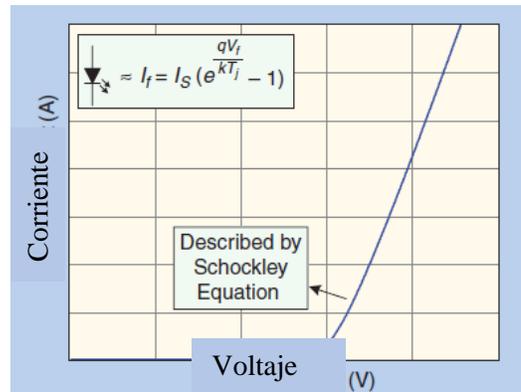


Figura 4. Ecuación de Shockley para un diodo de unión p-n [4].

En [3] se modela con un *modelo de analogía eléctrica lineal* basándose en el concepto de resistencia dinámica del LED. Derivando la ecuación de Shockley (1) con respecto al voltaje del diodo y tomando la inversa de la resistencia dinámica se obtiene [3].

$$\frac{1}{R_D} = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = \frac{q}{nKT_j} I_s e^{\frac{q}{nKT_j} V_D} \quad (2)$$

Sin embargo, existen efectos parásitos y no ideales en el diodo, teniendo en cuenta la resistencia serie y paralela [3]. Se obtiene la siguiente expresión.

$$I_D = \frac{V_D - R_S I_D}{R_P} + I_s e^{\frac{q}{nKT_j} (V_D - I_D R_S)} \quad (3)$$

Donde R_s y R_p son las resistencias parásitas (serie, paralelo). Estas resistencias son simplificadas por su equivalente Thevenin [3], como se ilustra en la Figura 5.

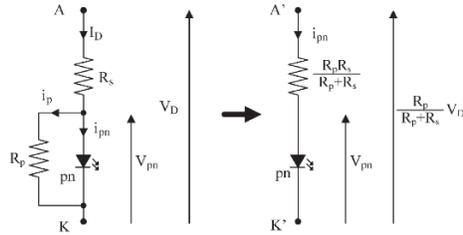


Figura 5. Efectos parásitos del diodo: (izquierda) Resistencia serie y paralelo (derecha) equivalente Thevenin [3].

El efecto de la resistencia paralela en los LEDs es despreciable. Entonces la resistencia dinámica se calculada con la siguiente expresión [3].

$$R_D = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = R_s + \frac{nKT_J}{q} * \frac{1}{I_D} \quad (4)$$

Los modelos del LED encontrados en [4] también se ilustran en la Figura 6.

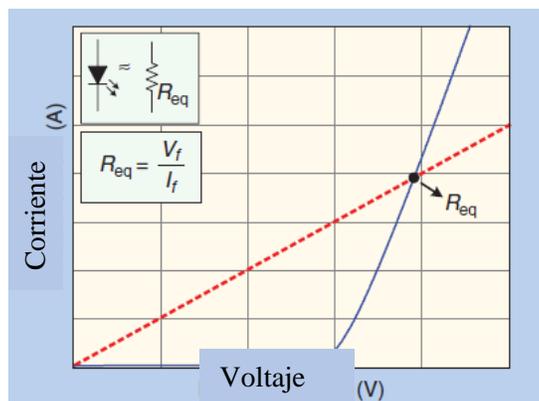


Figura 6. Modelo del LED con resistencia equivalente [4].

Estos modelos fueron encontrados en distintas publicaciones [3, 4, 25]. Entre las ventajas que ofrecen es que son muy sencillos, se representan con ecuaciones simples. Sin embargo, no incluyen efectos ópticos ni térmicos.

2.5 Modelos térmicos

En [2] se reporta el siguiente *modelo de analogía eléctrica lineal térmico*. Este nombre deriva de una clasificación de modelado [13]. Usando la temperatura de unión (T_j), se obtiene una relación entre la potencia del LED y la temperatura de unión (T_j), también entre la eficiencia y (T_j) y la curva I-V con (T_j) como parámetro de temperatura [2]. El voltaje del LED (v_f) depende de la temperatura de unión (T_j) [2]. Usando el termino K_v como una constante que depende de los cambios entre la temperatura ambiente y la de unión [2]. Se obtiene la siguiente expresión.

$$V_f(I_f, T_j) = V_o + R_s I_f + k_v(T_j - T_o) \quad (5)$$

Donde V_o es un voltaje de referencia, I_f es la corriente del diodo, R_s la resistencia serie y T_o como una temperatura de referencia [2]. El comportamiento térmico del sistema puede ser representado por un simple modelo térmico [2], tal como se muestra en la Figura 7 .

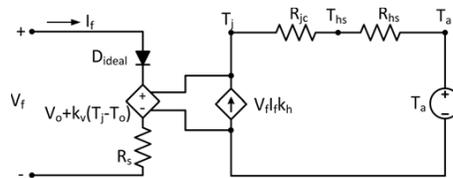


Figura 7. Circuito electro – térmico de analogía eléctrica equivalente de un LED montado sobre un disipador [2].

La figura anterior, muestra el dominio eléctrico y térmico representado por medio de elementos de circuito [2]. En el lado izquierdo del circuito se representa un modelo eléctrico que incluye los efectos de la temperatura en el voltaje del LED [2]. En el dominio térmico, los voltajes del nodo son representaciones de temperatura. Para este circuito, T_{hs} es la temperatura del disipador y se calcula la temperatura de unión T_j . R_{hs} y R_{jc} representan la temperatura del disipador a temperatura ambiente y la resistencia térmica respectivamente. T_a es la temperatura ambiente, y K_h se refiere a la relación de la potencia del LED que se convierte en calor radiado [2].

2.6 Modelos fotométricos

Las magnitudes fotométricas tales como: flujo luminoso y eficacia luminosa, dependen sustancialmente de las propiedades eléctricas (corriente y voltaje) y propiedades térmicas (temperatura de unión y resistencia térmica) [2].

Los LEDs producen un flujo luminoso que aumenta con la corriente y disminuye con la temperatura de unión. Ambas influencias se modelan con dos extrapolaciones lineales independientes [2]. Las siguientes ecuaciones modelan este comportamiento, en el cual c_0 , c_1 , d_0 y d_1 son coeficientes que surgen de un ajuste lineal de las curvas características normalizadas dadas por la hoja de datos de los LEDs. La ecuación (12) se obtiene bajo una corriente de referencia constante, mientras que (13) se obtiene bajo temperatura de referencia constante [2].

$$F_T = (T_j) = c_0 + c_1 T_j \quad (6)$$

$$F_T = (I_f) = d_0 + d_1 I_f \quad (7)$$

En [2] se mostró un *modelo lineal fotométrico* de analogía eléctrica que propone dos ecuaciones lineales dependientes de la temperatura de unión y la corriente para calcular el flujo luminoso total emitido por un LED. En [11], se muestra otro modelo fotométrico para LEDs. Es un *modelo lineal*. A continuación, se muestra el modelo.

Una forma común de representar la relación entre el flujo luminoso y la temperatura ambiente es a través de una relación normalizada de flujo luminoso que se expresa matemáticamente por la siguiente (ecuación 14).

$$\frac{\varphi_v}{\varphi_{v,ref}}(T_{amb}, I_{fo}) = A_0(T_{amb} - T_{ref}) + A_1 \quad (8)$$

Donde (T_{amb}, I_{fo}) es la desviación en la temperatura ambiente, T_{ref} es la temperatura de referencia (25 °C), A_0 y A_1 son constantes. Este modelo, a diferencia del anterior, presenta la temperatura ambiente y no la de unión, aunque ambos son *modelos lineales* para estimar el flujo luminoso de un LED.

2.7 Propuesta de solución

En el estado del arte se abordaron las diferentes topologías de *modelado con analogía eléctricas*. Cada una de ellas presenta una topología específica. Sin embargo, no hay alguna que presente un modelo eléctrico – térmico (ET) basado en resistencia equivalente, el cual integre los dos efectos (eléctricos - térmicos).

Para esto se ha propuesto un circuito con redes *RC*. Este circuito se muestra en la Figura 8. En donde $T_j(t)$ es la temperatura de unión, la cual es difícil de medir directamente, pero se puede estimar empleando la temperatura superficial $T_1(t)$ de los LEDs, la cual si se puede medir utilizando sensores de temperatura. Al estar los LEDs construidos con un material sólido y con base en las leyes de termodinámica, es posible que $T_j(t)$ y $T_1(t)$ tengan magnitudes y comportamiento dinámico casi iguales. En el modelo también se incluirá el efecto de un disipador. En donde $T_2(t)$ es la temperatura superficial del disipador.

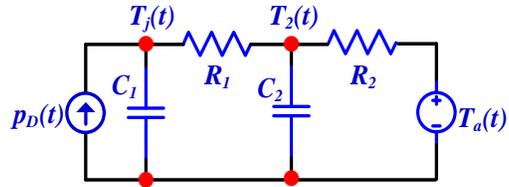


Figura 8. Modelo térmico propuesto que incluye efectos de disipador.

Posiblemente se requerirá una función no lineal para obtener un ajuste de curvas para $T_2(t)$. Una función como la que se muestra a continuación, en donde $T_2(t)$ es la temperatura superficial del disipador que se ajusta mejor a los datos reales.

$$T_{2b}(t) = f(T_2(t)) \quad (9)$$

3. Modelo Eléctrico - térmico para LEDs de Potencia

3.1 Modelo Eléctrico

Este modelo que se presenta fue extrapolado de [26] donde se modelaban lámparas de descarga. es adecuado para lograr simulaciones rápidas de sistemas LEDs [5]. Puede ser obtenido con sólo mediciones simples de variables eléctricas [5].

El propósito del modelo es orientado al área de ingeniería electrónica con aplicación especial en iluminación y diseño de fuentes para LEDs [5]. Los parámetros del LED son evaluados por medio de mediciones de corriente y voltaje con la ayuda de instrumentos convencionales como multímetro y osciloscopio [5]. Este modelo es limitado porque no incluye variables térmicas ni ópticas [5]. Los LEDs de potencia presentan una curva I-V característica, similar a la de un diodo convencional [5].

Esta curva se muestra en la Figura 9.

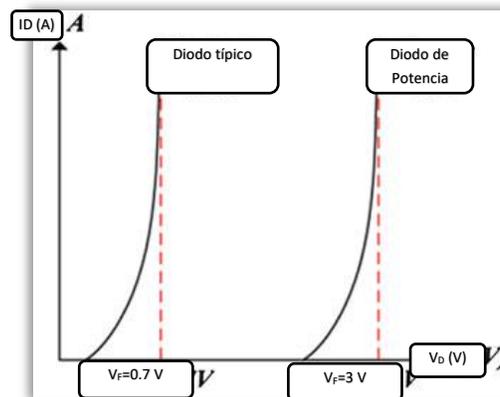


Figura 9. Curva I-V, del LED bajo condiciones estables [5].

El siguiente análisis eléctrico tiene sus orígenes en el modelo presentado en [5]. Los parámetros del LED son evaluados por medio de mediciones de corriente y voltaje con la ayuda de instrumentos convencionales como multímetro y osciloscopio [5].

La ecuación de Shockley es comúnmente usada para modelar físicamente el comportamiento del diodo, y se aplica para modelar el comportamiento de un LED [9]. La ecuación (1) es la corriente del diodo i_D en estado estable en función de la temperatura de unión T_j y el voltaje del LED v_D [5].

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{qv_D}{nkT_j}} - 1 \right) \quad (10)$$

La temperatura ambiente (T_a) puede ser una función de la potencia del LED (p_D), la cual presenta en la ecuación (12). Además, el voltaje del LED v_D es una función de la potencia del LED (p_D) y de la resistencia equivalente del LED (R_D), se muestra en la ecuación (3). Del mismo modo, la corriente del diodo i_D se expresa como función de la potencia del LED p_D y la 'resistencia equivalente' del LED, R_D , se muestra en la ecuación (15).

$$T_a = f_2(p_D) \quad (11)$$

$$v_D = f_3(p_D, R_D) = \sqrt{p_D R_D} \quad (12)$$

$$i_D = f_4(p_D) = \sqrt{\frac{p_D}{R_D}} \quad (13)$$

Por otra parte, los LEDs de potencia tienen diferentes valores de resistencia equivalente R_D a diferentes puntos de operación. Esta resistencia es una función del voltaje y la corriente del LED. Por lo tanto, R_D también es una función de P_D , como se muestra en la ecuación (15).

$$R_D = f_4(p_D) \quad (14)$$

Haciendo mediciones experimentales a una temperatura ambiente se obtendría la siguiente gráfica de resistencia equivalente en función de la potencia del LED.

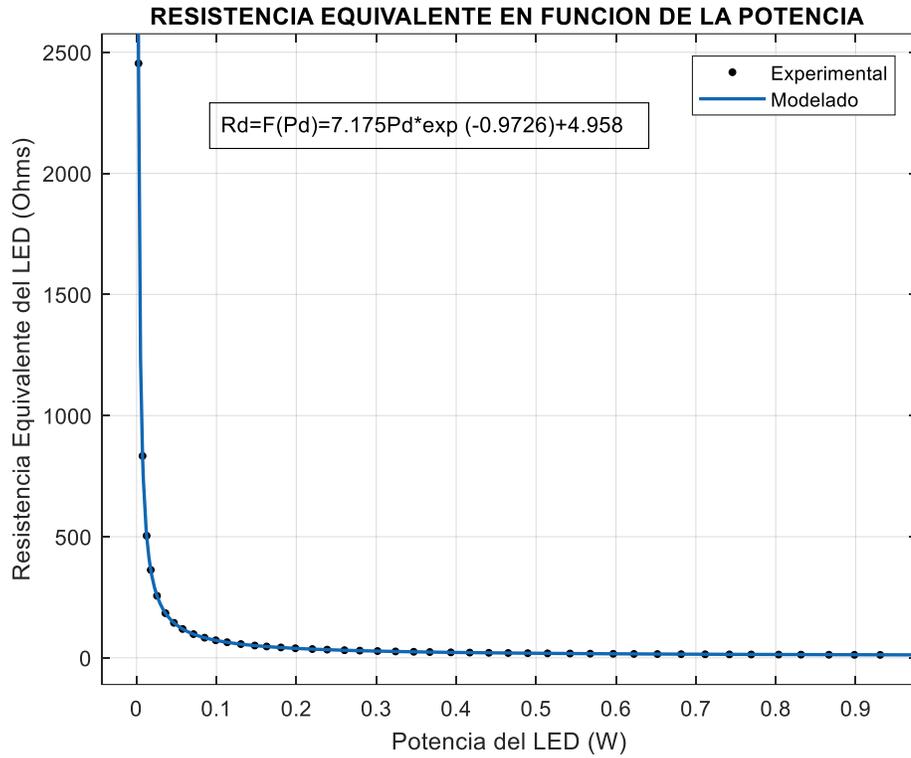


Figura 10. Resistencia equivalente en función de la potencia

Haciendo un ajuste paramétrico de curvas se llega a la siguiente expresión donde B_1 , B_2 y B_3 son constantes. Cuyo valor, son **7.175**, **-0.9726** y **4.958** respectivamente [5]. Donde B_3 viene dada en ohm (Ω), B_2 (sin unidad) y B_1 ohm/watts ($\frac{\Omega}{W}$).

$$R_D = f(p_{Dx}) = B_1 p_{Dx}^{B_2} + B_3 \quad (15)$$

El modelo propuesto fue implementado en Simulink®. El diagrama esquemático se muestra en la Figura 11. La resistencia equivalente es expresada por una función no lineal dependiente de la potencia [5].

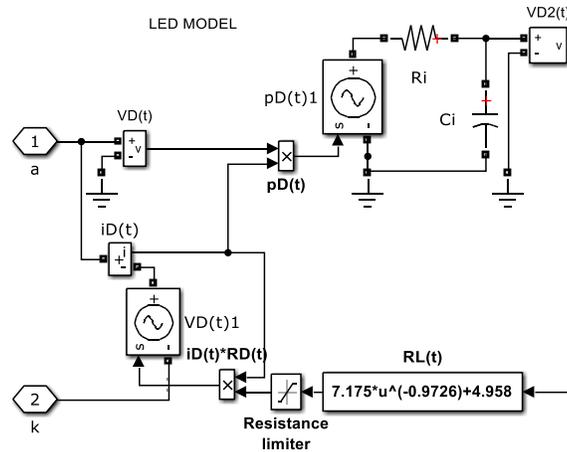


Figura 11. Modelo propuesto implementado en Simulink®.

Resultado

Como resultado de esta actividad se obtuvieron las ecuaciones no lineales de la resistencia equivalente del LED en función de la potencia. Esta ecuación fue obtenida por la herramienta “Curve Fitting Tool” de MATLAB®. También se hizo un análisis para fuente de entrada pulsante para lo cual se podrá modelar con la resistencia dinámica del LED.

Conclusión

Estas ecuaciones se extrapolarán a Simulink® para obtener el modelo eléctrico del LED. Esperando un porcentaje de error bajo en el modelo.

3.2 Modelo térmico

El proceso de calentamiento en los LEDs es causado por el efecto joule [27]. Se propone un modelo lineal de analogía eléctrica para modelar el comportamiento térmico que tenga el LED de potencia. El modelo se muestra en la Figura 12.

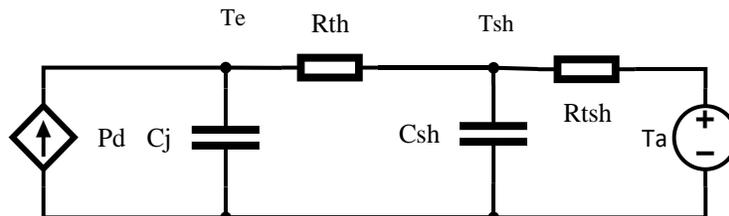


Figura 12. Modelo térmico.

Este circuito tiene un comportamiento dinámico para el dispositivo LED.

Donde:

P_d = Potencia disipada del LED
 C_j = Capacitancia termica de encapsulado
 R_{th} = Resistencia termica del encapsulado
 C_{sh} = Capacitancia termica del disipador
 R_{tsh} = Resistencia termica del disipador
 T_a = Temperatura ambiente

Si el LED está conectado a una fuente de energía. El calor es representado por la fuente de corriente. La temperatura de encapsulado (T_e) junto con la temperatura del disipador (T_{sh}) empezarán a incrementarse desde una temperatura inicial en este caso la ambiental (T_{amb}), hasta alcanzar una temperatura final de estado estacionario [27]. Este periodo de transiciones está dado por las constantes de tiempo térmicas que se expresan mediante las siguientes ecuaciones.

$$\tau_j = C_j * R_{th} \quad (16)$$

$$\tau_{hs} = C_{hs} * R_{tsh} \quad (17)$$

Cuando la potencia eléctrica es desconectada, las capacitancias térmicas se empiezan a descargar. Por lo tanto la temperatura de encapsulado y la del disipador comienzan a decaer hasta alcanzar la temperatura ambiente [27].

Haciendo un análisis del circuito propuesto se obtiene las siguientes ecuaciones tanto para estado estacionario como para estado dinámico.

$$P_d = C_j \frac{dT_e}{dt} + C_{sh} \frac{dT_{sh}}{dt} + \frac{T_{sh}}{R_{tsh}} \quad (18)$$

El calor que fluye a través de la resistencia térmica del encapsulado se puede expresar como:

$$P_d = \frac{\overline{T_{sh}} - \overline{T_e}}{R_{th}} \quad (19)$$

Donde $\overline{T_{sh}}$ y $\overline{T_e}$, son las temperaturas en el disipador y encapsulado respectivamente.

La ecuación dinámica térmica para la temperatura del encapsulado (T_e) se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{T_e - T_{sh}}{R_{th}} + C_j \frac{d(T_e)}{dt} = P_d \quad (20)$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtienen las siguientes expresiones:

$$T_e = (R_{th} * P_d) \left(1 - e^{-\frac{t}{C_j R_{th}}} \right) + T_{sh} \quad t > 0 \quad (21)$$

$$T_{sh} = (R_{tsh} * P_d) \left(1 - e^{-\frac{t}{C_{sh} R_{tsh}}} \right) + T_a \quad t > 0 \quad (22)$$

Cuando se alcanza el estado estacionario, la ecuación anterior se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_e - T_{sh} = R_{th} * P_d \quad (23)$$

$$R_{th} = \frac{\overline{T_e} - \overline{T_{sh}}}{P_d} \quad (24)$$

Donde $\overline{T_e}$ es la temperatura de valor medio en el encapsulado del LED en estado estacionario. Para el cálculo de la resistencia térmica en el disipador se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$R_{tsh} = \frac{\overline{T_{sh}} - T_a}{P_d} \quad (25)$$

Donde $\overline{T_{sh}}$ es la temperatura de valor medio en el disipador en estado estacionario.

Resultado

Como resultado de este análisis se obtuvieron las ecuaciones del modelo térmico del LED. Las cuales servirán para calcular las resistencias térmicas tanto de encapsulado como del disipador, las capacitancias caloríficas y las constantes de tiempo respectivas.

Conclusión

Con los valores obtenidos de las ecuaciones. Se procederá a simular el modelo térmico de analogía eléctrica. Esperando obtener buenos resultados con un porcentaje de error bajo en el modelo.

