

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE IRAPUATO



**ESTUDIOS CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ
OFICIAL
NÚMERO 11-00065**

**ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO DE LOS MÓDULOS
LED CONSIDERANDO LOS CICLOS TÉRMICOS**

OPCIÓN I: TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA

ING. ANA PAOLA VÁZQUEZ VENEGAS

DIRECTORES DE TESIS

DR. MARIO ALBERTO JUÁREZ BALDERAS

DR. GILBERTO MUÑOZ MORENO

IRAPUATO, GTO.

Diciembre, 2021



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Irapuato, Guanajuato, **13/diciembre/2021**

OFICIO No: CIPI-004/2021

ASUNTO: Autorización de impresión de tesis de maestría

DR. ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ
PRESIDENTE DEL CONSEJO DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por medio de la presente y a solicitud del comité tutorial integrado por:

Dr. Mario Alberto Juárez Balderas
Dr. Gilberto Muñoz Moreno
Dr. José Miguel Sosa Zúñiga
M.C. José Juan Alfaro Rodríguez

Se autoriza la impresión de la tesis titulada "Estudio de los métodos predictivos para módulos LED considerando los ciclos térmicos" realizada por el estudiante C. Ana Paola Vazquez Venegas con número de control IP19110031 la cual ha sido desarrollada dentro del programa de la Maestría en Ingeniería Electrónica bajo la dirección del Dr. Mario Alberto Juárez y la codirección del Dr. Gilberto Muñoz Moreno y ha sido revisada y aprobada por el comité tutorial antes mencionado.

Sin otro en particular, le envío un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica
Espíritu de Excelencia en Desarrollo Tecnológico
EDUCACIÓN | **TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE IRAPUATO
DIRECCIÓN ACADÉMICA

M. I. OSCAR OMAR CUIN MACEDO
TITULAR DE LA DIRECCIÓN ACADÉMICA
PRESIDENTE DEL CIPI
TECNM/ITS DE IRAPUATO

ccp. M. I. J. Sacramento Solórzano L. Titular de la Coordinación de Ingeniería Electrónica
M.C. Akira Torreblanca Ponce Titular del Departamento de Investigación

para su conocimiento y atención mismo fin

ARCHIVO
00CM/atp



Carr. Irapuato - Silao km 12.5 Colonia El Copal,
Irapuato, Guanajuato
C.P. 36821 Tels. 462 6967900 y 6067602
tecnm.mx | irapuato.tecnm.mx





Constancia de aprobación de tesis

La tesis **Estudio del envejecimiento de los módulos LED considerando los ciclos térmicos** presentada para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería Electrónica con la opción en Electrónica de Potencia fue elaborada por el Ing. **Ana Paola Vázquez Venegas** y aprobada el **13 de Diciembre de 2021** por los suscritos, designados por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.

Dr. Mario Alberto Juárez Balderas

(Director de tesis)

Dr. Gilberto Muñoz Moreno

(Director de tesis)

Dr. José Miguel Sosa Zúñiga

(Sinodal)

M. C. José Juan Alfaro Rodríguez

(Sinodal)



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Eléctrica y Electrónica de Potencia (LEEP) del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, bajo la dirección del Dr. Mario Alberto Juárez Balderas en colaboración con el Dr. Gilberto Muñoz Moreno adscritos a este instituto.

Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de la beca para este estudio de posgrado, durante el periodo de la maestría, gracias porque fue posible culminar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico Superior de Irapuato y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Quiero dedicar esta página para agradecer a todas las personas que con su apoyo me han impulsado a terminar este trabajo, también agradecer a Dios por darme la oportunidad de alcanzar otro logro académico.

A mis asesores de tesis, en especial al Dr. Mario Alberto Juárez Balderas y al Dr. Gilberto Muñoz Moreno, por su esfuerzo y dedicación a este trabajo de investigación, por su tiempo, sus consejos, su perseverancia y su paciencia, fueron clave para esta etapa que se concluye de manera satisfactoria.