3.3 Modelo eléctrico-térmico propuesto

Se propuso un modelo en Simulink®, el cual complementa el modelo presentado en [5]. Anexándole a este la parte térmica presentada anteriormente. Debido a que las temperaturas en el LED causan una variación en sus curvas características. Estas se modelaron en MATLAB®, obteniendo una función de voltaje dependiente de la temperatura ambiente. Esta función matemática se obtuvo por medio de la herramienta “Curve Fitting Tool” de MATLAB®. Esta función se muestra a continuación.

$$\Delta V_f = f(t_a) = (0.09518e^{(-0.02007T_a)} - 0.07474) \quad (26)$$

Donde ΔV_f es el incremento y decremento de la *tensión de umbral* de encendido del LED. Y T_a es el valor de temperatura ambiente a la cual está operando el LED para el modelo los valores van desde -30°C a 60°C .

La tensión de umbral se define como la tensión mínima a la cual el LED opera con una mínima corriente de polarización la cual hace que empiece a hacerse visible la luz que se emite dentro de la unión *pn*.

Esta ecuación nos da el desplazamiento de las curvas I-V en función de la temperatura ambiente. Tomando como referencia la temperatura ambiente de la ciudad de Cuernavaca (25°C) donde el resultado de esta ecuación es aproximadamente igual a 0.

Donde (t_a) es la temperatura ambiente. Esta función matemática se extrapoló a Simulink®. A continuación, se muestra el modelo completo hecho en Simulink® en la Figura 13.

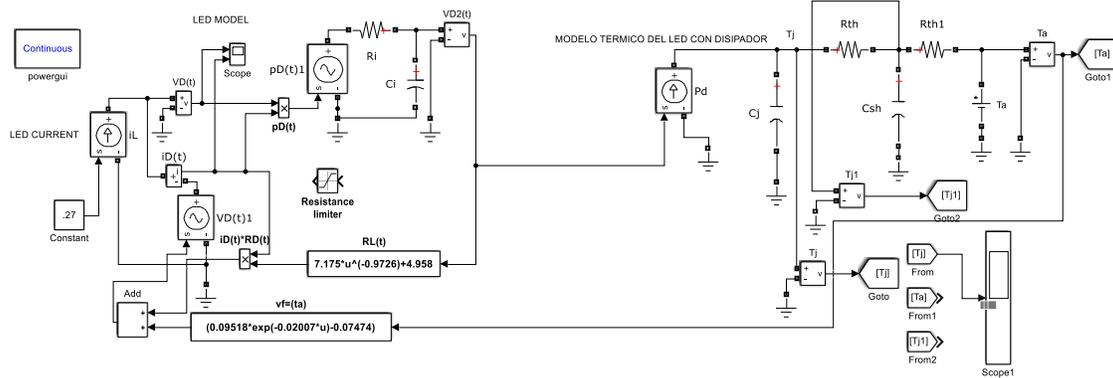


Figura 13. Modelo electro-térmico en Simulink®.

Conclusión

Se simuló el modelo propuesto en Simulink® obteniendo los resultados esperados. En este modelo ya se incluyen efectos de temperatura, así como mediciones de temperatura de encapsulado y de disipador. Además de que se da una aportación con la ecuación no lineal del voltaje de umbral en el LED de potencia.

3.4 Modelo eléctrico (12 LEDs)

En el modelo presentado anteriormente solo se modelaba un solo LED de potencia, se tomó la decisión de modelar todo un arreglo de LEDs conectados en serie (12 LEDs). Con esto esta investigación cobra más relevancia, ya que en la literatura hay muy pocos artículos donde se modelan arreglos completos de LEDs. En la mayoría de los artículos solo se modela un solo LED. Pero en este modelo también es válido para arreglos de LEDs, siendo este el único en su tipo que toma en cuenta la resistencia equivalente y el voltaje de umbral en función de la temperatura ambiente.

Haciendo mediciones experimentales a temperatura ambiente se obtiene la siguiente gráfica de resistencia equivalente en función de la potencia del LED.

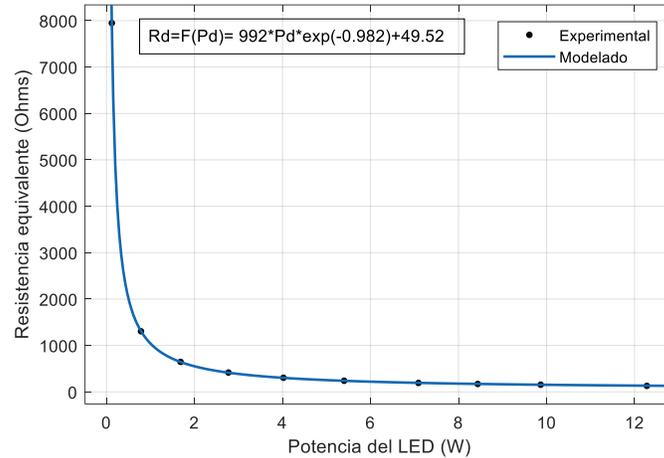


Figura 14. Resistencia equivalente en función de la potencia (12 LEDs).

Haciendo un ajuste paramétrico de curvas se llega a la siguiente expresión donde **B1**, **B2** y **B3** son constantes. Cuyo valor, son **992**, **-0.982** y **49.52** respectivamente [5]. Donde **B3** viene dada en ohm (Ω), B2 (sin unidad) y B1 en ohm/watts ($\frac{\Omega}{W}$).

$$R_D = f(p_{Dx}) = B_1 p_{Dx}^{B_2} + B_3 \quad (27)$$

Con base a esta ecuación no lineal se simulará el modelo aplicado ahora a 12 LEDs que forman todo el encapsulado con el que se está trabajando. Con el modelo para 12 LEDs se podrá medir corriente y voltaje en el LED en cualquier punto de operación.

3.5 Modelo Térmico (12 LEDs)

Los datos experimentales se procesaron en MATLAB®. Por medio de estos se calculó las capacitancias térmicas tanto de junta como de encapsulado, así como también las resistencias térmicas del modelo. Las ecuaciones para hacer este cálculo se muestran a continuación.

Para calcular las resistencias térmicas se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$R_{th12} = \frac{\overline{T_e} - \overline{T_{sh}}}{P_d} / 12 \quad (28)$$

$$R_{tsh} = \frac{T_{sh} - T_a}{P_d} / 12 \quad (29)$$

$$R_{th} = 0.87489 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (30)$$

Debido a que los LEDs están conectados todos sobre un mismo disipador de calor, la resistencia térmica de encapsulado sigue siendo la misma tanto para un LED como par n LEDs. Siempre y cuando estén conectados sobre un mismo encapsulado [23].

$$R_{tsh} = 0.85421535 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (31)$$

Para calcular las capacitancias térmicas se utilizaron las constantes de tiempo, considerando los resultados obtenidos anteriormente de las resistencias térmicas y que la temperatura a una constante de tiempo es igual a aproximadamente 0.63% de la temperatura en estado estable. Todo esto se hizo con las siguientes ecuaciones.

Las capacitancias térmicas de los LEDs están conectadas en serie, por lo tanto, se dividen entre el número de n LEDs [23].

Donde n es igual a 12.

$$C_j = \frac{\tau_j / R_{th}}{12} \quad (32)$$

$$C_{sh} = \frac{\tau_{sh} / R_{tsh}}{12} \quad (33)$$

Haciendo un promedio de las pequeñas variaciones de las capacitancias térmicas obtenidas en cada uno de los experimentos se obtuvieron los siguientes resultados.

$$C_j = \frac{0.009}{12} = 0.00075 \text{ J}/^\circ\text{C} \quad (34)$$

Como los LEDs están montados sobre un mismo disipador el valor de la capacitancia térmica es el mismo para n LEDs.

$$C_{sh} = \frac{0.4}{12} = 0.0333 \text{ J/}^\circ\text{C} \quad (35)$$

Conclusión

Se calcularon los valores de resistencias y capacitancias térmicas para el funcionamiento del modelo con 12 LEDs. Con estos valores se espera simular térmica y eléctricamente el modelo.

4. Resultados experimentales y modelados

4.1 Metodología para el desarrollo de pruebas

Para poder realizar las pruebas dentro de la cámara ambiental se vio la necesidad de contar con un protocolo de pruebas. En el cual contendría en forma de diagrama de flujo los pasos a seguir para realizar las mediciones correctamente. Este protocolo de pruebas se puede consultar en el anexo 01.

4.2 Simulación del modelo

4.2.1 Simulación térmica

El modelo térmico propuesto fue implementado en Simulink®. El diagrama se muestra en la Figura 15. Este modelo es lineal de analogía eléctrica.

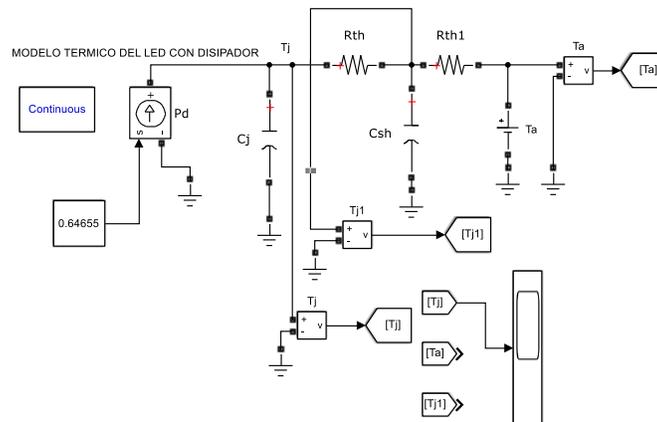


Figura 15. Modelo térmico propuesto implementado en Simulink®.

Donde:

P_d es la potencia disipada del LED

C_e es la capacitancia calorífica de encapsulado en el LED

C_{sh} es la capacitancia calorífica del disipador

T_a es la temperatura ambiente

T_e es la temperatura del encapsulado

T_{sh} es la del disipador

La fuente de corriente (P_d) es usada para representar la potencia disipada del LED durante su operación. Los sensores de voltaje (T_{sh}), (T_e) y (T_a), son usados para sensar la temperatura del disipador, encapsulado y ambiental.

Resultados de simulación.

En la Figura 16 se muestra la temperatura de encapsulado con respecto al tiempo. Como puede observarse la temperatura va aumentando hasta alcanzar el estado estable esto debido al capacitor que representa la capacitancia calorífica de encapsulado.

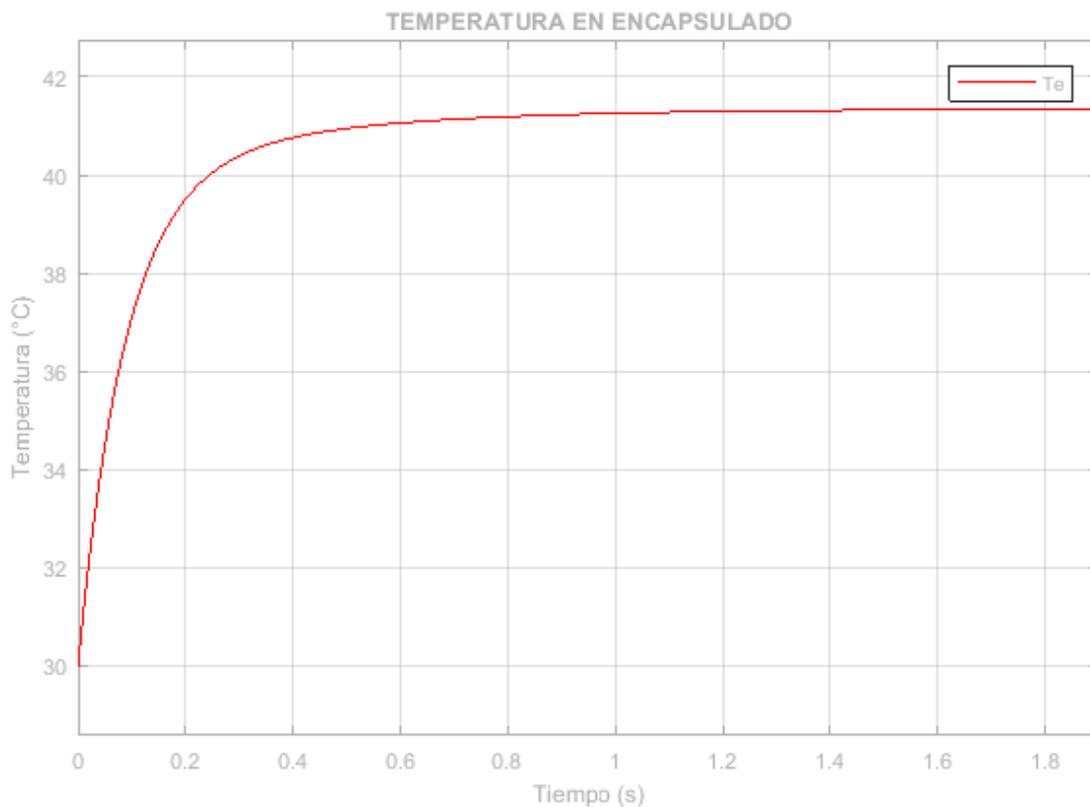


Figura 16. Temperatura en el encapsulado.

En la Figura 17 se muestra la temperatura del disipador de calor con respecto al tiempo. Se observa que la temperatura va aumentando hasta alcanzar el estado estable esto se debe a la capacitancia calorífica del disipador.

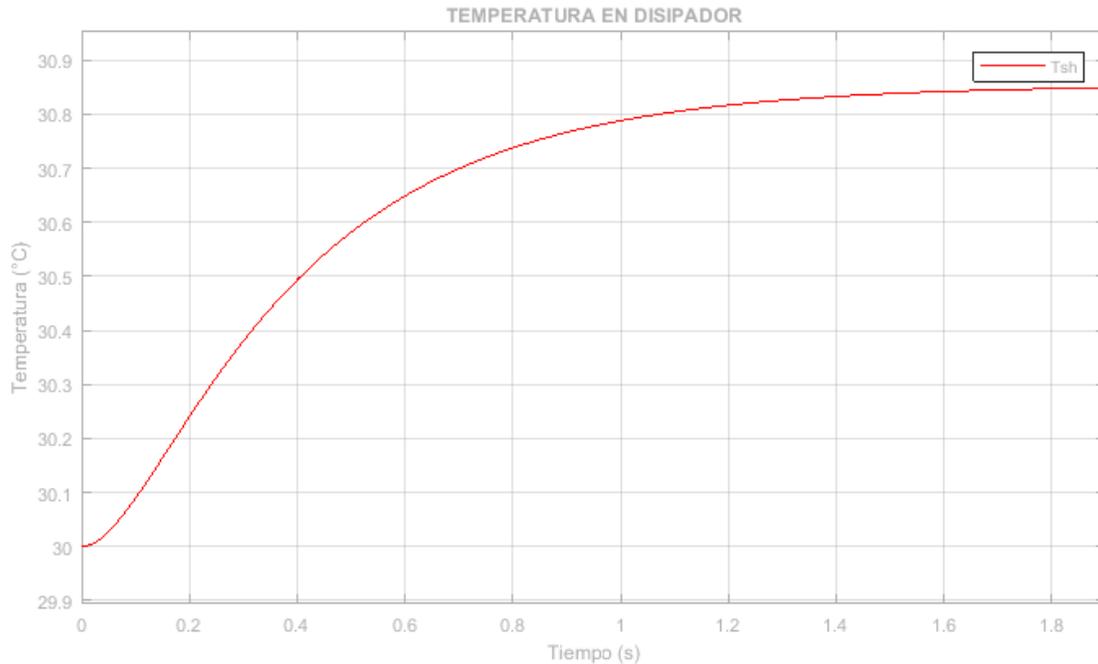


Figura 17. Temperatura en el disipador.

Conclusión

Cabe mencionar que los datos de las resistencias térmicas para esta simulación se extrajeron de una hoja de datos de un LED de potencia. En el modelo propuesto se obtendrán valores propios de las resistencias térmicas y las capacitancias térmicas con bases en mediciones de temperatura, dentro de un ambiente controlado por una cámara ambiental.

4.2.2 Simulación electro-térmica

La ecuación de Shockley es comúnmente usada para modelar físicamente el comportamiento del diodo, y se aplica para modelar el comportamiento de un LED [9]. Esta ecuación varía con respecto a la temperatura de juntura en el LED.

A mayores temperaturas el voltaje de umbral o de “rodilla” (V_f) tiende a disminuir en el encendido y viceversa a menor temperatura el voltaje de umbral tiende a aumentar. Esto debido a los efectos de la temperatura en las uniones semiconductoras al interior del LED [28].

Donde ΔVf es el incremento y decremento de la *tensión de umbral* de encendido del LED, ta es el valor de temperatura ambiente a la cual está operando el LED para el modelo los valores van desde -30°C a 60°C.

La tensión de umbral se define como la tensión mínima a la cual el LED opera con una mínima corriente de polarización la cual hace que empiece a hacerse visible la luz que se emite dentro de la unión *pn*.

En la se muestra el modelo eléctrico – térmico hecho en Simulink®.

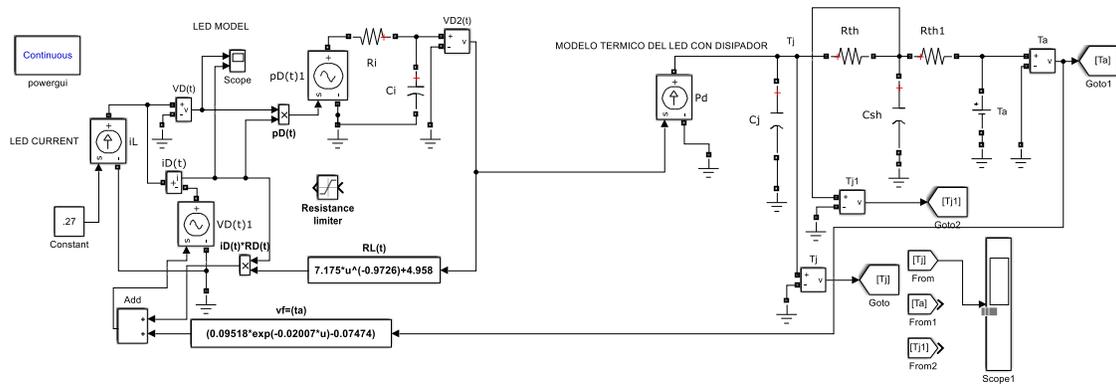


Figura 18. Modelo eléctrico- térmico.

Conclusión

Se obtuvieron los datos experimentales de temperaturas de encapsulado y de disipador. Estas curvas tienen el comportamiento esperado de un circuito RC. Por lo tanto, el modelo térmico propuesto funcionará en simulación.

4.3 Caracterización eléctrica

4.3.1 Resultados electro térmicos

El LED fue sometido a un ambiente controlado por medio de una cámara ambiental *Cincinnati Sub-Zero MCH-3-.33-.33-H/AC*. El rango de temperaturas al que fue sometido el LED es de -30°C a 60°C.

El módulo del LED puesto bajo prueba es el modelo *LMT-P12W-77-N*. La implementación de estas pruebas se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables del CENIDET. En la Figura 19 Figura 20 se muestra esta implementación.

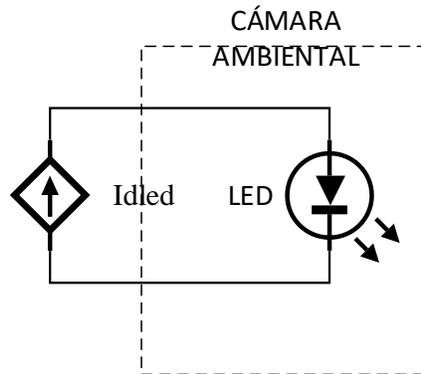


Figura 19. Esquema de prueba.



Figura 20. Dispositivo LED dentro de la cámara ambiental.

Las mediciones de voltaje, corriente y temperatura se realizaron conforme al protocolo de pruebas presentado en el anexo 01.

Los resultados experimentales son almacenados en una base de datos en Excel. En la Figura 21 se muestran las curvas I-V obtenidas experimentalmente en un rango de $-30^{\circ} < T_a < 60^{\circ}$ C.

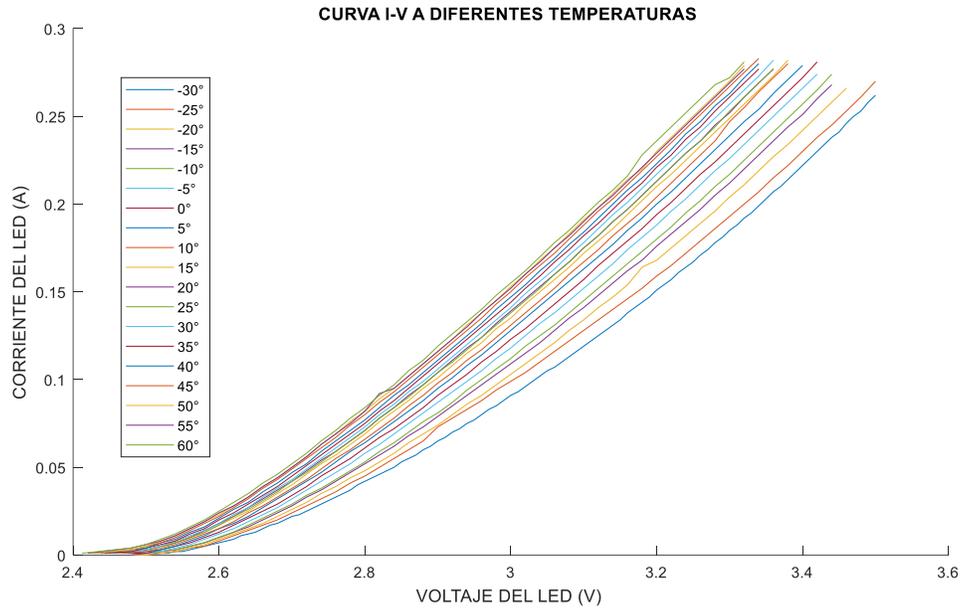


Figura 21. Curvas I-V del LED a diferentes temperaturas.

En la temperatura. Se puede observar claramente como las curvas se van “desplazando” con respecto a la temperatura ambiente a la que se expone el LED. A mayor temperatura de unión (T_j) la corriente del LED (I_D) aumenta y el voltaje de umbral (V_f) disminuye. Esto debido a las propiedades semiconductoras del LED [28].

Conclusión

Se caracterizó térmicamente el LED. Donde se obtuvo como resultado una familia de curvas del LED a diferentes temperaturas y corrientes de operación. El desplazamiento de las curvas son los que se esperaban conforme a la simulación.

4.3.2 Resultados experimentales y modelados

Los datos de las curvas I-V a diferentes temperaturas modelados y experimentales, se graficaron. Esto se muestra en la Figura 22 y Figura 23.

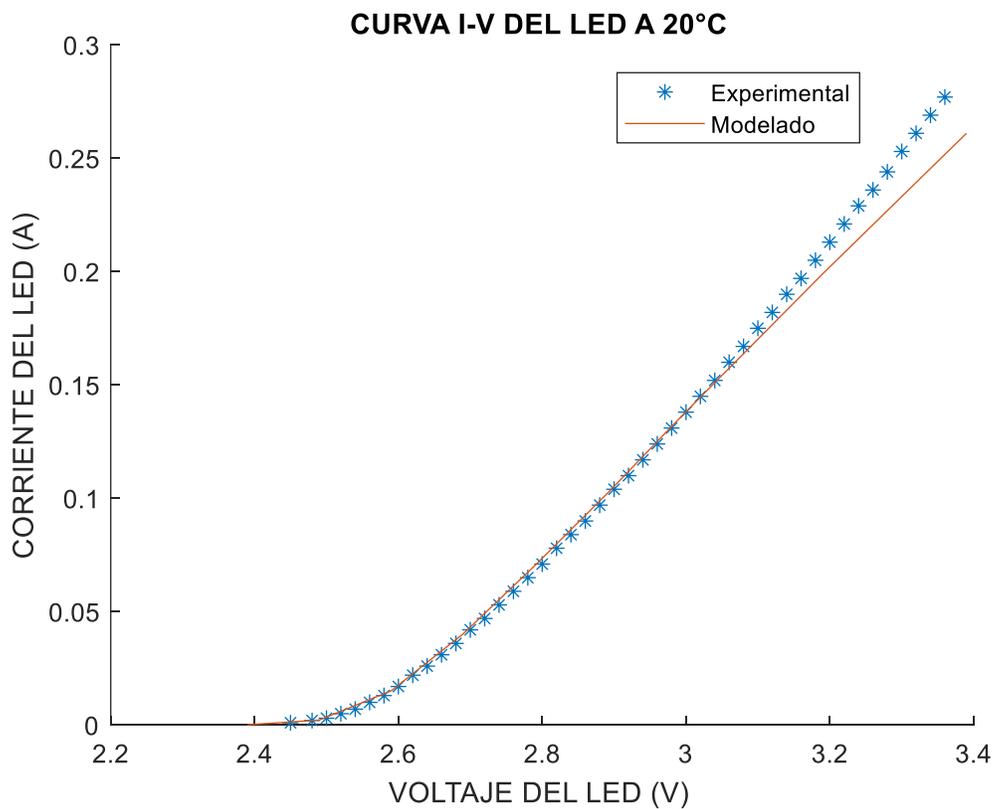


Figura 22. Resultados experimentales y modelados (20°C)

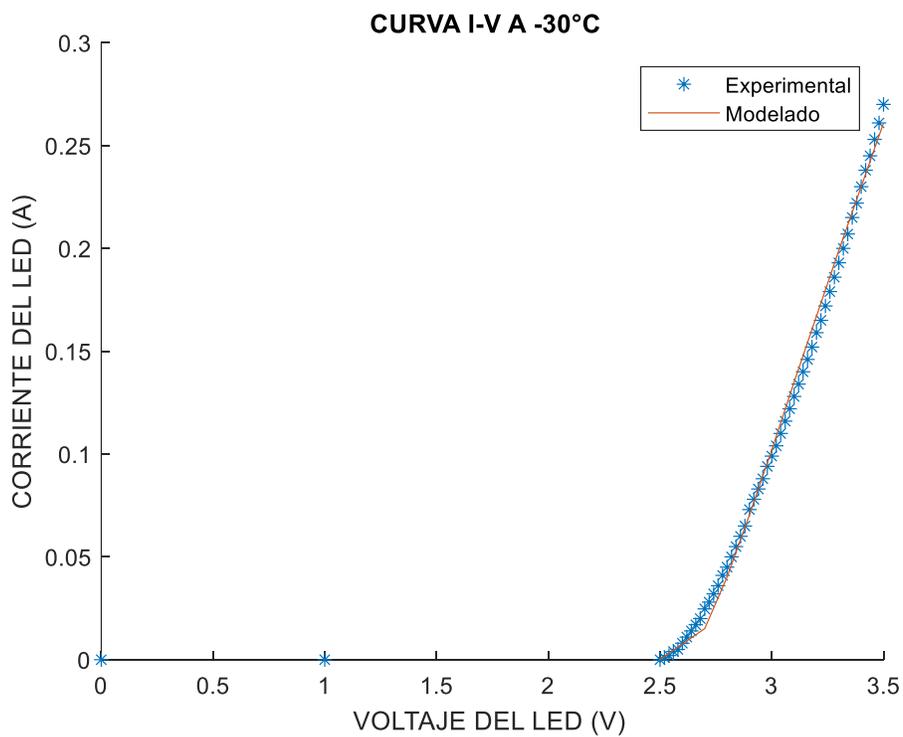


Figura 23. Resultados experimentales y modelados (-30°C)

Conclusión

En estas curvas se puede observar que el modelo tiene buenos resultados conforme a los datos experimentales. En estos ejemplos se tienen porcentajes de error calculados de $\mp 3.9344\%$ y ∓ 2.1752 . Los cuales son porcentajes bajos.

4.4 Caracterización térmica

Introducción

El LED se introdujo a la cámara ambiental *Cincinnati Sub-Zero MCH-3-.33-.33-H/AC*. El rango de temperaturas al que fue sometido el LED es de -30°C a 60°C . El módulo del LED puesto bajo prueba es el modelo *LMT-P12W-77-N*. El LED se encendió a tres diferentes potencias, (0.25w, 0.5w y 1w). Bajo un rango de operación desde -30°C hasta $+60^{\circ}\text{C}$.

Resultados

Por medio del Software de MATLAB® se obtuvieron las curvas características de temperatura medidos en el disipador y en el encapsulado del LED. Se muestra en la Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

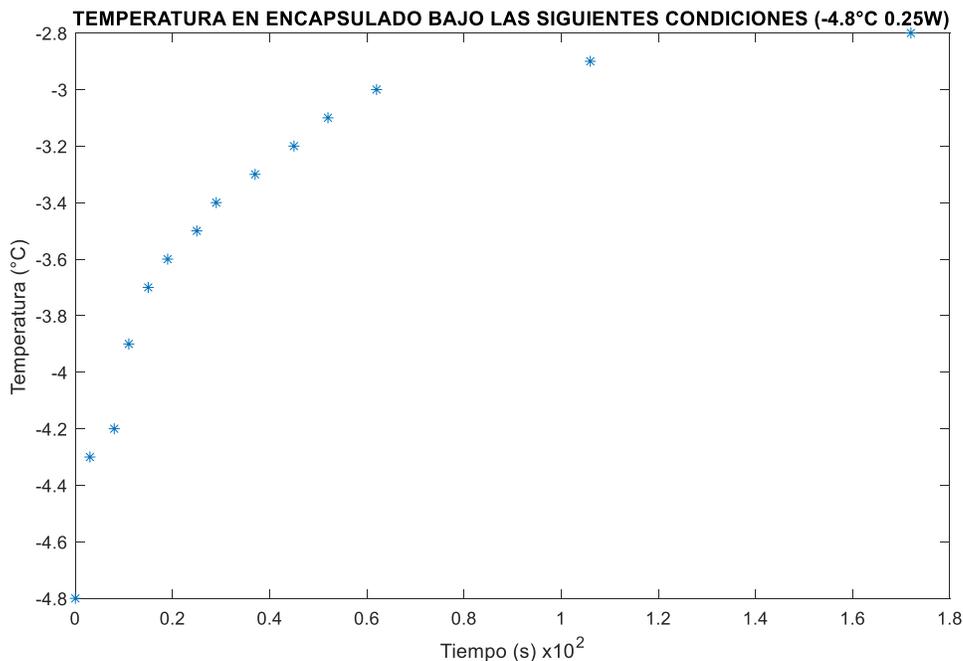


Figura 24. Curva térmica en encapsulado del LED a -5°C .

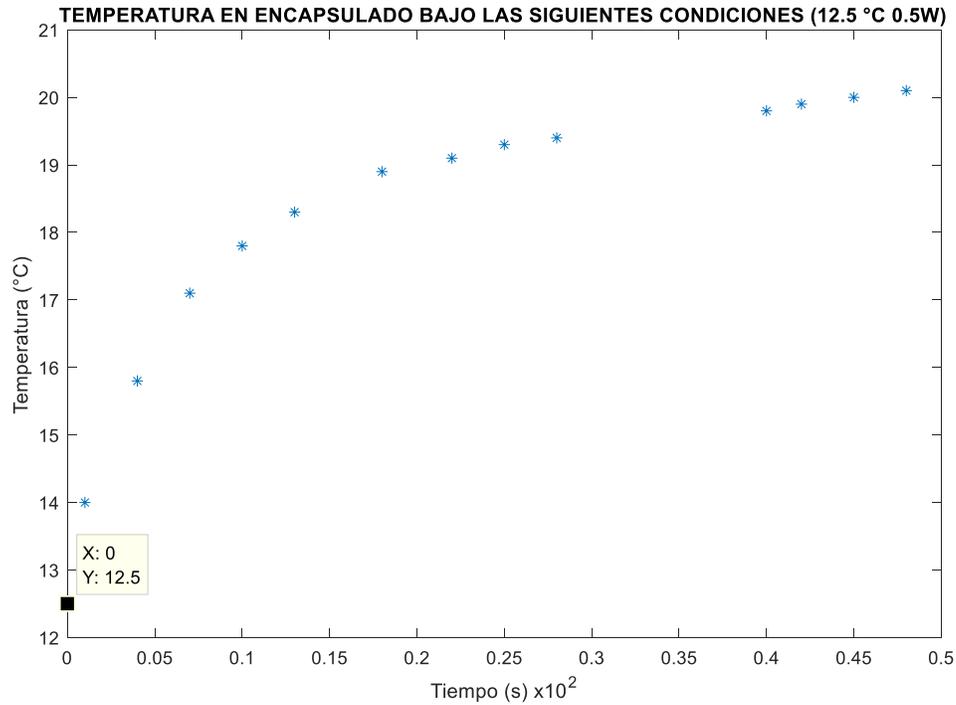


Figura 25. Curva térmica en encapsulado del LED a 12.5°C.

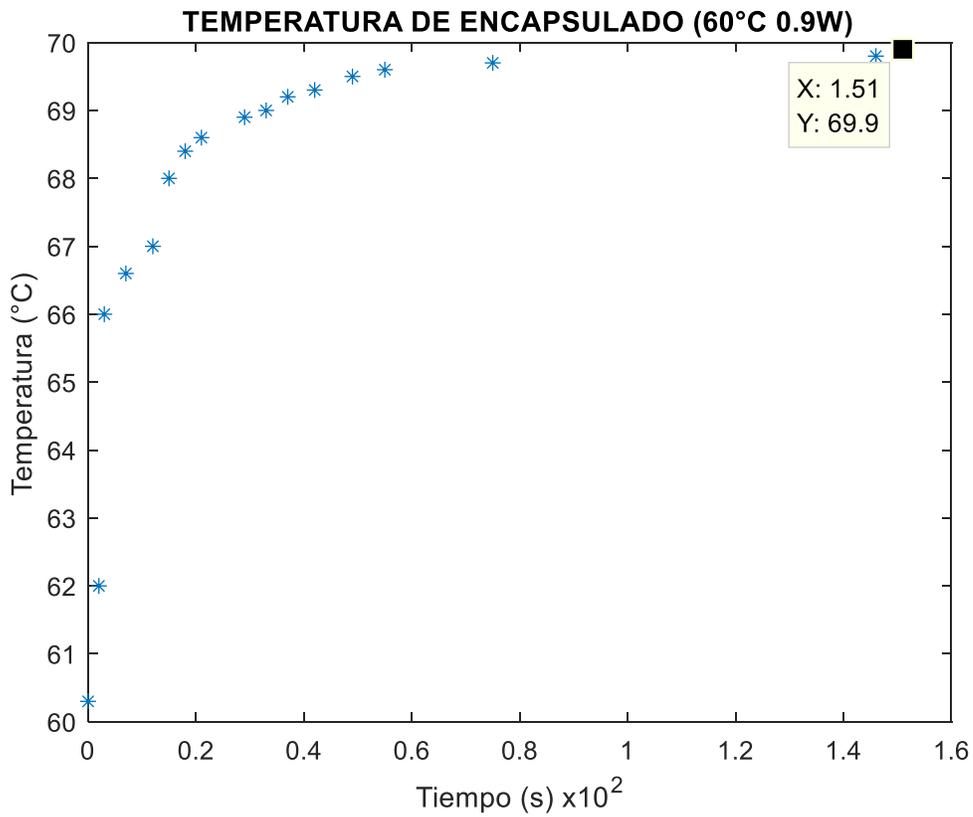


Figura 26. Curva térmica en encapsulado del LED a 60°C.

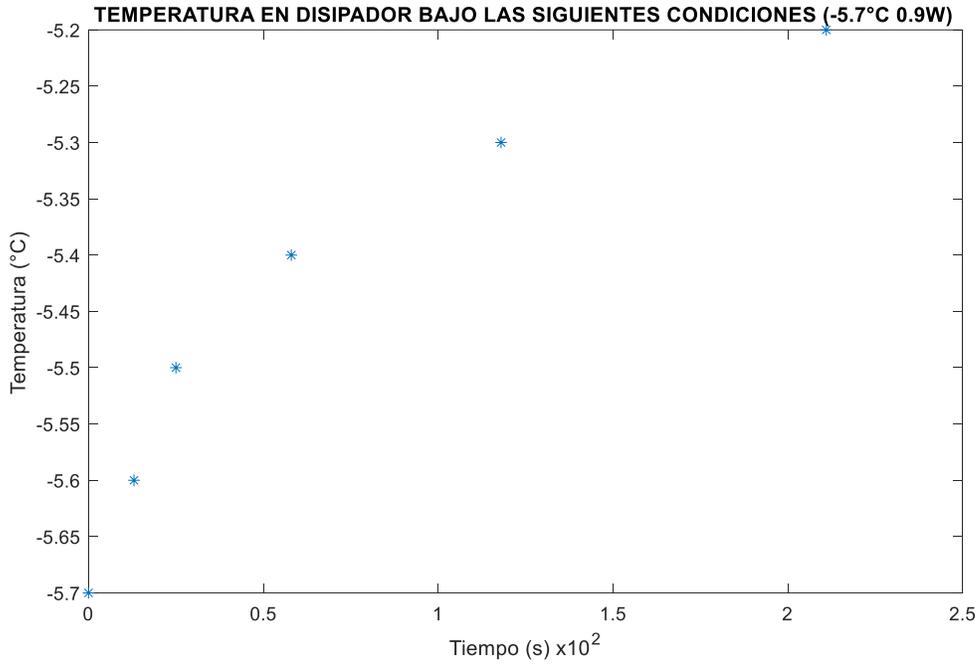


Figura 27. Curva térmica en disipador del LED a -5.7°C.

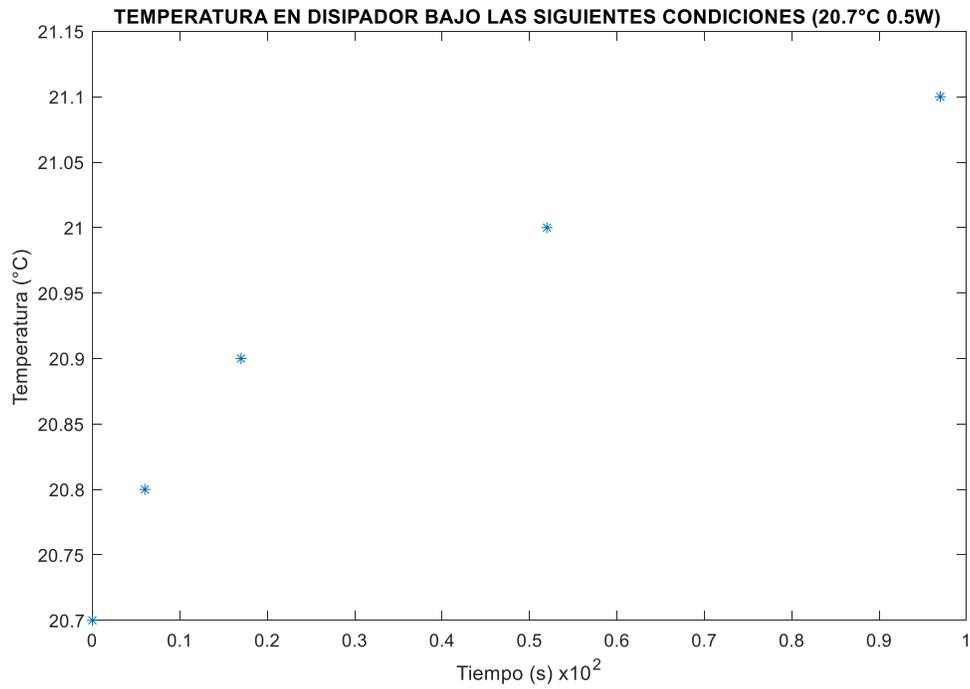


Figura 28. Curva térmica en disipador del LED a 20.7°C

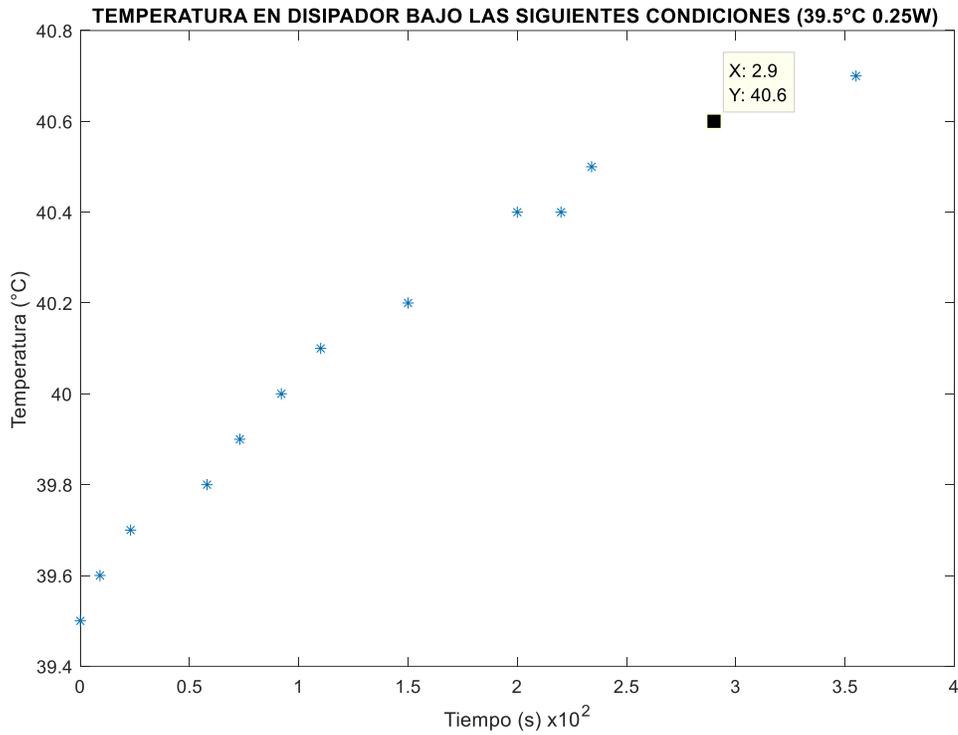


Figura 29. Curva térmica en disipador del LED a 39.5°C.

Conclusión

Se obtuvieron los datos experimentales de temperaturas de encapsulado y de disipador. Estas curvas tienen el comportamiento esperado de un circuito RC. Por lo tanto, el modelo térmico propuesto funcionará simulación.

4.5 Resultados

Se obtuvieron los resultados de temperatura medidos en el disipador y en el encapsulado, se compararon con los resultados de simulación y se calculó el margen de error. Se muestran algunos ejemplos en la Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34.