A mis profesores en general, que durante la maestría me brindaron los conocimientos técnicos en diferentes materias, que dedicaron su tiempo en preparar clases, que siempre estuvieron disponibles para resolver dudas e incluso me dieron algún consejo para mejorar, ustedes merecen todo mi respeto y admiración.

A mis padres Jorge Alberto y Ma. Estela Dolores, a mi hermano Jorge Alberto, que con su apoyo durante el proceso del posgrado estuvieron para mí siempre en todos los sentidos, este logro no solo es mío también es de ustedes, un agradecimiento muy especial que se merecen por todo el amor, la paciencia, los buenos consejos, el creer en mí, el alentarme a no desistir y acabar hasta el final.

A mis amigos porque siempre estuvieron en los buenos y en los no tan buenos momentos, gracias por compartir siete años de formación conmigo y por permitirme aprender de ustedes los aprecio mucho, gracias por su ayuda y su apoyo incondicional durante todo el camino.

A mi esposo Luis Rogelio, por su apoyo durante el último periodo de esta etapa de formación, por tu paciencia y tu amor, muchas gracias por confiar en mí, estar ahí en todo momento y apoyar a que culminará este trabajo.

A mis revisores por tomarse el tiempo de revisar el documento de tesis, por su tiempo, su esfuerzo, las buenas críticas, por su apoyo muchas gracias.

A todos ustedes INFINITAS GRACIAS

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
NOTACIÓN	vi
OBJETIVOS DE LA TESIS.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Capítulo I - INTRODUCCIÓN	3
1.1 Luz e iluminación	4
1.1.1 Tipos de luz.....	4
1.2 Historia del LED	5
1.3 Conceptos básicos del LED	6
1.4 Funcionamiento del LED	6
1.5 Temperatura de unión T_j	7
1.6 Eficacia y eficiencia del LED	7
1.7 Tipos de lámparas LED.....	8
1.8 LEDs blancos	8
1.9 Ventajas y desventajas del dispositivo LED.....	8
Capítulo II - ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1 LED de potencia.....	11
2.2 Vida útil	11
2.3 Formas de alimentación del LED	12
2.4 Curva característica del LED.....	13
2.5 Tipos de fallas en LEDs	13
2.6 Tipos de desgaste en el LED	15
2.7 Resistencia térmica R_J	17
2.8 Confiabilidad	19

2.9 Modelos de distribución de confiabilidad.....	20
2.10 Normas internacionales en iluminación LED.....	21
2.11 Métodos de predicción	22
2.12 Ciclo térmico y modelo térmico del LED	22
Capítulo III - PRUEBAS.....	24
3.1 Pruebas.....	25
3.2 Pruebas acumulativa de temperatura	25
3.2.1 Mediciones a realizar	25
3.2.2 Datos obtenidos.....	26
3.3 Pruebas impulsionales, de tiempo de establecimiento.....	39
3.4 Análisis del voltaje en función de la temperatura	42
3.5 Análisis en función de las variables intrínsecas del LED, para obtener un escalón de la resistencia dinámica en función de la temperatura de unión	46
3.6 Análisis de la resistencia dinámica en función de las formas de onda de alimentación.....	51
3.6.1 FFT de corriente del LED alimentado con media onda.....	52
3.6.2 FFT de corriente del LED alimentado con onda completa	54
Capítulo IV - RESULTADOS	56
4.1 Resistencia $R\tau$ para cada LED	57
4.2 Constantes de tiempo para cada LED	60
4.3 Valores de resistencia y capacitancia para el modelo térmico del LED.	60
Conclusiones.....	61
Anexo A.....	66
Anexo B.....	73

RESUMEN

Existen tres formas de cuantificar la vida útil del LED, la primera es medir la degradación de los lúmenes, la segunda es ver el desgaste físico en el cable de unión y la última es medir los efectos térmicos en la resistencia del LED. En el desarrollo de este trabajo se presenta un estudio de los efectos de la resistencia térmica denominada (R_j) del LED, estos efectos se pueden analizar a través de los pequeños ciclos térmicos por los que pasa el dispositivo al momento del encendido y el apagado.