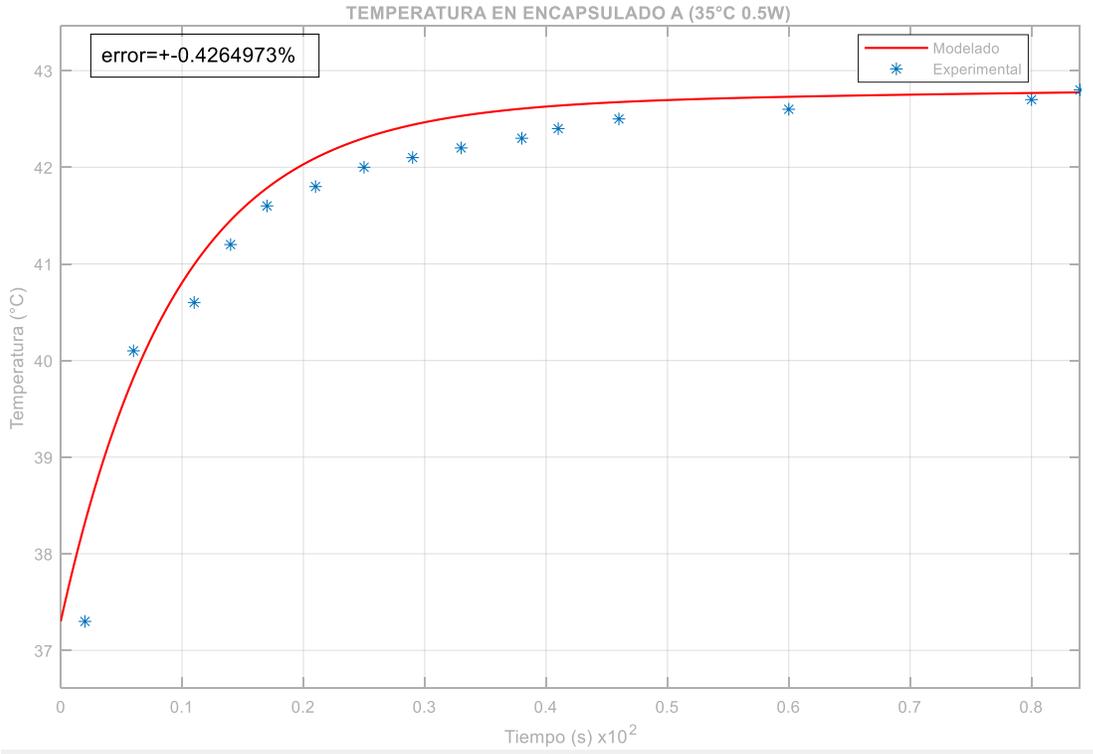


Figura 30. Temperatura en encapsulado (35°C 0.5W).

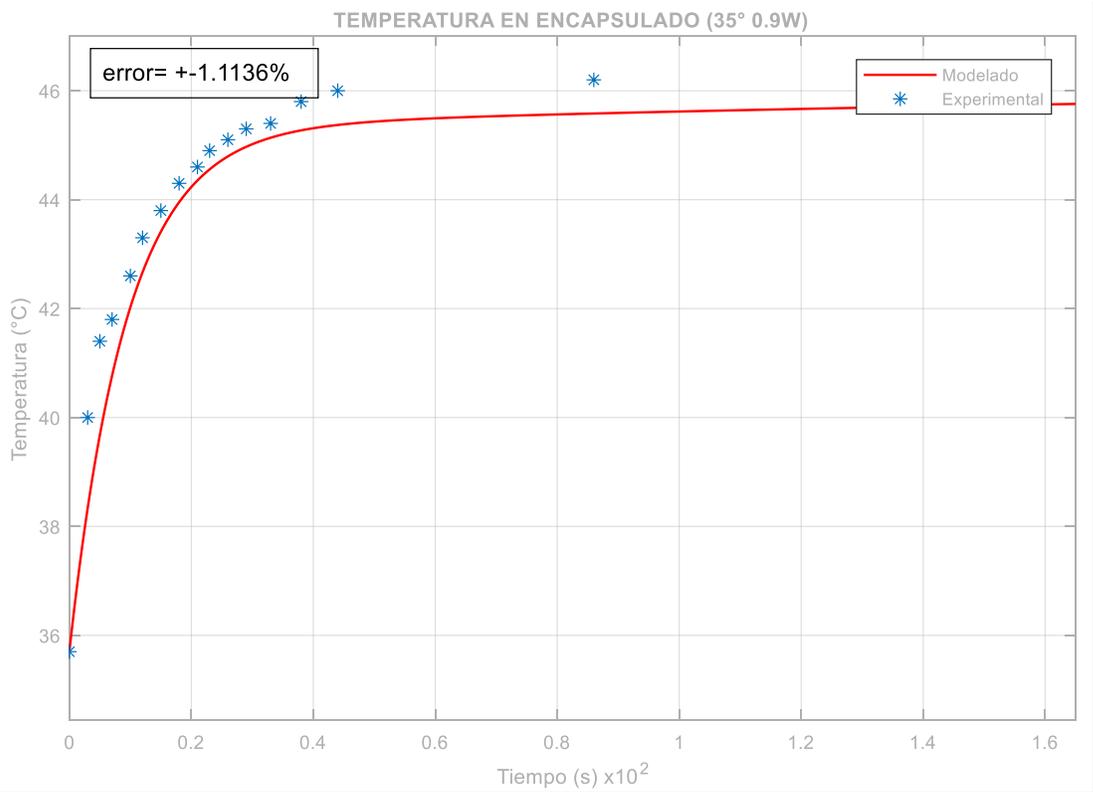


Figura 31. Temperatura en encapsulado (35°C 0.9W).

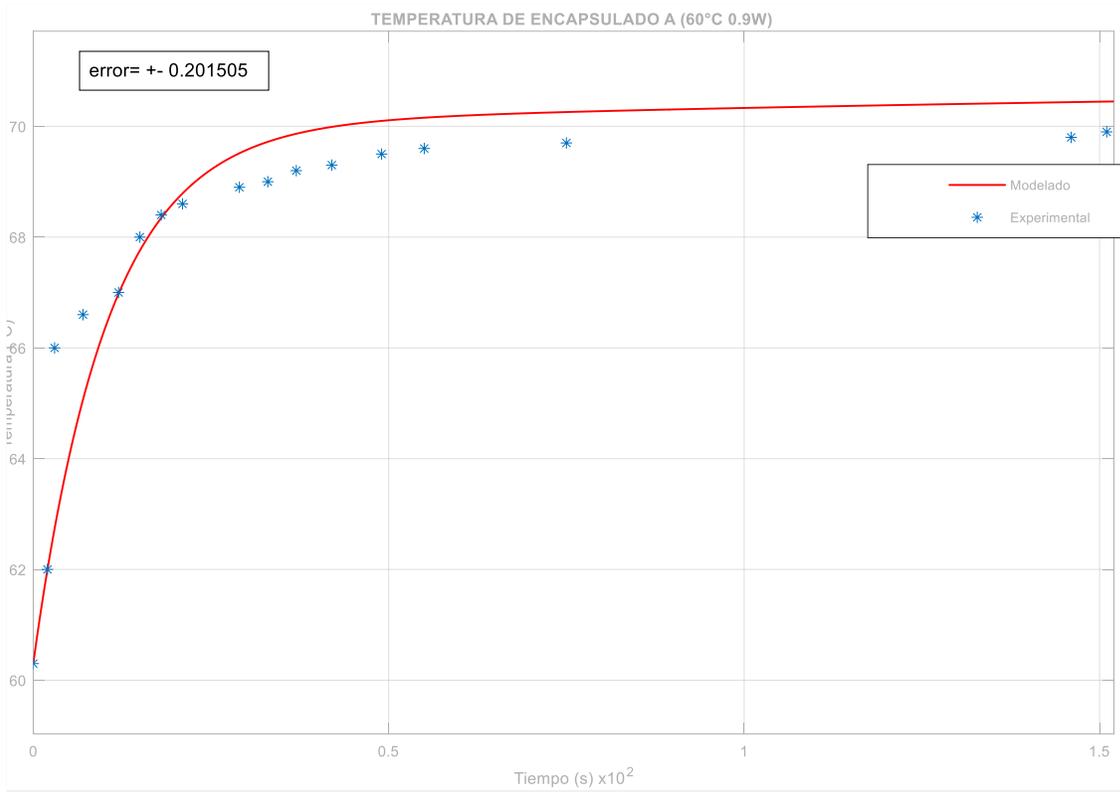


Figura 32. Temperatura en encapsulado (60°C 0.9W).

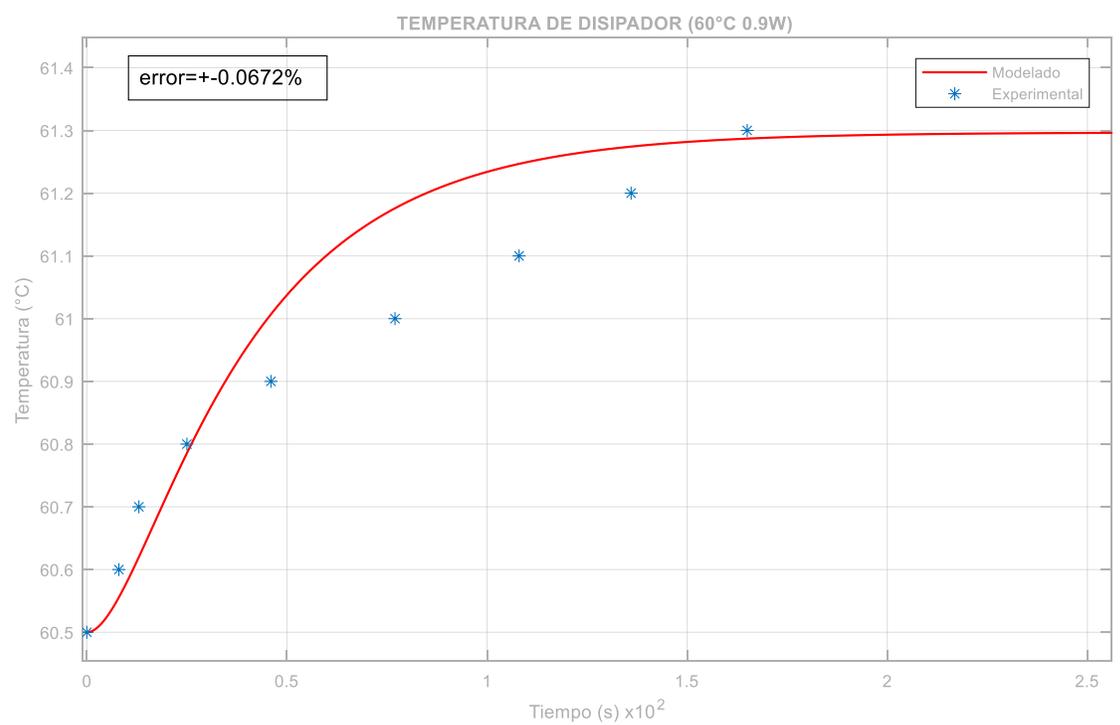


Figura 33. Temperatura en disipador (60°C 0.9W).

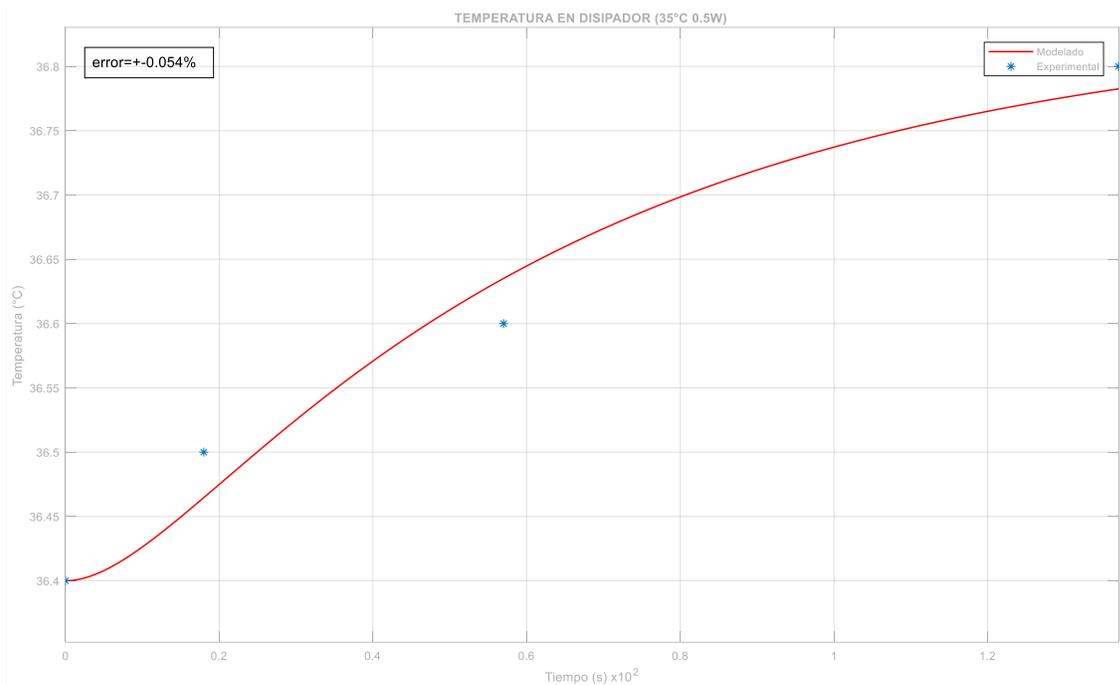


Figura 34. Temperatura en disipador (35°C 0.5W).

Conclusión

Se graficaron por medio de MATLAB® las curvas térmicas simuladas y modeladas. En estas curvas se puede observar que el modelo tiene buenos resultados conforme a los datos experimentales. En estos ejemplos se tienen porcentajes de error bajos.

4.6 Modelo eléctrico (12 LEDs)

Introducción

En el modelo presentado anteriormente solo se modelaba un solo LED de potencia, se tomó la decisión de modelar todo un arreglo de LEDs conectados en serie (12 LEDs). Con esto esta investigación cobra más relevancia, ya que en la literatura hay muy pocos artículos donde se modelan arreglos completos de LEDs. En la mayoría de los artículos solo se modela un solo LED. Pero en este modelo también es válido para arreglos de LEDs, siendo este el único en su tipo que toma en cuenta la resistencia equivalente y el voltaje de umbral en función de la temperatura ambiente.

Haciendo mediciones experimentales a temperatura ambiente se obtiene la siguiente grafica de resistencia equivalente en función de la potencia del LED.

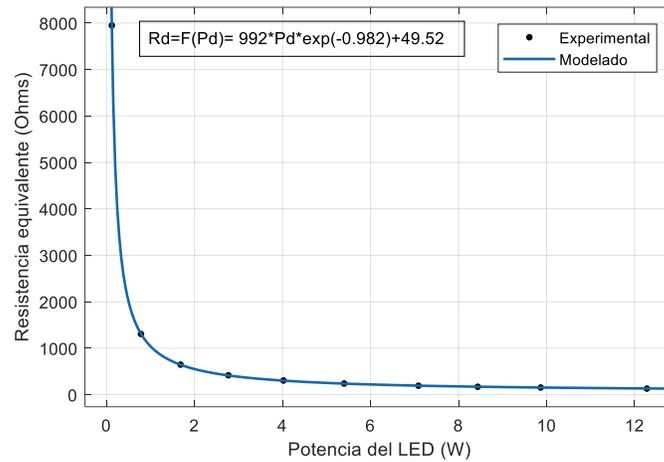


Figura 35. Resistencia equivalente en función de la potencia (12 LEDs)

Haciendo un ajuste paramétrico de curvas se llega a la siguiente expresión donde $B1$, $B2$ y $B3$ son constantes. Cuyo valor, son **992**, **-0.982** y **49.52** respectivamente [5]. Donde $B3$ viene dada en ohm (Ω), $B2$ (sin unidad) y $B1$ ohm/watts ($\frac{\Omega}{W}$).

$$R_D = f(p_{Dx}) = B_1 p_{Dx}^{B_2} + B_3 \quad (36)$$

Conclusión

Con base a esta ecuación no lineal se simulará el modelo aplicado ahora a 12 LEDs que forman todo el encapsulado con el que se está trabajando. Con el modelo para 12 LEDs se podrá medir corriente y voltaje en el LED en cualquier punto de operación.

4.7 Modelo térmico (12 LEDs)

A continuación, se presenta un análisis matemático del modelo térmico aplicado a 12 LEDs conectados en serie. Los datos experimentales se procesaron en MATLAB®. Por medio de estos se calculó las capacitancias térmicas tanto de junta como de encapsulado, así como también las resistencias térmicas del modelo. Las ecuaciones para hacer este cálculo se muestran a continuación.

Para calcular las resistencias térmicas se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$R_{th12} = \frac{T_e - T_{sh}}{Pd} / 12 \quad (37)$$

$$R_{tsh} = \frac{T_{sh} - T_a}{Pd} / 12 \quad (38)$$

$$R_{th} = 0.87489 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (39)$$

Debido a que los LEDs están conectados todos sobre un mismo disipador de calor, la resistencia térmica de encapsulado sigue siendo la misma tanto para un LED como par n LEDs. Siempre y cuando estén conectados sobre un mismo encapsulado.

$$R_{tsh} = 0.85421535 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (40)$$

Para calcular las capacitancias térmicas se utilizaron las constantes de tiempo, considerando los resultados obtenidos anteriormente de las resistencias térmicas y que la temperatura a una constante de tiempo es igual a aproximadamente 0.63% de la temperatura en estado estable. Todo esto se hizo con las siguientes ecuaciones.

Las capacitancias térmicas de los LEDs están conectadas en serie, por lo tanto, se dividen entre el número de n LEDs.

Donde n es igual a 12.

$$C_j = \frac{\tau_j / R_{th}}{12} \quad (41)$$

$$C_{sh} = \frac{\tau_{sh} / R_{tsh}}{12} \quad (42)$$

Haciendo un promedio de las pequeñas variaciones de las capacitancias térmicas obtenidas en cada uno de los experimentos se obtuvieron los siguientes resultados.

$$C_j = \frac{0.009}{12} = 0.00075 J/^\circ C \quad (43)$$

Como los LEDs están montados sobre un mismo disipador el valor de la capacitancia térmica es el mismo para n LEDs.

$$C_{sh} = \frac{0.4}{12} = 0.0333 J/^\circ C \quad (44)$$

Conclusión

Se calcularon los valores de resistencias y capacitancias térmicas para el funcionamiento del modelo con 12 LEDs. Con estos valores se espera simular térmica y eléctricamente el modelo.

4.8 Resultados eléctricos experimentales y modelados (12 LEDs)

Se sometió bajo prueba todo el encapsulado. En un rango de voltajes de 24 a 31 V. Los resultados experimentales se fueron almacenando en una base de datos en Excel. En la Figura 36. se muestra las curvas I-V obtenidas experimentalmente en un rango de $-30^\circ < T_a < 60^\circ$ centígrados.

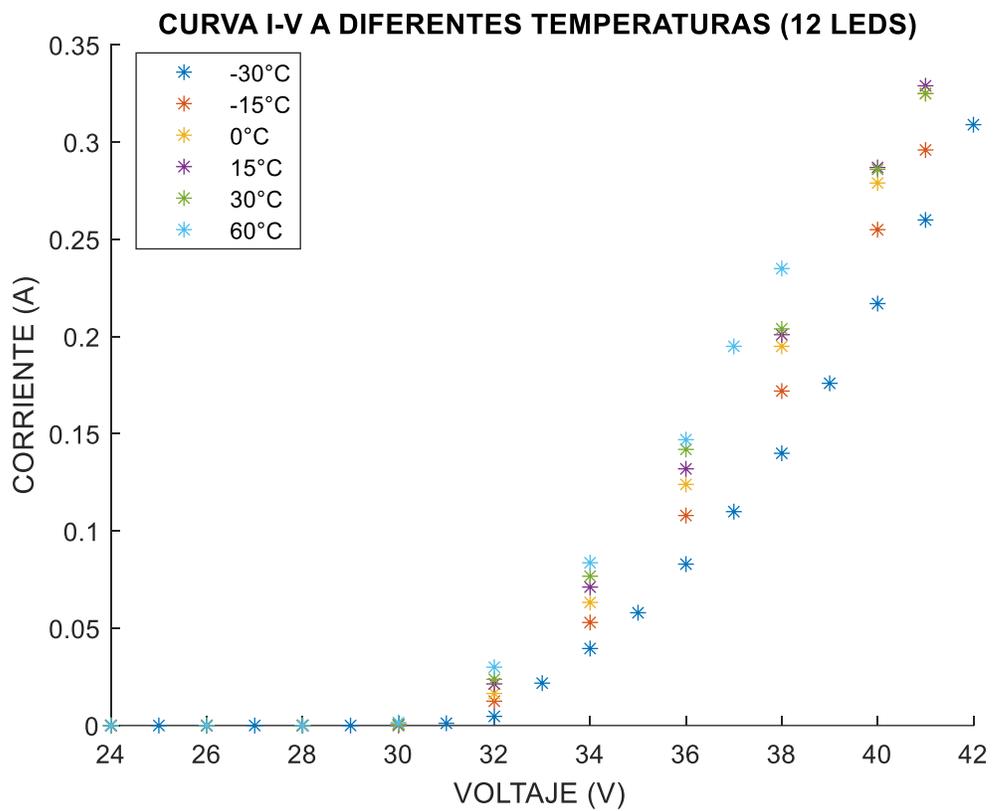


Figura 36. Curvas I-V a diferentes temperaturas (12 LEDs).

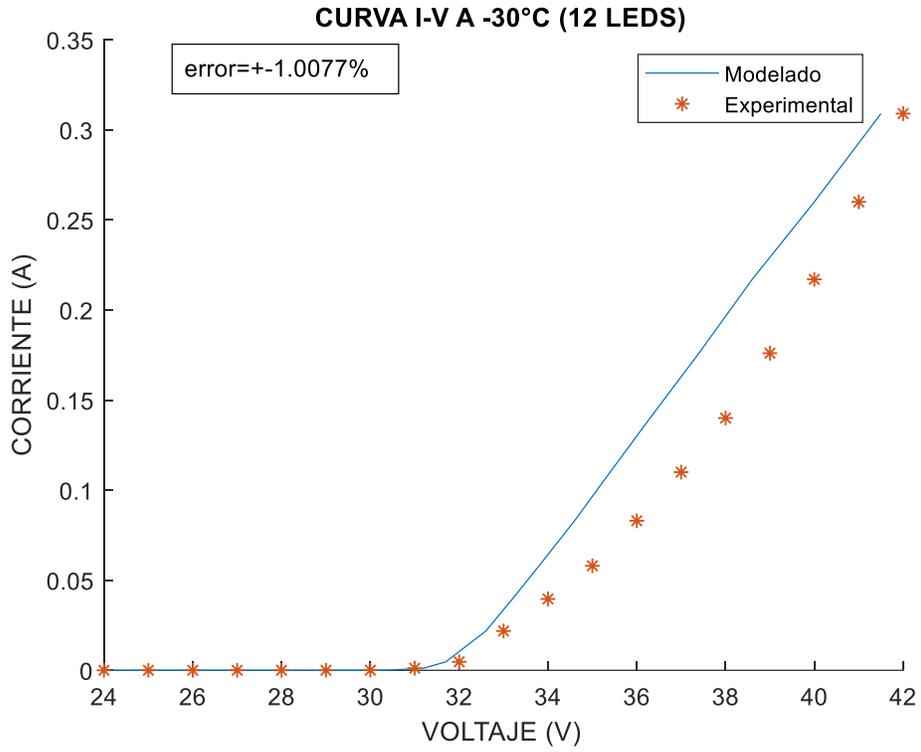


Figura 37. Curva I-V a -30°C.

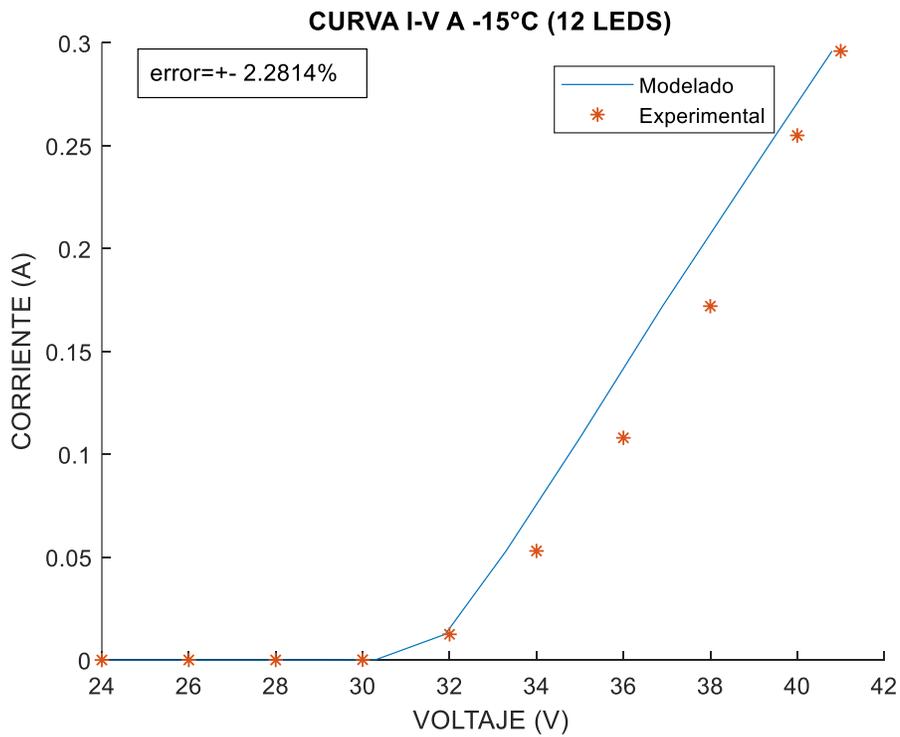


Figura 38. Curva I-V a -15°C.

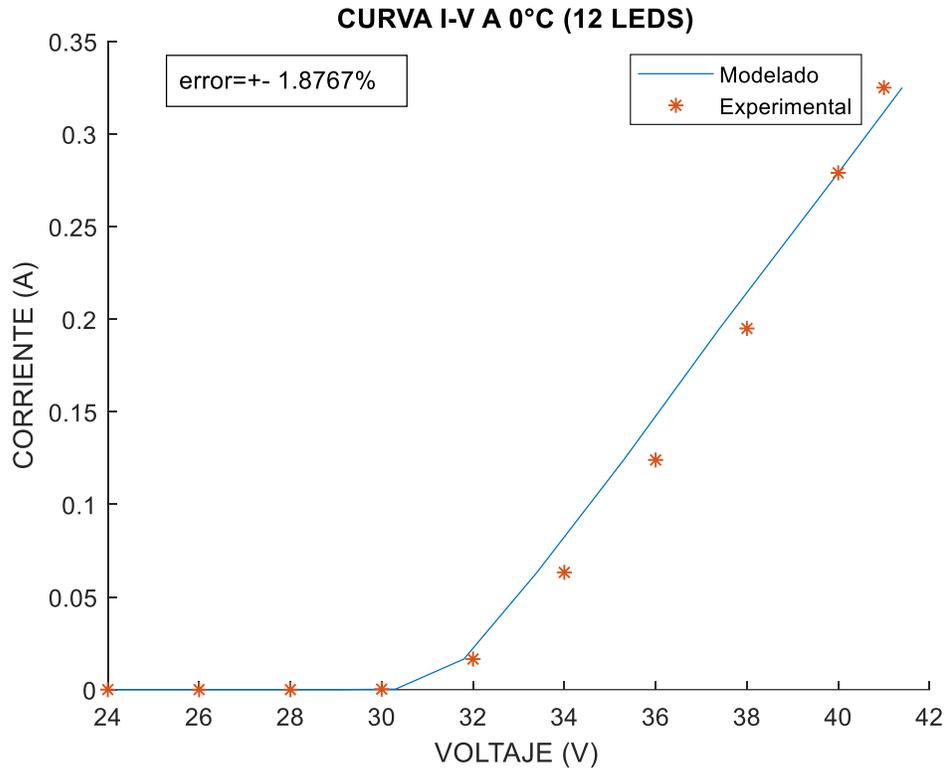


Figura 39. Curva I-V a 0°C.

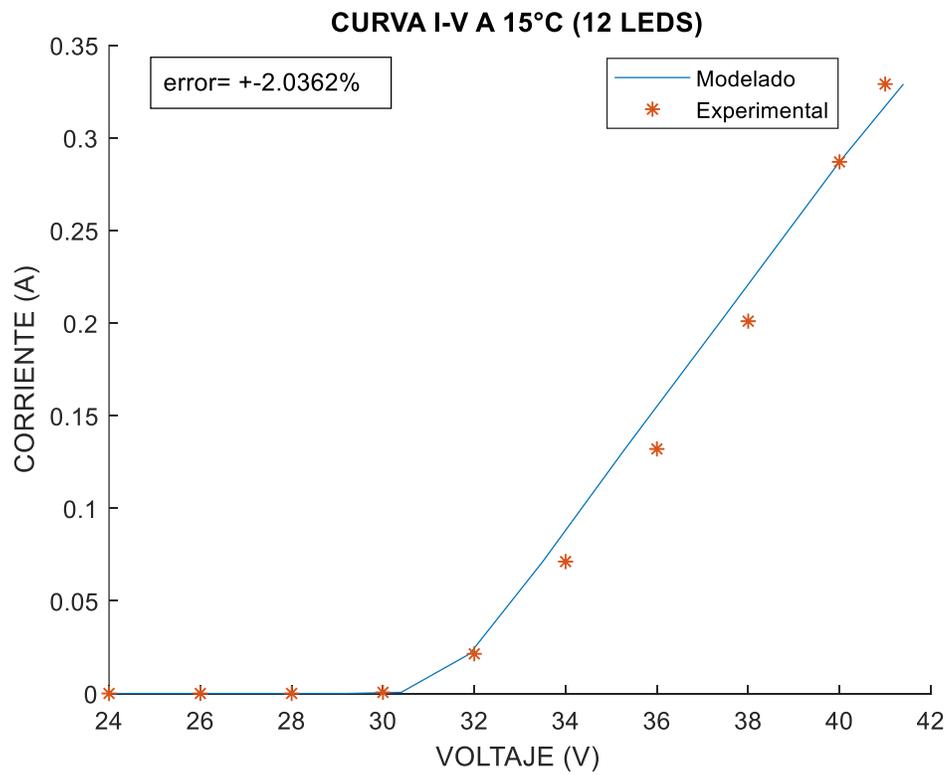


Figura 40. Curva I-V a 15°C.

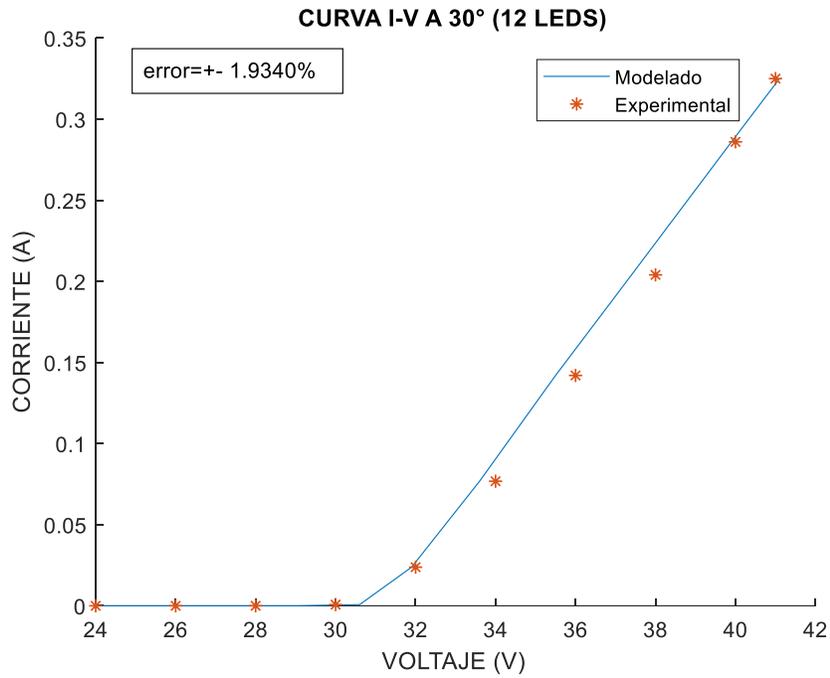


Figura 41. Curva I-V a 30°C.

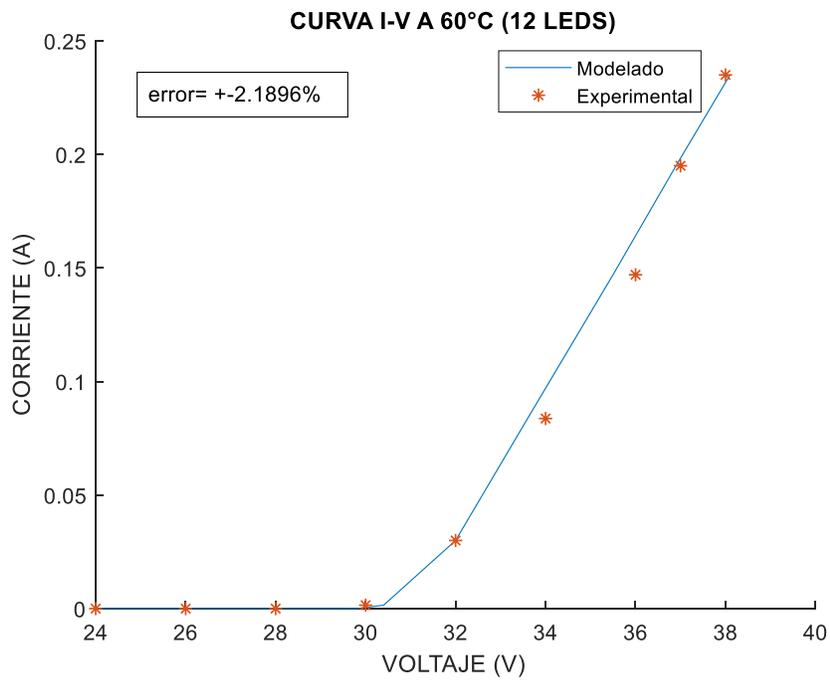


Figura 42. Curva I-V a 60°C.

Conclusión

En estas curvas se puede observar que el modelo sigue siendo válido para 12 LEDs, se tiene buenos resultados conforme a los datos experimentales. Se tiene un margen de error bajo.

4.9 Resultados térmicos experimentales y modelados (12 LEDs)

Resultados

Por medio del Software de MATLAB® se obtuvieron las curvas características de temperatura medidos en el disipador y en el encapsulado del LED. Se muestra en las Figura 43 y Figura 44.

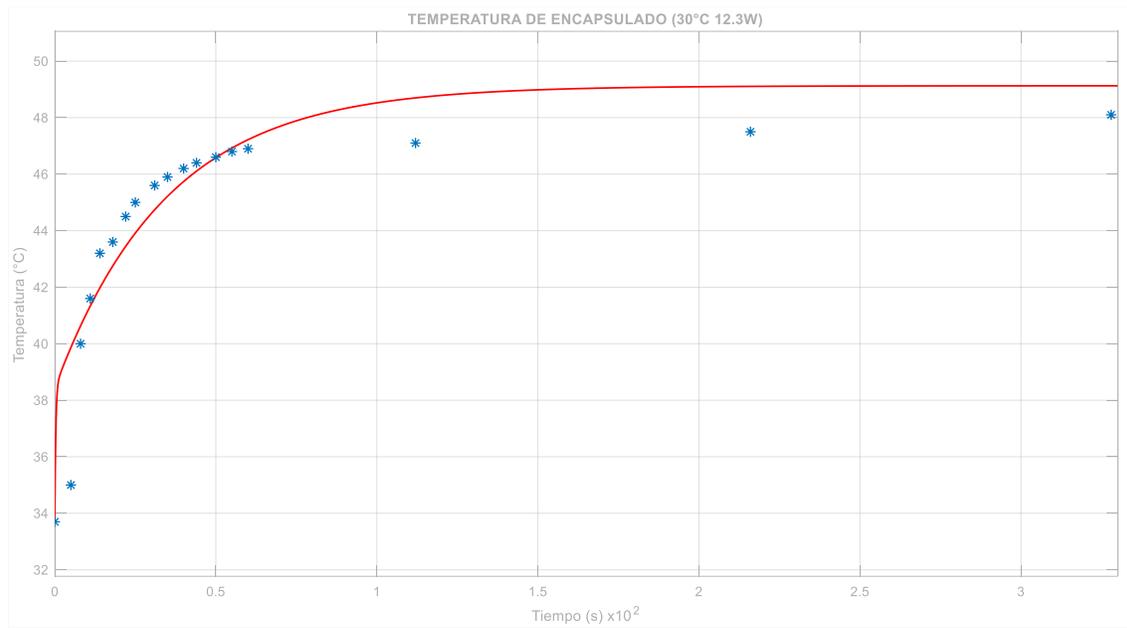


Figura 43. Temperatura de encapsulado (30°C 12.3W).

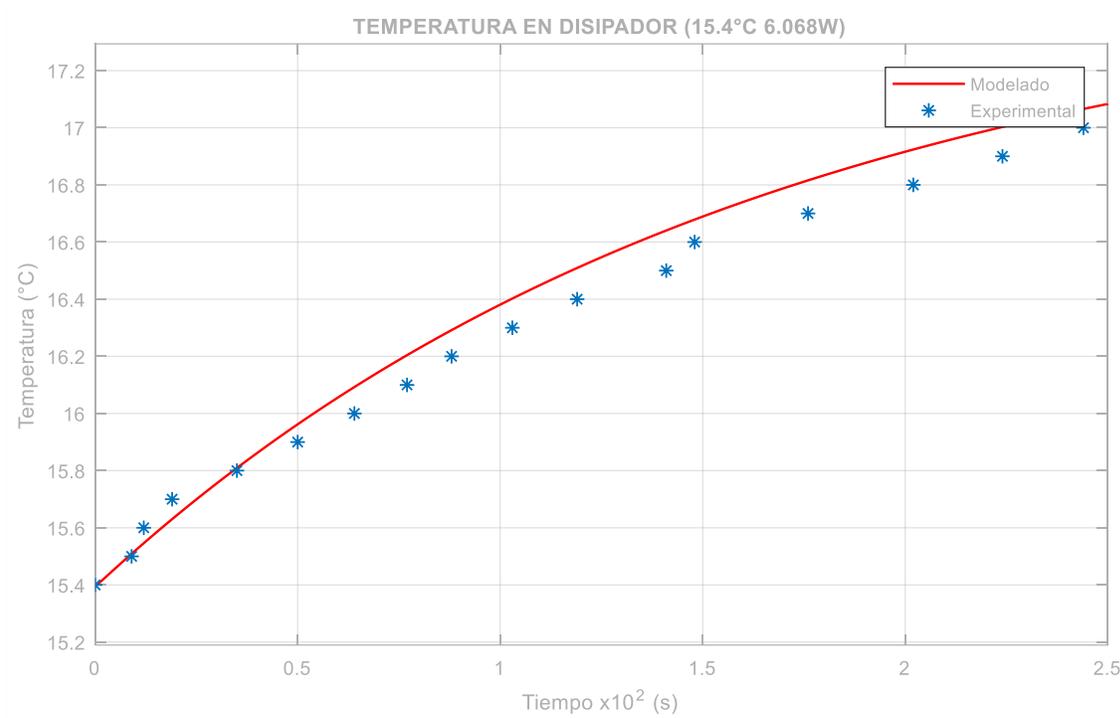


Figura 44. Temperatura en disipador (15.4°C 6.0688W).

Conclusión

Se graficaron por medio de MATLAB® las curvas térmicas simuladas y modeladas. Los resultados son bastante buenos. En donde los márgenes de error no supera el 3% de error.

4.10 Resultados modelados (12 LEDs conectados en paralelo)

Se simuló el modelo, pero ahora los LEDs están conectados en paralelo. Esto conlleva a que la corriente de alimentación sea mucho mayor pero el voltaje siga siendo igual como si estuviera un led conectado. Se trazó la gráfica I-V de esta simulación la cual se muestra en la Figura 45.

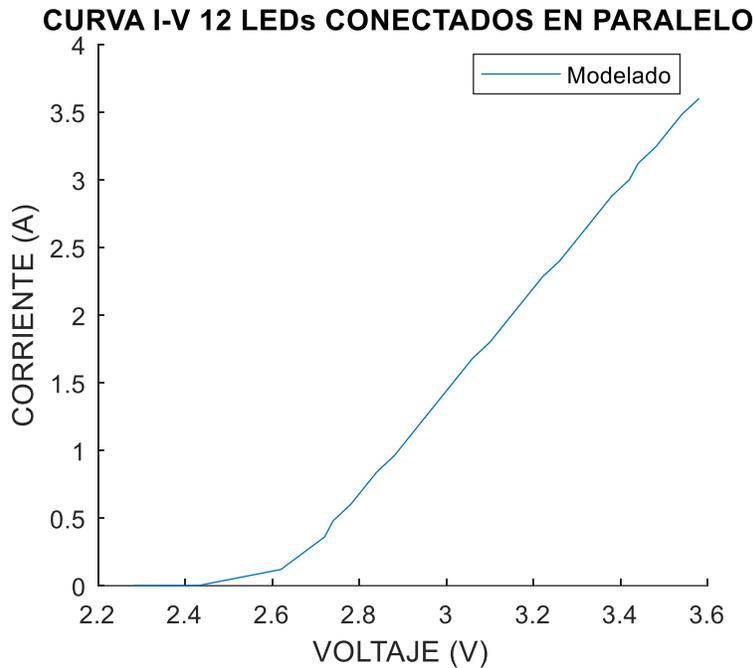


Figura 45. Curva I-V 12 LEDs conectados en paralelo.

Como se muestra en el resultado de simulación la corriente necesaria para alimentar los LEDs en paralelo es de aproximadamente 3.6 A con un voltaje de operación de 3.58 V, por lo que la potencia de 12.888 W. Nótese que la potencia consumida sigue siendo la misma tanto en conexión serie como paralelo.