Los LEDs utilizados fueron alimentados con diferentes tipos de onda usados comercialmente, las cuales son señales de corriente continua, rectificador de media onda, rectificador de onda completa, modulación por ancho de pulso. El ciclo térmico en la forma de media onda se puede observar que dura ocho milisegundos encendido y ocho milisegundos apagados, es esos intervalos de tiempo la resistencia R_j cambia con los sobre esfuerzos a los que se somete y la temperatura en el LED también es diferente cada intervalo, por lo tanto influye en el deterioro de la vida útil del LED.

Se realizan tres pruebas para poder analizar los pequeños ciclos térmicos, la primera es una prueba acumulativa de temperatura se obtuvo la curva V-I del LED y la temperatura de unión con un efecto acumulativo de calor en la resistencia tomando en cuenta la temperatura ambiente y la temperatura del disipador. La segunda prueba es impulsional o de tiempo de establecimiento donde se introduce un escalón de potencia en el orden de nanosegundos para que en esta prueba el efecto acumulativo de calor de la temperatura de la resistencia no influya. La última fue una prueba de resistencia en frío para observar y medir las variaciones de la resistencia dinámica.

Al analizar todos los resultados se hizo la comparación basados en el pequeño ciclo térmico que es la temperatura con los resultados obtenidos anteriormente en un trabajo previo se sigue comprobando que las formas de onda más recomendadas para alimentar un LED es la corriente continua y la PWM, esto se sustenta en que la forma de media onda rectificadas, tiene un constante encendido y apagado que el ojo humano no puede percibir pero si notar en la degradación del material y en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores.

Es importante mencionar que estos resultados obtenidos no son una base estricta, son estudios comparativos para ver por qué el LED envejece, haciendo énfasis en que los valores obtenidos para cada LED de resistencia y capacitancia no predicen la vida útil del LED, estos valores dan un indicio de cuál es el efecto que causa la resistencia y como va degradándose.

ABSTRACT

There are three ways to quantify LED useful life. The first is to measure lumen degradation, the second is to determine physical deterioration of the bonding wire, and the last is to measure thermal effects on LED resistance. In the development of this work, a study of the effects of the thermal resistance of the LED, called R_j , is presented. These effects can be analyzed through the small thermal cycles that occur in the device when it is turned on and off.

The LEDs used were tested with power sources with different types of waveforms that are used commercially, and that correspond to waveforms of direct current, half-wave rectifier, full-wave rectifier and pulse width modulation. The thermal cycle for the half-wave rectifier waveform is eight milliseconds on and eight milliseconds off. In these time intervals, the resistance R_j changes according to the over efforts to which it is subjected and the temperature in the LED is also different in each interval. This, therefore, influences the deterioration of the useful life of the LED.

Three tests are performed to analyze the small thermal cycles. The first is a cumulative temperature test whereby the V-I curve of the LED and the junction temperature with a cumulative effect of heat on the resistor were obtained. This test takes into account the ambient temperature and the heatsink temperature. The second is an impulse test or settling time test where a power step on the order of nanoseconds is introduced so that the cumulative effect of the resistance heat has no effect. The last was a cold resistance test to measure variations in dynamic resistance.

Analyzing all the results, a comparison was made based on the small thermal cycle. This, together with the results obtained in a previous work, show that the most recommended waveforms to power an LED are direct current and pulse width modulation. In particular, the half-wave rectified waveform has a periodic switching on and off that cannot be perceived by the human eye but which increases the degradation of the LED material.

It is important to mention that these results obtained are not a strict basis. They are comparative studies that allow studying the aging of the LED. It is emphasized that the values obtained for each LED of resistance and capacitance do not predict the useful life of the LED. However, they serve as an indication of the deteriorating effect caused by the increasing of the LED resistance.

NOTACIÓN

ACRÓNIMOS

LED	Lighting Emitting Diode (Diodo emisor de luz).
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación de ancho de pulso).
PN	Unión de un material tipo P con un material tipo N.
P	Material tipo P.
N	Material tipo N.
InGaP	Fosforo de Indio y Galio.
GaAs	Arseniuro de Galio.
GaN	Nitruro de Galio.
IESNA	Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica.
TM21	Estándar para hacer pruebas en los LEDs.
LM80	Curva estándar de degradación.
IES	Asociación de Ingeniería en Iluminación.
FFT	Transformada rápida de Fourier.