4.10 Simulación de un convertidor CD-CD con el modelo (12 LEDs)

Introducción

Con el objetivo de aplicar el modelo propuesto a una aplicación. Se optó por simular un convertidor tipo *Buck* utilizado como fuente de alimentación para el paquete de los 12 LEDs. Se muestra en la Figura 46. Donde los parámetros de diseño son los siguientes:

Voltaje de entrada (Vin) = 173.5 V

Ciclo de trabajo (D) = 0.25

Voltaje de salida = 37.5 V

Corriente de salida = 200 mA

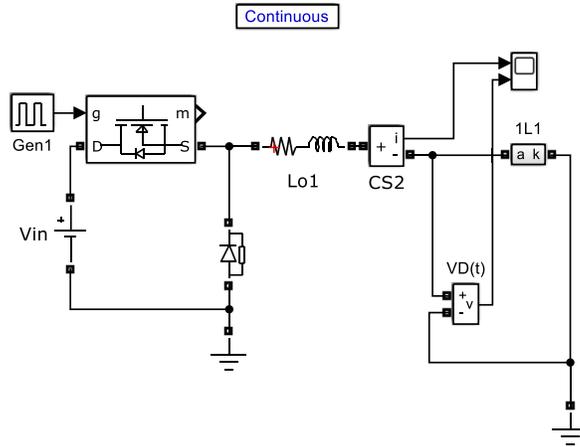


Figura 46. Convertidor CD-CD conectado al modelo.

Resultados de simulación

Se obtuvieron resultados de simulación en donde se midieron el voltaje y la corriente en el modelo. Se muestran el resultado de simulación en la Figura 47.

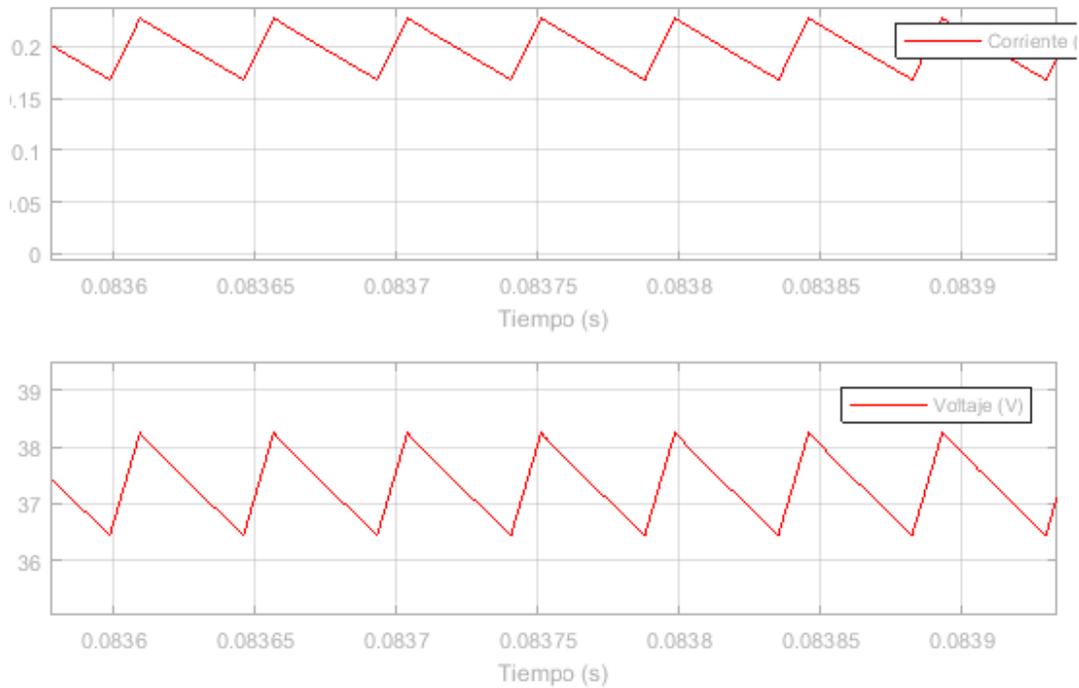


Figura 47. Corriente y voltaje en el modelo con el convertidor CD-CD.

Conclusión

Para terminar de validar el modelo, se propuso una aplicación en este caso un convertidor CD-CD como fuente de alimentación para el módulo de LEDs de potencia. Los resultados se graficaron en MATLAB®, donde se puede observar que el modelo funciona tal como funcionaría experimentalmente el módulo de 12 LEDs conectado al convertidor CD-CD propuesto.

5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se desarrolló un modelo eléctrico – térmico para LEDs de potencia. Este modelo solo tiene dos variables de entrada: Corriente de operación y temperatura de operación. Con este modelo se puede predecir el comportamiento de un LED de potencia, así como también de todo un módulo de LEDs.

Con este modelo se puede predecir: Corriente del LED, voltaje del LED, Potencia del LED, voltaje de umbral, temperatura de encapsulado y temperatura de disipador.

El modelo se hizo con los Software MATLAB® y Simulink®.

Este modelo es un modelo original no reportado anteriormente en la literatura, contiene una aportación importante en el campo del modelado de dispositivos semiconductores. La cual es una ecuación no lineal de voltaje de umbral en función de la temperatura ambiente. Además de esto el modelo funciona con LEDs conectados en serie, en paralelo y como carga en una aplicación de un convertidor de potencia.

Haciendo con esto un modelo muy completo con un margen de error general de $\pm 2.5\%$. Se espera en breve publicar un artículo científico en una revista JCR de alto impacto.

Referencias

- [1] P. Baureis, "Compact modeling of electrical, thermal and optical LED behavior," *Proceedings of 35th European Solid-State Device Research Conference*, pp. 145-148, 2005.
- [2] V. C. B. P. S. Almeida, H. A. C. Braga, M. A. Dalla Costa, T. B. Marchesan and J. M. Alonso, "Static and Dynamic Photoelectrothermal Modeling of LED Lamps Including Low-Frequency Current Ripple Effects," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 3841-3851, July 2015.
- [3] J. M. A. D. Gacio, J. Garcia, M. S. Perdigao, E. S. Saraiva and F. E. Bisogno, "Effects of the Junction Temperature on the Dynamic Resistance of White LEDs," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 750-760, March-April 2013.
- [4] T. B. M. a. J. M. A. Vitor C. Bender, "Solid-State Lighting: A Concise Review of the State of the Art on LED and OLED Modeling," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 6-16, June 2015.
- [5] J. M. A. R. Osorio, S.E Pinto, G Martínez, N Vázquez, M Ponce-Silva, A.J. Martínez., "Simplified electrical modelling of power LEDs for DC-DC converter analysis and simulation," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2017.
- [6] M. A. J. e. al, "A model for electrical characteristics of high power UV LED," *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, pp. 110-115, 2016.
- [7] W. C. H. C. S. Y. R. H. Huang-Ting Chen, "Characterization, Modeling, and Analysis of Organic Light-Emitting Diodes With Different Structures," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 581-592, Jan. 2016.
- [8] Y. G. Lalith Jayasinghe, & Nadarajah Narendran, "Characterization of Thermal Resistance Coefficient Of High-power LEDs," *Sixth International Conference on solid state Lighting*, pp. 1-11, 2006.
- [9] J. P. a. C. C. Lee, "An electrical model with junction temperature for light-emitting diodes and the impact on conversion efficienc," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, pp. 308-310, may 2005.
- [10] Y.-X. C. Xin-Jie Zhao, Jing Wang, Xiao-Hua Li, Chun Zhang, "Thermal model design and analysis of the high-power LED automotive headlight cooling device," *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 248-258, 2015.
- [11] B. K. S. M. E. Raypah, M. Devarajan and F. Sulaiman, "Estimation of Luminous Flux and Luminous Efficacy of Low-Power SMD LED as a Function of Injection Current and Ambient Temperature," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2790-2795, July 2016.
- [12] J. H. A. Poppe, "Simulation of luminaires based on chip level multi-domain modeling of power LEDs," *2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, pp. 1-6, 2016.
- [13] W. L. G. Hugues, "System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design," *Springer-Verlag*, p. 637, June 2012.
- [14] M. A. J. Balderas, "Estudio y Análisis de las Técnicas para la Estabilización de Lámparas de Descarga sin Lazos de Retroalimentación," *Tesis Doctoral CENIDET*, p. 219, Diciembre 2011.
- [15] H. J. Round, "A note on carborundum," in *Semiconductor Devices: Pioneering Papers: World Scientific*, 1991, pp. 879-879.
- [16] O. Losev, "BLuminous carborundum detector and detection with crystals,[Telegrafiya i Telefoniya bez Provodov, vol. 44," 1927.

- [17] N. H. a. S. F. Bevacqua, "Light emission from Ga(As1-XPX) junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, pp. 82-83, 1962.
- [18] S. Nakamura, T. Mukai, and M. J. A. P. L. Senoh, "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes," vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [19] S. Peralta and H. J. I. I. A. M. Ruda, "Applications for advanced solid-state lamps," vol. 4, no. 4, pp. 31-42, 1998.
- [20] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons, 2006.
- [21] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*. E. Fred Schubert, 2018.
- [22] K. Górecki, "Modelling mutual thermal interactions between power LEDs in SPICE," *Microelectronics Reliability*, vol. 55, no. 2, pp. 389-395, 2014.
- [23] S. Y. H. a. Y. X. Qin, "A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1967-1976, 2009.
- [24] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: An overview of models and experimental data," *Microelectronics Journal*, vol. 46, no. 12, pp. 1138-1151, 2015.
- [25] A. P. a. C. J. M. Lasance, "Effects of the Junction Temperature on the Dynamic Resistance of White LEDs," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 750-760, March-April 2009.
- [26] N. V. Rene Osorio Sanchez, Claudia Hernandez, Elias Rodriguez, Sergio Pinto and Mario Juarez, "Electric Dynamic Modeling of HID Lamps for Electronic Ballast Design," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 5, pp. 1655-1662, May 2010.
- [27] X. Tao and D. Zhang, "Thermal parameter extraction method for light-emitting diode (LED) systems," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 6, pp. 1931-1937, 2013.
- [28] E. F. SCHUBERT, "Ligth-Emitting Diodes " *Cambrige University Press*, p. 434, Feb 2006.

Anexos

Anexo 1. Protocolo de pruebas

CONTROL DE CAMBIOS Y MEJORAS

NIVEL DE REVISIÓN	SECCIÓN Y/O PÁGINA	DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN Y MEJORA	FECHA DE MODIFICACIÓN
01			
02			
03			
04			

Elaboró: <i>Ing. Heriberto Adamas Pérez</i> <i>Estudiante de CENIDET</i>	Autorizó:	Revisó:	Fecha y horario de inicio:	
			Fecha y horario de término:	

I. Objetivo

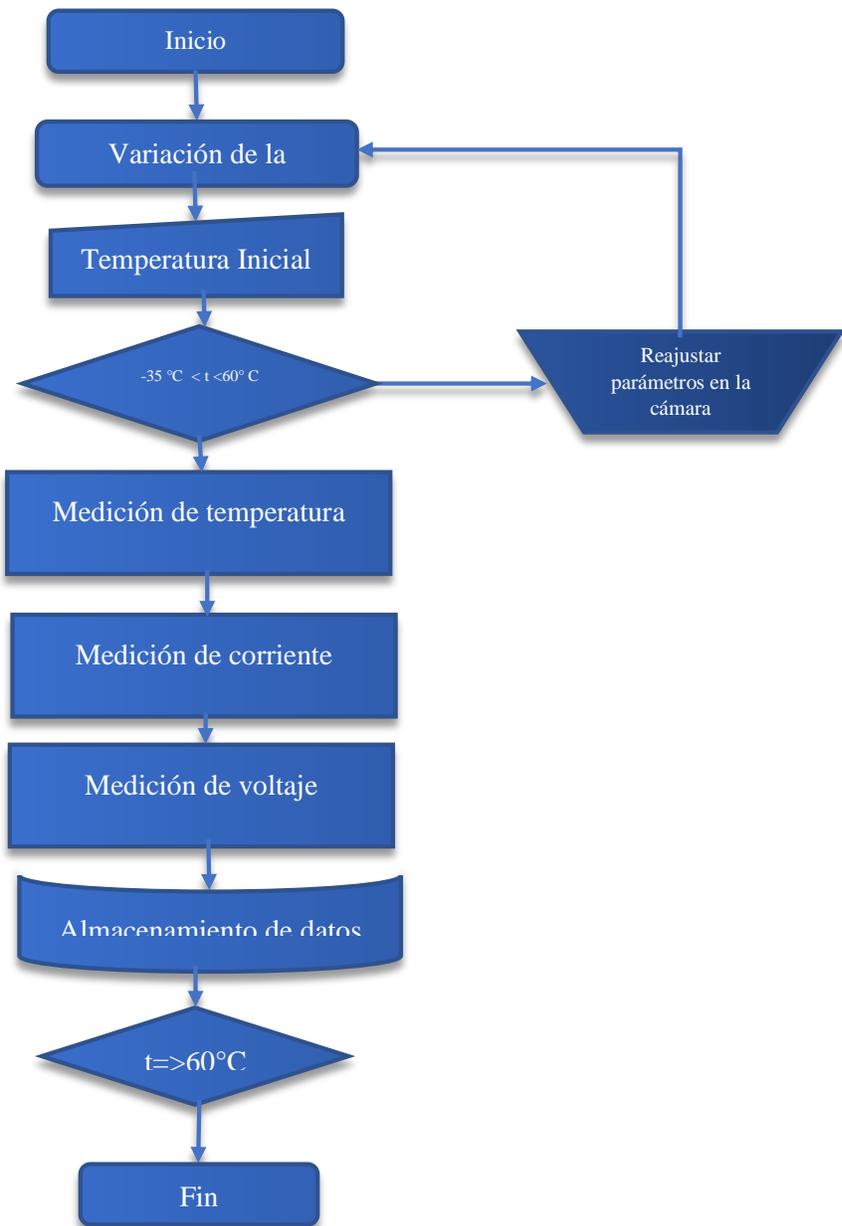
Caracterización térmica de un LED de potencia, para determinar sus curvas características que presenta a variaciones de temperatura.

II. Alcance

Tesis de maestría: Modelo electro – térmico para LEDs de potencia, desarrollado por el Ing. Heriberto Adamas Pérez y dirigida por el Dr. Mario Ponce Silva.

III. Diagrama del procedimiento

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la siguiente página:



IV. Descripción del procedimiento

Actividad	Descripción	Responsable
Establecer eventos de temperatura	Programar la cámara ambiental para que, en cierto período, varíe de una temperatura a otra	
Variación de voltaje en la fuente externa.	Se irá incrementando el valor del voltaje de alimentación del LED.	
Medición de temperatura	Se medirá la temperatura de encapsulado y del disipador	
Medición de voltaje	Se medirá el voltaje entre las terminales del LED	
Medición de corriente	Se medirá la corriente consumida por el LED.	

Tabla 1. Descripción del procedimiento que se realizará en la cámara ambiental.

V. Equipo utilizado

- Cámara ambiental MCH-3-.33-.33-H/AC
- Fuente de alimentación
- Multímetro
- Osciloscopio

VI. Referencias

Norma que avala el procedimiento: ISO 9001

- La capacidad para interactuar con la aplicación de almacén de datos existente
- La capacidad para incorporar enrutamiento y notificaciones automatizados en base a reglas empresariales

Se tiene un módulo de LEDs modelo LMT-P12W-77-N, con las siguientes especificaciones:

Potencia	Temperatura de operación	Corriente nominal	Número de LEDs
12 W	-35°C a 60°C	350mA	12

Tabla 1. Especificaciones del módulo de LEDs de potencia.

VII. Glosario

LED. Sigla de la expresión inglesa light-emitting diode, ‘diodo emisor de luz’, que es un tipo de diodo empleado en computadoras, paneles numéricos (en relojes digitales, calculadoras de bolsillo...), etc.

Modelo. Herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre él.

Cámara ambiental. Una cámara ambiental, también llamada cámara climática, es un recinto utilizado para probar los efectos de condiciones ambientales específicas en artículos biológicos, productos industriales, materiales, dispositivos y componentes electrónicos.

VIII. Observaciones

Las pruebas se llevarán a cabo en la ciudad de Cuernavaca, Morelos que posee una temperatura ambiente de 25°C.

La temperatura se variará de -35°C a 60°C; el rango de operación del módulo de los LEDs de potencia.

IX. Anexos

Plantilla de cálculos realizados

Datos de entrada:

V_{in} (V)

Temperatura (°C)

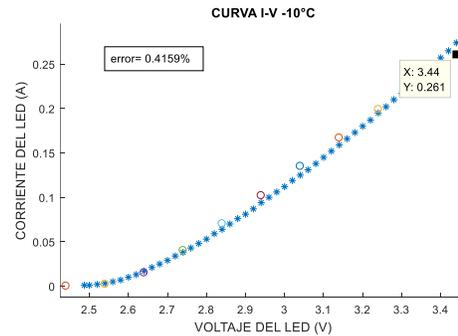
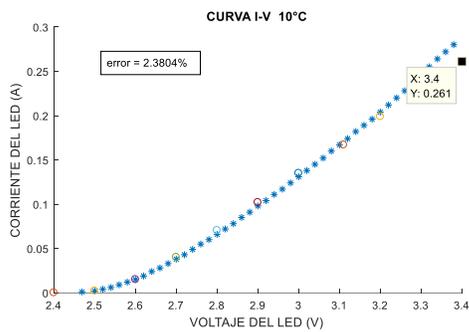
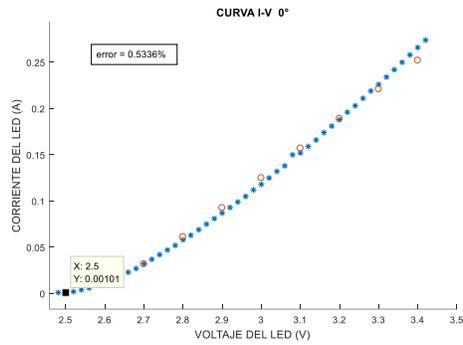
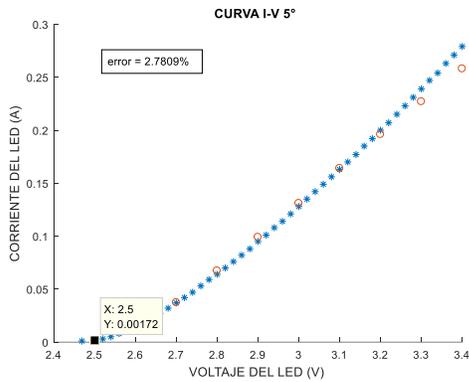
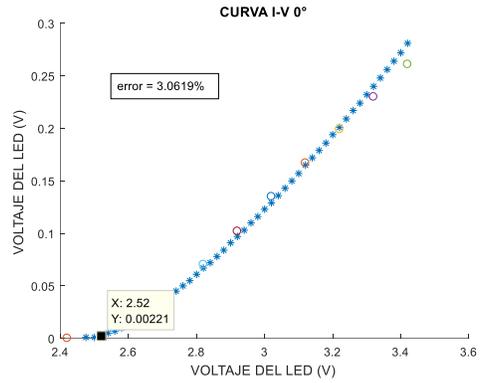
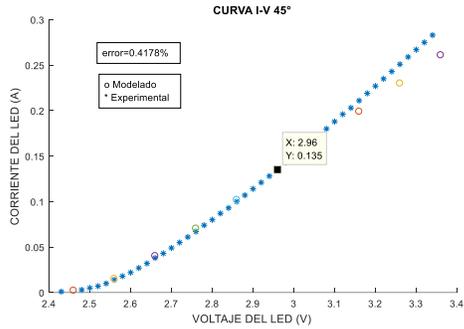
La siguiente tabla registrará las mediciones eléctricas y de temperatura en función de la temperatura y el voltaje de entrada aplicados al módulo de los LEDs de potencia.

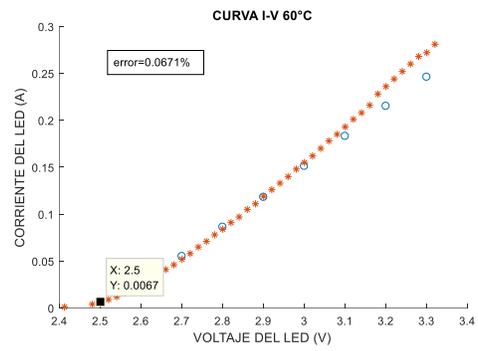
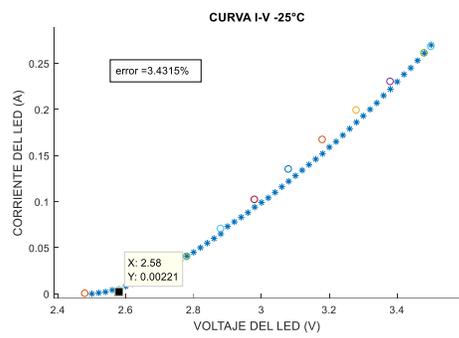
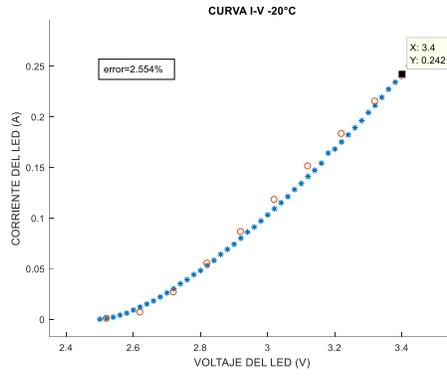
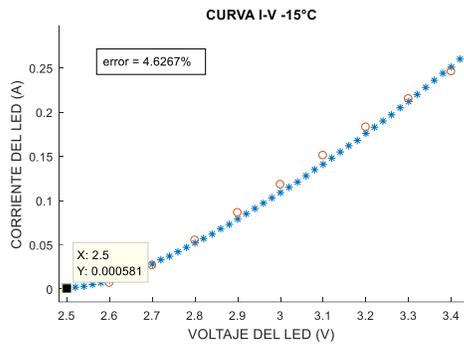
Equipo utilizado:				
Modulo: LMT-P12W-77-N				
V_{LED}	I_{LED}	P_{LED}	T_e	T_{sh}

Tabla 3. Registro de parámetros a medir en el módulo de LEDs en función de las variaciones de voltaje y temperatura.

Anexo 2. Curvas I-V modeladas y experimentales

Tabla 2. Diferentes curvas I-V modeladas y experimentales.





Anexo 3. Temperatura de disipador y encapsulado (Modeladas y experimentales)

Tabla 3. Temperaturas de disipador y encapsulado (Experimentales).

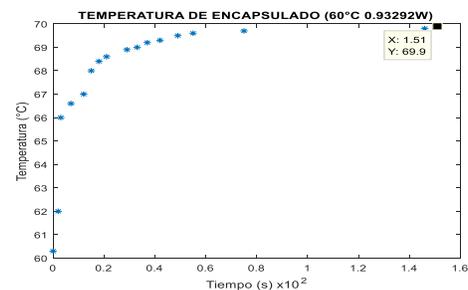
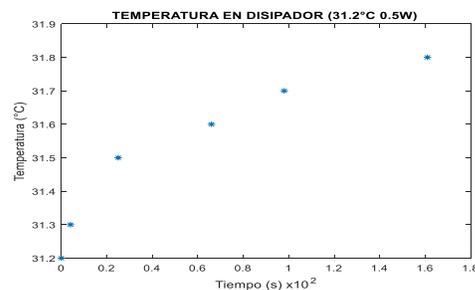
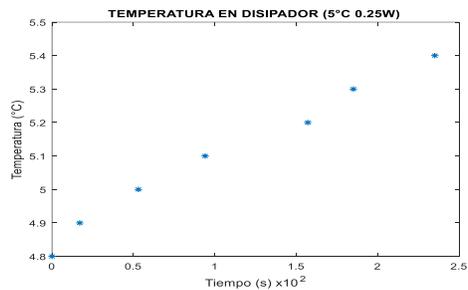
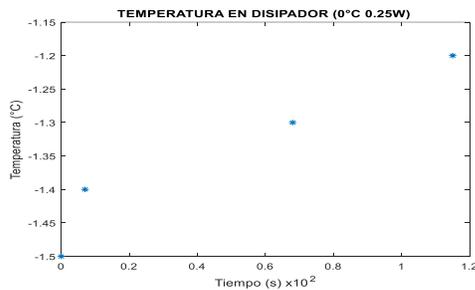
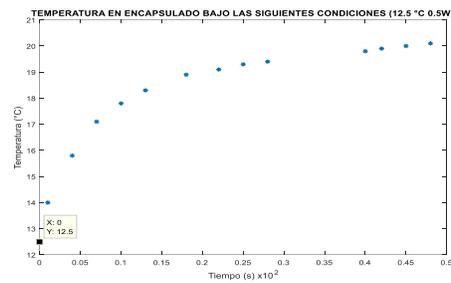
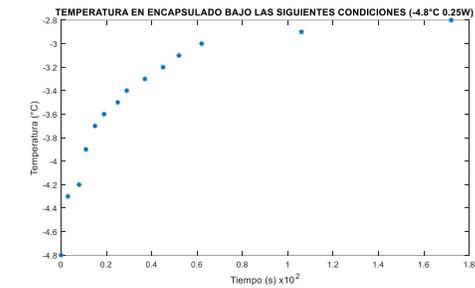
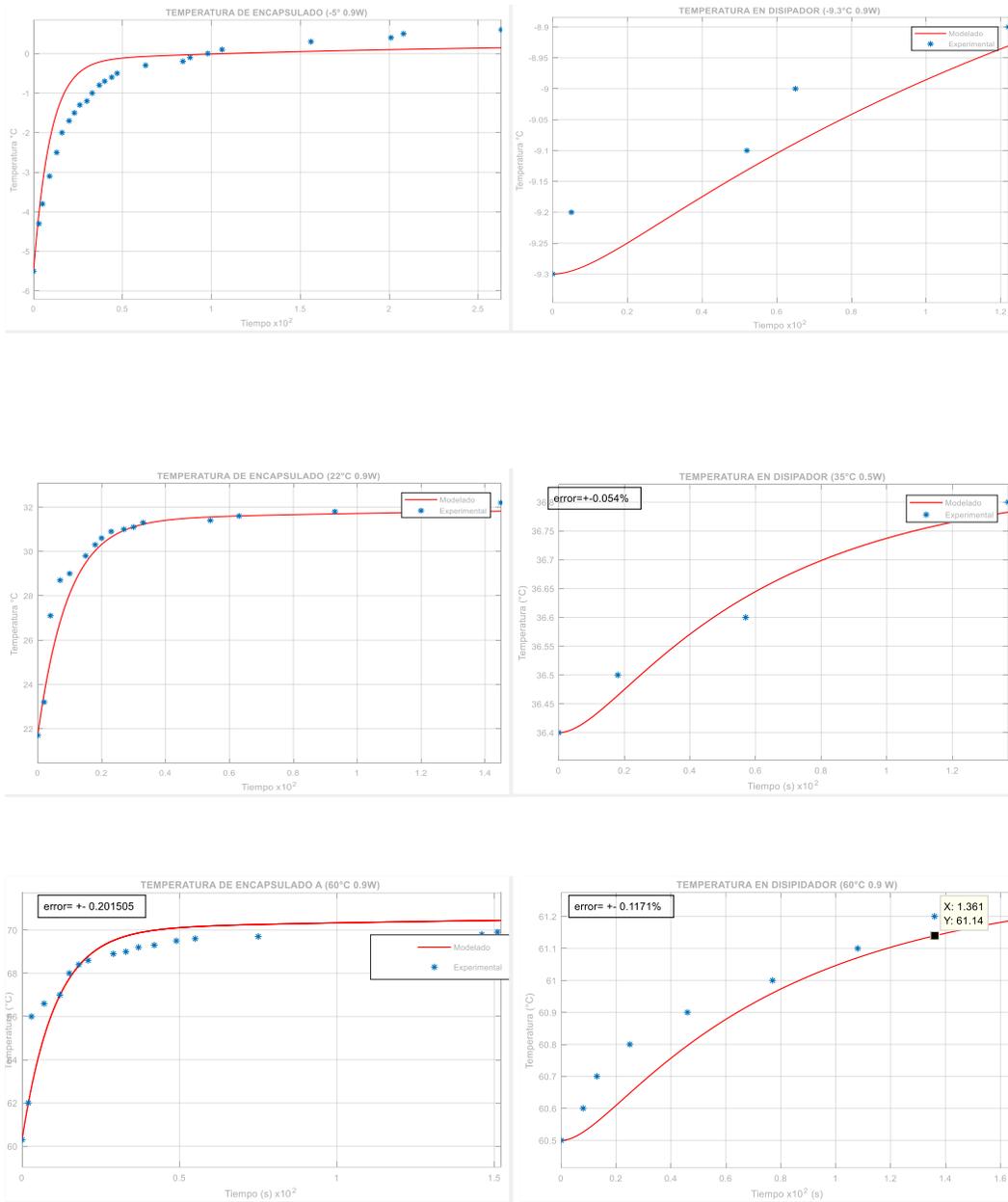
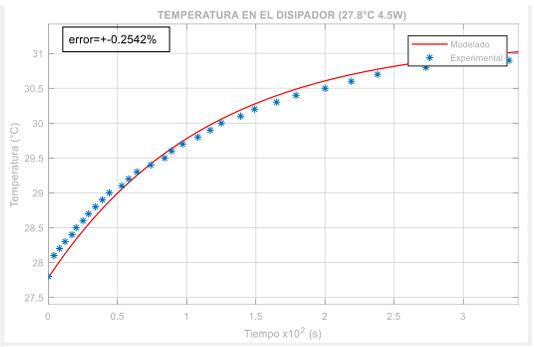
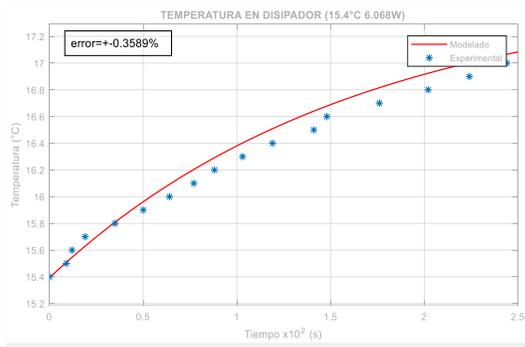
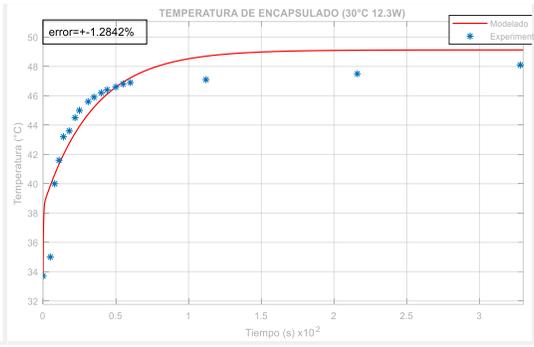
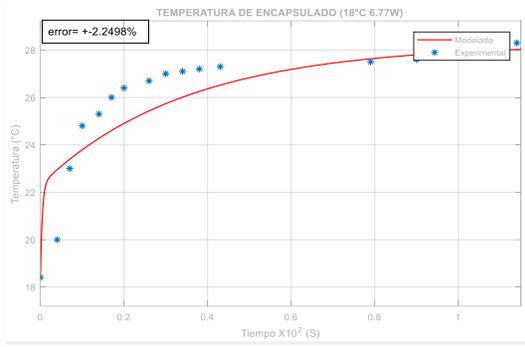


Tabla 4. Temperatura de encapsulado y disipador (Modeladas y experimentales).





Anexo 4. Mediciones de Corriente y Voltaje en el LED a diferentes temperaturas

Tabla 5. Mediciones de corriente y voltaje a -30°C y -25°C .

-30	Grados		-25	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.51	0.001	0.00251	2.5	0	0
2.52	0.001	0.00252	2.52	0.001	0.00252
2.53	0.001	0.00253	2.54	0.002	0.00508
2.54	0.002	0.00508	2.56	0.004	0.01024
2.55	0.002	0.0051	2.58	0.005	0.0129
2.56	0.003	0.00768	2.6	0.008	0.0208
2.57	0.004	0.01028	2.62	0.011	0.02882
2.58	0.005	0.0129	2.64	0.014	0.03696
2.59	0.006	0.01554	2.66	0.017	0.04522
2.6	0.007	0.0182	2.68	0.02	0.0536
2.61	0.008	0.02088	2.7	0.024	0.0648
2.62	0.009	0.02358	2.72	0.028	0.07616
2.63	0.011	0.02893	2.74	0.032	0.08768
2.64	0.012	0.03168	2.76	0.036	0.09936
2.65	0.013	0.03445	2.78	0.041	0.11398
2.66	0.015	0.0399	2.8	0.045	0.126
2.67	0.017	0.04539	2.82	0.05	0.141
2.68	0.018	0.04824	2.84	0.055	0.1562
2.69	0.02	0.0538	2.86	0.06	0.1716
2.7	0.022	0.0594	2.88	0.065	0.1872
2.71	0.023	0.06233	2.9	0.073	0.2117
2.72	0.025	0.068	2.92	0.078	0.22776
2.73	0.027	0.07371	2.94	0.083	0.24402
2.74	0.029	0.07946	2.96	0.088	0.26048
2.75	0.031	0.08525	2.98	0.094	0.28012
2.76	0.033	0.09108	3	0.099	0.297
2.77	0.035	0.09695	3.02	0.104	0.31408
2.78	0.037	0.10286	3.04	0.11	0.3344
2.79	0.04	0.1116	3.06	0.116	0.35496
2.8	0.042	0.1176	3.08	0.122	0.37576

2.81	0.044	0.12364	3.1	0.128	0.3968
2.82	0.046	0.12972	3.12	0.134	0.41808
2.83	0.048	0.13584	3.14	0.14	0.4396
2.84	0.05	0.142	3.16	0.146	0.46136
2.85	0.053	0.15105	3.18	0.152	0.48336
2.86	0.055	0.1573	3.2	0.159	0.5088
2.87	0.057	0.16359	3.22	0.165	0.5313
2.88	0.06	0.1728	3.24	0.172	0.55728
2.89	0.062	0.17918	3.26	0.179	0.58354
2.9	0.065	0.1885	3.28	0.186	0.61008
2.91	0.067	0.19497	3.3	0.193	0.6369
2.92	0.07	0.2044	3.32	0.2	0.664
2.93	0.072	0.21096	3.34	0.207	0.69138
2.94	0.075	0.2205	3.36	0.215	0.7224
2.95	0.077	0.22715	3.38	0.222	0.75036
2.96	0.08	0.2368	3.4	0.23	0.782
2.97	0.083	0.24651	3.42	0.238	0.81396
2.98	0.085	0.2533	3.44	0.245	0.8428
2.99	0.088	0.26312	3.46	0.253	0.87538
3	0.091	0.273	3.48	0.261	0.90828
3.01	0.093	0.27993	3.5	0.27	0.945
3.02	0.096	0.28992			
3.03	0.099	0.29997			
3.04	0.102	0.31008			
3.05	0.105	0.32025			
3.06	0.107	0.32742			
3.07	0.11	0.3377			
3.08	0.113	0.34804			
3.09	0.116	0.35844			
3.1	0.119	0.3689			
3.11	0.122	0.37942			
3.12	0.125	0.39			
3.13	0.128	0.40064			
3.14	0.131	0.41134			
3.15	0.134	0.4221			
3.16	0.138	0.43608			
3.17	0.141	0.44697			
3.18	0.144	0.45792			
3.19	0.147	0.46893			
3.2	0.151	0.4832			
3.21	0.154	0.49434			

3.22	0.157	0.50554
3.23	0.161	0.52003
3.24	0.164	0.53136
3.25	0.167	0.54275
3.26	0.171	0.55746
3.27	0.174	0.56898
3.28	0.178	0.58384
3.29	0.181	0.59549
3.3	0.185	0.6105
3.31	0.188	0.62228
3.32	0.192	0.63744
3.33	0.195	0.64935
3.34	0.199	0.66466
3.35	0.203	0.68005
3.36	0.207	0.69552
3.37	0.21	0.7077
3.38	0.214	0.72332
3.39	0.218	0.73902
3.4	0.222	0.7548
3.41	0.226	0.77066
3.42	0.23	0.7866
3.43	0.234	0.80262
3.44	0.238	0.81872
3.45	0.241	0.83145
3.46	0.246	0.85116
3.47	0.25	0.8675
3.48	0.253	0.88044
3.49	0.258	0.90042
3.5	0.262	0.917

Tabla 6. Mediciones de corriente y voltaje a -20°C y -15°C.

-20	Grados		-15	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.48	0	0	2.48	0	0
2.5	0	0	2.5	0.001	0.0025
2.52	0.001	0.00252	2.52	0.002	0.00504
2.54	0.002	0.00508	2.54	0.003	0.00762
2.56	0.004	0.01024	2.56	0.005	0.0128
2.58	0.006	0.01548	2.58	0.007	0.01806
2.6	0.009	0.0234	2.6	0.01	0.026
2.62	0.012	0.03144	2.62	0.013	0.03406
2.64	0.015	0.0396	2.64	0.016	0.04224
2.66	0.018	0.04788	2.66	0.02	0.0532
2.68	0.022	0.05896	2.68	0.024	0.06432
2.7	0.026	0.0702	2.7	0.028	0.0756
2.72	0.03	0.0816	2.72	0.033	0.08976
2.74	0.035	0.0959	2.74	0.037	0.10138
2.76	0.039	0.10764	2.76	0.042	0.11592
2.78	0.044	0.12232	2.78	0.047	0.13066
2.8	0.048	0.1344	2.8	0.052	0.1456
2.82	0.053	0.14946	2.82	0.057	0.16074
2.84	0.058	0.16472	2.84	0.062	0.17608
2.86	0.064	0.18304	2.86	0.068	0.19448
2.88	0.069	0.19872	2.88	0.073	0.21024
2.9	0.074	0.2146	2.9	0.079	0.2291
2.92	0.08	0.2336	2.92	0.085	0.2482
2.94	0.086	0.25284	2.94	0.091	0.26754
2.96	0.091	0.26936	2.96	0.097	0.28712
2.98	0.097	0.28906	2.98	0.103	0.30694
3	0.103	0.309	3	0.109	0.327
3.02	0.109	0.32918	3.02	0.115	0.3473
3.04	0.115	0.3496	3.04	0.121	0.36784
3.06	0.121	0.37026	3.06	0.128	0.39168
3.08	0.128	0.39424	3.08	0.135	0.4158
3.1	0.134	0.4154	3.1	0.141	0.4371
3.12	0.141	0.43992	3.12	0.148	0.46176
3.14	0.147	0.46158	3.14	0.155	0.4867
3.16	0.154	0.48664	3.16	0.162	0.51192
3.18	0.164	0.52152	3.18	0.168	0.53424

3.2	0.168	0.5376	3.2	0.176	0.5632
3.22	0.175	0.5635	3.22	0.183	0.58926
3.24	0.182	0.58968	3.24	0.19	0.6156
3.26	0.189	0.61614	3.26	0.197	0.64222
3.28	0.196	0.64288	3.28	0.205	0.6724
3.3	0.204	0.6732	3.3	0.212	0.6996
3.32	0.211	0.70052	3.32	0.22	0.7304
3.34	0.219	0.73146	3.34	0.228	0.76152
3.36	0.227	0.76272	3.36	0.236	0.79296
3.38	0.234	0.79092	3.38	0.244	0.82472
3.4	0.242	0.8228	3.4	0.251	0.8534
3.42	0.25	0.855	3.42	0.26	0.8892
3.44	0.258	0.88752	3.44	0.268	0.92192
3.46	0.266	0.92036			

Tabla 7. Mediciones de corriente y voltaje a -10°C y -5°C .

-10	Grados		-5	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.487	0.001	0.002487	2.481	0.001	0.002481
2.5	0.001	0.0025	2.5	0.001	0.0025
2.52	0.002	0.00504	2.52	0.002	0.00504
2.54	0.003	0.00762	2.54	0.004	0.01016
2.56	0.005	0.0128	2.56	0.006	0.01536
2.58	0.007	0.01806	2.58	0.009	0.02322
2.6	0.01	0.026	2.6	0.012	0.0312
2.62	0.013	0.03406	2.62	0.015	0.0393
2.64	0.017	0.04488	2.64	0.019	0.05016
2.66	0.021	0.05586	2.66	0.023	0.06118
2.68	0.025	0.067	2.68	0.027	0.07236
2.7	0.029	0.0783	2.7	0.032	0.0864
2.72	0.034	0.09248	2.72	0.037	0.10064
2.74	0.038	0.10412	2.74	0.042	0.11508
2.76	0.043	0.11868	2.76	0.047	0.12972
2.78	0.048	0.13344	2.78	0.052	0.14456
2.8	0.053	0.1484	2.8	0.058	0.1624
2.82	0.059	0.16638	2.82	0.063	0.17766
2.84	0.064	0.18176	2.84	0.069	0.19596
2.86	0.07	0.2002	2.86	0.075	0.2145
2.88	0.076	0.21888	2.88	0.081	0.23328
2.9	0.081	0.2349	2.9	0.087	0.2523
2.92	0.087	0.25404	2.92	0.093	0.27156
2.94	0.094	0.27636	2.94	0.099	0.29106
2.96	0.1	0.296	2.96	0.105	0.3108
2.98	0.106	0.31588	2.98	0.112	0.33376
3	0.112	0.336	3	0.118	0.354
3.02	0.119	0.35938	3.02	0.125	0.3775
3.04	0.125	0.38	3.04	0.132	0.40128
3.06	0.131	0.40086	3.06	0.138	0.42228
3.08	0.138	0.42504	3.08	0.145	0.4466
3.1	0.145	0.4495	3.1	0.152	0.4712
3.12	0.152	0.47424	3.12	0.159	0.49608
3.14	0.159	0.49926	3.14	0.166	0.52124
3.16	0.166	0.52456	3.16	0.174	0.54984
3.18	0.173	0.55014	3.18	0.181	0.57558

3.2	0.18	0.576	3.2	0.188	0.6016
3.22	0.187	0.60214	3.22	0.196	0.63112
3.24	0.195	0.6318	3.24	0.203	0.65772
3.26	0.202	0.65852	3.26	0.211	0.68786
3.28	0.21	0.6888	3.28	0.219	0.71832
3.3	0.217	0.7161	3.3	0.226	0.7458
3.32	0.225	0.747	3.32	0.234	0.77688
3.34	0.233	0.77822	3.34	0.242	0.80828
3.36	0.241	0.80976	3.36	0.25	0.84
3.38	0.249	0.84162	3.38	0.258	0.87204
3.4	0.257	0.8738	3.4	0.266	0.9044
3.42	0.265	0.9063	3.42	0.274	0.93708
3.44	0.274	0.94256			

Tabla 8. Mediciones de corriente y voltaje a 0°C y 5°C.

0	grados		5	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.475	0.001	0.002475	2.469	0.001	0.002469
2.5	0.001	0.0025	2.5	0.002	0.005
2.52	0.003	0.00756	2.52	0.003	0.00756
2.54	0.005	0.0127	2.54	0.005	0.0127
2.56	0.007	0.01792	2.56	0.008	0.02048
2.58	0.01	0.0258	2.58	0.011	0.02838
2.6	0.013	0.0338	2.6	0.015	0.039
2.62	0.017	0.04454	2.62	0.018	0.04716
2.64	0.021	0.05544	2.64	0.022	0.05808
2.66	0.025	0.0665	2.66	0.027	0.07182
2.68	0.029	0.07772	2.68	0.032	0.08576
2.7	0.034	0.0918	2.7	0.037	0.0999
2.72	0.039	0.10608	2.72	0.042	0.11424
2.74	0.045	0.1233	2.74	0.047	0.12878
2.76	0.05	0.138	2.76	0.053	0.14628
2.78	0.055	0.1529	2.78	0.059	0.16402
2.8	0.061	0.1708	2.8	0.064	0.1792
2.82	0.067	0.18894	2.82	0.07	0.1974
2.84	0.072	0.20448	2.84	0.076	0.21584
2.86	0.078	0.22308	2.86	0.082	0.23452
2.88	0.084	0.24192	2.88	0.088	0.25344
2.9	0.091	0.2639	2.9	0.095	0.2755
2.92	0.097	0.28324	2.92	0.101	0.29492
2.94	0.103	0.30282	2.94	0.108	0.31752
2.96	0.11	0.3256	2.96	0.114	0.33744
2.98	0.116	0.34568	2.98	0.121	0.36058
3	0.123	0.369	3	0.128	0.384
3.02	0.129	0.38958	3.02	0.135	0.4077
3.04	0.136	0.41344	3.04	0.142	0.43168
3.06	0.143	0.43758	3.06	0.149	0.45594
3.08	0.15	0.462	3.08	0.156	0.48048
3.1	0.157	0.4867	3.1	0.163	0.5053
3.12	0.165	0.5148	3.12	0.17	0.5304
3.14	0.172	0.54008	3.14	0.177	0.55578
3.16	0.179	0.56564	3.16	0.185	0.5846
3.18	0.186	0.59148	3.18	0.192	0.61056

3.2	0.194	0.6208	3.2	0.2	0.64
3.22	0.201	0.64722	3.22	0.207	0.66654
3.24	0.209	0.67716	3.24	0.215	0.6966
3.26	0.217	0.70742	3.26	0.223	0.72698
3.28	0.224	0.73472	3.28	0.231	0.75768
3.3	0.232	0.7656	3.3	0.239	0.7887
3.32	0.24	0.7968	3.32	0.247	0.82004
3.34	0.248	0.82832	3.34	0.254	0.84836
3.36	0.256	0.86016	3.36	0.263	0.88368
3.38	0.264	0.89232	3.38	0.271	0.91598
3.4	0.272	0.9248	3.4	0.279	0.9486
3.42	0.281	0.96102			

Tabla 9. Mediciones de corriente y voltaje a 10°C y 15°C.

10	Grados		15	grados	
					10
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.465	0.001	0.002465	2.459	0.001	0.002459
2.5	0.002	0.005	2.5	0.003	0.0075
2.52	0.004	0.01008	2.52	0.004	0.01008
2.54	0.006	0.01524	2.54	0.007	0.01778
2.56	0.009	0.02304	2.56	0.01	0.0256
2.58	0.012	0.03096	2.58	0.013	0.03354
2.6	0.015	0.039	2.6	0.017	0.0442
2.62	0.019	0.04978	2.62	0.021	0.05502
2.64	0.024	0.06336	2.64	0.025	0.066
2.66	0.028	0.07448	2.66	0.03	0.0798
2.68	0.033	0.08844	2.68	0.035	0.0938
2.7	0.038	0.1026	2.7	0.04	0.108
2.72	0.043	0.11696	2.72	0.046	0.12512
2.74	0.049	0.13426	2.74	0.052	0.14248
2.76	0.055	0.1518	2.76	0.057	0.15732
2.78	0.06	0.1668	2.78	0.063	0.17514
2.8	0.066	0.1848	2.8	0.069	0.1932
2.82	0.072	0.20304	2.82	0.076	0.21432
2.84	0.078	0.22152	2.84	0.082	0.23288
2.86	0.085	0.2431	2.86	0.088	0.25168
2.88	0.091	0.26208	2.88	0.095	0.2736
2.9	0.098	0.2842	2.9	0.101	0.2929
2.92	0.104	0.30368	2.92	0.108	0.31536
2.94	0.111	0.32634	2.94	0.115	0.3381
2.96	0.117	0.34632	2.96	0.121	0.35816
2.98	0.124	0.36952	2.98	0.129	0.38442
3	0.131	0.393	3	0.135	0.405
3.02	0.138	0.41676	3.02	0.143	0.43186
3.04	0.145	0.4408	3.04	0.15	0.456
3.06	0.152	0.46512	3.06	0.157	0.48042
3.08	0.16	0.4928	3.08	0.164	0.50512
3.1	0.167	0.5177	3.1	0.172	0.5332
3.12	0.174	0.54288	3.12	0.179	0.55848
3.14	0.182	0.57148	3.14	0.186	0.58404
3.16	0.189	0.59724	3.16	0.194	0.61304
3.18	0.196	0.62328	3.18	0.202	0.64236

3.2	0.204	0.6528	3.2	0.21	0.672
3.22	0.212	0.68264	3.22	0.217	0.69874
3.24	0.22	0.7128	3.24	0.225	0.729
3.26	0.228	0.74328	3.26	0.233	0.75958
3.28	0.236	0.77408	3.28	0.241	0.79048
3.3	0.247	0.8151	3.3	0.249	0.8217
3.32	0.255	0.8466	3.32	0.257	0.85324
3.34	0.264	0.88176	3.34	0.265	0.8851
3.36	0.272	0.91392	3.36	0.273	0.91728
3.38	0.28	0.9464	3.38	0.282	0.95316

Tabla 10. Mediciones de corriente y voltaje a 20°C y 25°C.

20	Grados		25	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.454	0.001	0.002454	2.48	0.002	0.00496
2.5	0.003	0.0075	2.5	0.003	0.0075
2.52	0.005	0.0126	2.52	0.005	0.0126
2.54	0.007	0.01778	2.54	0.007	0.01778
2.56	0.01	0.0256	2.56	0.01	0.0256
2.58	0.014	0.03612	2.58	0.013	0.03354
2.6	0.018	0.0468	2.6	0.017	0.0442
2.62	0.022	0.05764	2.62	0.022	0.05764
2.64	0.027	0.07128	2.64	0.026	0.06864
2.66	0.032	0.08512	2.66	0.031	0.08246
2.68	0.037	0.09916	2.68	0.036	0.09648
2.7	0.042	0.1134	2.7	0.042	0.1134
2.72	0.048	0.13056	2.72	0.047	0.12784
2.74	0.054	0.14796	2.74	0.053	0.14522
2.76	0.059	0.16284	2.76	0.059	0.16284
2.78	0.065	0.1807	2.78	0.065	0.1807
2.8	0.071	0.1988	2.8	0.071	0.1988
2.82	0.078	0.21996	2.82	0.078	0.21996
2.84	0.084	0.23856	2.84	0.084	0.23856
2.86	0.091	0.26026	2.86	0.09	0.2574
2.88	0.097	0.27936	2.88	0.097	0.27936
2.9	0.104	0.3016	2.9	0.104	0.3016
2.92	0.111	0.32412	2.92	0.11	0.3212
2.94	0.118	0.34692	2.94	0.117	0.34398
2.96	0.124	0.36704	2.96	0.124	0.36704
2.98	0.132	0.39336	2.98	0.131	0.39038
3	0.139	0.417	3	0.138	0.414
3.02	0.146	0.44092	3.02	0.145	0.4379
3.04	0.153	0.46512	3.04	0.152	0.46208
3.06	0.16	0.4896	3.06	0.16	0.4896
3.08	0.167	0.51436	3.08	0.167	0.51436
3.1	0.175	0.5425	3.1	0.175	0.5425
3.12	0.182	0.56784	3.12	0.182	0.56784
3.14	0.19	0.5966	3.14	0.19	0.5966
3.16	0.197	0.62252	3.16	0.197	0.62252
3.18	0.205	0.6519	3.18	0.205	0.6519

3.2	0.213	0.6816	3.2	0.213	0.6816
3.22	0.221	0.71162	3.22	0.221	0.71162
3.24	0.229	0.74196	3.24	0.229	0.74196
3.26	0.236	0.76936	3.26	0.236	0.76936
3.28	0.245	0.8036	3.28	0.244	0.80032
3.3	0.252	0.8316	3.3	0.253	0.8349
3.32	0.261	0.86652	3.32	0.261	0.86652
3.34	0.269	0.89846	3.34	0.269	0.89846
3.36	0.277	0.93072	3.36	0.277	0.93072

Tabla 11. Mediciones de corriente y voltaje a 30°C y 35°C.

30	Grados		35	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.449	0.001	0.002449	2.443	0.001	0.002443
2.48	0.002	0.00496	2.48	0.002	0.00496
2.5	0.003	0.0075	2.5	0.004	0.01
2.52	0.005	0.0126	2.52	0.006	0.01512
2.54	0.008	0.02032	2.54	0.008	0.02032
2.56	0.011	0.02816	2.56	0.012	0.03072
2.58	0.014	0.03612	2.58	0.015	0.0387
2.6	0.018	0.0468	2.6	0.02	0.052
2.62	0.023	0.06026	2.62	0.024	0.06288
2.64	0.027	0.07128	2.64	0.029	0.07656
2.66	0.033	0.08778	2.66	0.034	0.09044
2.68	0.038	0.10184	2.68	0.039	0.10452
2.7	0.043	0.1161	2.7	0.045	0.1215
2.72	0.049	0.13328	2.72	0.051	0.13872
2.74	0.055	0.1507	2.74	0.057	0.15618
2.76	0.061	0.16836	2.76	0.063	0.17388
2.78	0.067	0.18626	2.78	0.069	0.19182
2.8	0.073	0.2044	2.8	0.075	0.21
2.82	0.08	0.2256	2.82	0.082	0.23124
2.84	0.086	0.24424	2.84	0.088	0.24992
2.86	0.093	0.26598	2.86	0.095	0.2717
2.88	0.099	0.28512	2.88	0.102	0.29376
2.9	0.106	0.3074	2.9	0.109	0.3161
2.92	0.113	0.32996	2.92	0.116	0.33872
2.94	0.12	0.3528	2.94	0.123	0.36162
2.96	0.127	0.37592	2.96	0.13	0.3848
2.98	0.134	0.39932	2.98	0.137	0.40826
3	0.141	0.423	3	0.144	0.432
3.02	0.149	0.44998	3.02	0.152	0.45904
3.04	0.156	0.47424	3.04	0.159	0.48336
3.06	0.163	0.49878	3.06	0.167	0.51102
3.08	0.171	0.52668	3.08	0.174	0.53592
3.1	0.178	0.5518	3.1	0.182	0.5642
3.12	0.186	0.58032	3.12	0.189	0.58968
3.14	0.194	0.60916	3.14	0.197	0.61858
3.16	0.201	0.63516	3.16	0.205	0.6478
3.18	0.209	0.66462	3.18	0.212	0.67416

3.2	0.217	0.6944	3.2	0.221	0.7072
3.22	0.225	0.7245	3.22	0.228	0.73416
3.24	0.233	0.75492	3.24	0.237	0.76788
3.26	0.241	0.78566	3.26	0.244	0.79544
3.28	0.249	0.81672	3.28	0.253	0.82984
3.3	0.257	0.8481	3.3	0.261	0.8613
3.32	0.265	0.8798	3.32	0.269	0.89308
3.34	0.273	0.91182	3.34	0.277	0.92518
3.36	0.282	0.94752			

Tabla 12. Mediciones de corriente y voltaje a 40°C y 45°C.

40	Grados		45	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.438	0.001	0.002438	2.43	0.001	0.00243
2.48	0.003	0.00744	2.48	0.003	0.00744
2.5	0.004	0.01	2.5	0.005	0.0125
2.52	0.007	0.01764	2.52	0.007	0.01764
2.54	0.009	0.02286	2.54	0.01	0.0254
2.56	0.013	0.03328	2.56	0.014	0.03584
2.58	0.016	0.04128	2.58	0.018	0.04644
2.6	0.021	0.0546	2.6	0.022	0.0572
2.62	0.026	0.06812	2.62	0.027	0.07074
2.64	0.03	0.0792	2.64	0.032	0.08448
2.66	0.036	0.09576	2.66	0.038	0.10108
2.68	0.041	0.10988	2.68	0.043	0.11524
2.7	0.047	0.1269	2.7	0.049	0.1323
2.72	0.052	0.14144	2.72	0.055	0.1496
2.74	0.059	0.16166	2.74	0.061	0.16714
2.76	0.065	0.1794	2.76	0.067	0.18492
2.78	0.071	0.19738	2.78	0.074	0.20572
2.8	0.077	0.2156	2.8	0.08	0.224
2.82	0.084	0.23688	2.82	0.087	0.24534
2.84	0.091	0.25844	2.84	0.093	0.26412
2.86	0.097	0.27742	2.86	0.1	0.286
2.88	0.104	0.29952	2.88	0.107	0.30816
2.9	0.111	0.3219	2.9	0.114	0.3306
2.92	0.118	0.34456	2.92	0.121	0.35332
2.94	0.125	0.3675	2.94	0.128	0.37632
2.96	0.132	0.39072	2.96	0.135	0.3996
2.98	0.14	0.4172	2.98	0.143	0.42614
3	0.147	0.441	3	0.15	0.45
3.02	0.154	0.46508	3.02	0.158	0.47716
3.04	0.162	0.49248	3.04	0.165	0.5016
3.06	0.169	0.51714	3.06	0.172	0.52632
3.08	0.177	0.54516	3.08	0.18	0.5544
3.1	0.184	0.5704	3.1	0.188	0.5828
3.12	0.192	0.59904	3.12	0.196	0.61152
3.14	0.2	0.628	3.14	0.203	0.63742
3.16	0.208	0.65728	3.16	0.211	0.66676
3.18	0.215	0.6837	3.18	0.219	0.69642

3.2	0.223	0.7136	3.2	0.227	0.7264
3.22	0.231	0.74382	3.22	0.235	0.7567
3.24	0.24	0.7776	3.24	0.243	0.78732
3.26	0.247	0.80522	3.26	0.251	0.81826
3.28	0.256	0.83968	3.28	0.259	0.84952
3.3	0.263	0.8679	3.3	0.267	0.8811
3.32	0.272	0.90304	3.32	0.275	0.913
3.34	0.28	0.9352	3.34	0.283	0.94522

Tabla 13. Mediciones de corriente y voltaje a 50°C y 55°C.

50	Grados		55	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
2.427	0.001	0.002427	2.42	0.001	0.00242
2.48	0.003	0.00744	2.48	0.004	0.00992
2.5	0.005	0.0125	2.5	0.006	0.015
2.52	0.008	0.02016	2.52	0.008	0.02016
2.54	0.011	0.02794	2.54	0.011	0.02794
2.56	0.015	0.0384	2.56	0.015	0.0384
2.58	0.019	0.04902	2.58	0.019	0.04902
2.6	0.023	0.0598	2.6	0.024	0.0624
2.62	0.028	0.07336	2.62	0.028	0.07336
2.64	0.033	0.08712	2.64	0.033	0.08712
2.66	0.039	0.10374	2.66	0.039	0.10374
2.68	0.044	0.11792	2.68	0.044	0.11792
2.7	0.05	0.135	2.7	0.05	0.135
2.72	0.056	0.15232	2.72	0.056	0.15232
2.74	0.063	0.17262	2.74	0.063	0.17262
2.76	0.069	0.19044	2.76	0.069	0.19044
2.78	0.076	0.21128	2.78	0.075	0.2085
2.8	0.082	0.2296	2.8	0.082	0.2296
2.82	0.089	0.25098	2.82	0.092	0.25944
2.84	0.095	0.2698	2.84	0.095	0.2698
2.86	0.102	0.29172	2.86	0.102	0.29172
2.88	0.109	0.31392	2.88	0.109	0.31392
2.9	0.116	0.3364	2.9	0.116	0.3364
2.92	0.123	0.35916	2.92	0.123	0.35916
2.94	0.131	0.38514	2.94	0.13	0.3822
2.96	0.138	0.40848	2.96	0.138	0.40848
2.98	0.145	0.4321	2.98	0.145	0.4321
3	0.153	0.459	3	0.152	0.456
3.02	0.16	0.4832	3.02	0.16	0.4832
3.04	0.168	0.51072	3.04	0.167	0.50768
3.06	0.175	0.5355	3.06	0.175	0.5355
3.08	0.183	0.56364	3.08	0.182	0.56056
3.1	0.191	0.5921	3.1	0.19	0.589
3.12	0.198	0.61776	3.12	0.198	0.61776
3.14	0.206	0.64684	3.14	0.205	0.6437
3.16	0.214	0.67624	3.16	0.213	0.67308
3.18	0.22	0.6996	3.18	0.221	0.70278

3.2	0.23	0.736	3.2	0.229	0.7328
3.22	0.238	0.76636	3.22	0.237	0.76314
3.24	0.246	0.79704	3.24	0.245	0.7938
3.26	0.254	0.82804	3.26	0.253	0.82478
3.28	0.262	0.85936	3.28	0.261	0.85608
3.3	0.27	0.891	3.3	0.269	0.8877
3.32	0.279	0.92628	3.32	0.277	0.91964

60	Grados	
Voltaje	Corriente	Potencia
2.412	0.001	0.002412
2.48	0.004	0.00992
2.5	0.006	0.015
2.52	0.009	0.02268
2.54	0.012	0.03048
2.56	0.016	0.04096
2.58	0.02	0.0516
2.6	0.025	0.065
2.62	0.03	0.0786
2.64	0.035	0.0924
2.66	0.041	0.10906
2.68	0.046	0.12328
2.7	0.052	0.1404
2.72	0.058	0.15776
2.74	0.065	0.1781
2.76	0.071	0.19596
2.78	0.078	0.21684
2.8	0.084	0.2352
2.82	0.091	0.25662
2.84	0.097	0.27548
2.86	0.105	0.3003
2.88	0.111	0.31968
2.9	0.119	0.3451
2.92	0.126	0.36792
2.94	0.133	0.39102
2.96	0.14	0.4144
2.98	0.148	0.44104
3	0.155	0.465
3.02	0.162	0.48924
3.04	0.17	0.5168

3.06	0.178	0.54468
3.08	0.185	0.5698
3.1	0.193	0.5983
3.12	0.201	0.62712
3.14	0.208	0.65312
3.16	0.216	0.68256
3.18	0.228	0.72504
3.2	0.236	0.7552
3.22	0.244	0.78568
3.24	0.252	0.81648
3.26	0.26	0.8476
3.28	0.268	0.87904
3.3	0.272	0.8976
3.32	0.281	0.93292

Anexo 5. Hoja de datos del módulo de potencia (LMT-P12W-77-N)

MÓDULOS DE LEDs DE POTENCIA





MÓDULO DE POTENCIA 12W

LMT-P12Y-77-N

Color del LED

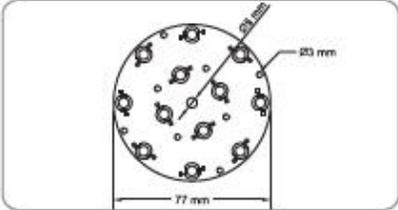
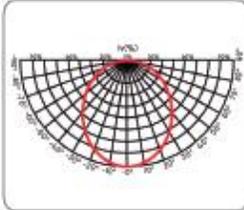
Especificaciones

<p>Tipo de LED: Potencia de 1W Ángulo de apertura: 120 grados Encapsulado transparente Base para disipador de calor</p>	<p>Temperatura de operación: -35°C a 60°C Corriente nominal: 350mA Número de LEDs: 12 LEDs</p>
--	--

Y = Colores disponibles	Temperatura de Color [K]	Voltaje de Operación [V]		Consumo [W]	Flujo Luminoso [lm]	
		Min	Max		Min	Max
ww	2800-2900 K	37	40	12	550	600
w	5000-5500 K	37	40	12	1150	1200

Accesorios
 LED-DRIVER-12X1W-300-SP
 LED-DRIVER-12X1W-300/127-
 LED-DRIVER-12X1W-320/127V

Dimensiones

Nota: Es necesario dotar al módulo de un disipador de calor adecuado con el fin de mantenerlo dentro de la temperatura de operación especificada, de lo contrario una temperatura excesiva causará una degradación o daño permanente.



-17-