VARIABLES

V	Voltaje.
I	Corriente.
R_j	Resistencia térmica.
lm/m^2	Lumen sobre metro cuadrado
V_D	Voltaje del LED.
I_D	Corriente del LED.
R_D	Resistencia del LED.
V	Voltaje.
I	Intensidad de corriente.
R	Resistencia.
C	Capacitancia.
W	Watts.
T_j	Temperatura de unión.
nF	Nano faradios.
Ω	Ohm.
V_{F0}	Voltaje de referencia.
S_{VF}	Voltaje de sensibilidad.
$P_{H1,2}$	Potencia de calentamiento.
R_{th}	Resistencia de unión.
T_A	Temperatura ambiente.
R_{thjX}	Resistencia térmica.
τ_{thi}	Constante térmica.
τ	Constante de tiempo.
λ	Tasa de fallos.
mA	Miliamperios.
R_{j-PT}	Resistencia de evacuación de calor de la unión a la almohadilla.
R_{PT-PCB}	Resistencia a la transferencia de calor de la almohadilla a la placa.
R_{PCB}	Resistencia a la transferencia de calor a la placa.
$R_{PCB-DISIP}$	Resistencia a la transferencia de calor de la placa al disipador.
R_{DISIP}	Resistencia a la transferencia de calor del disipador.
$R_{DISIP-AIRE}$	Resistencia a la transferencia de calor del disipador al ambiente.
P_{LED}	Potencia del LED.
ΔV_F	Diferencia de voltaje de referencia.
ΔP_H	Diferencia de la potencia de calentamiento.

K	Factor de sensibilidad recíproca.
$F(t)$	Función de probabilidad.
$R(t)$	escalón de probabilidad.
R_a	Función de fiabilidad.
n	Número de eventos de falla.
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de luz naturales y artificiales.	5
Figura 2. Unión de material PN.	5
Figura 3. Espectro electromagnético visible al ojo humano.....	7
Figura 4. Partes del LED de potencia.....	11
Figura 5. Factores que influyen en la vida útil de un LED.	12
Figura 6. Tipos de formas de onda para alimentar LEDs de potencia.....	13
Figura 7. Curva característica V-I del LED.	13
Figura 8. Posibles escenarios de validez y confiabilidad. A) Todas las mediciones son parecidas, pero se alejan de la realidad. B) Las mediciones captan todo el espectro del fenómeno, pero son muy diferentes entre ellas. C) No se capta todo el fenómeno y las mediciones son muy disímiles entre ellas. D) Todas las mediciones son parecidas y se ajustan a la realidad de lo que se está midiendo.	19
Figura 9. Curva de Davies o de la bañera.	20
Figura 10. Modelos térmicos Foster y Cauer.....	23
Figura 11. Banco de pruebas para obtener la curva V-I de cada LED.	26
Figura 12. LED bajo prueba visto desde la cámara térmica.	26
Figura 13. Gráfica de la curva V-I del LED nuevo.	28
Figura 14. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED nuevo.	28
Figura 15. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con media onda vs el LED nuevo.	30
Figura 16. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con media onda vs el LED nuevo.	30
Figura 17. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con onda completa vs el LED nuevo.....	32
Figura 18. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con onda completa vs el LED nuevo.....	32
Figura 19. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con modulación de ancho de pulso vs el LED nuevo.....	34
Figura 20. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con modulación de ancho de pulso vs el LED nuevo.....	34
Figura 21. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con corriente continua vs el LED nuevo.....	36

Figura 22. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con corriente continua vs el LED nuevo.....	36
Figura 23. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con un driver comercial vs el LED nuevo.....	38
Figura 24. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con onda completa.....	38
Figura 25. Diagrama de circuito impulsor.....	39
Figura 26. Circuito impulsor implementado.....	40
Figura 27. LEDs reales utilizados y horno.....	42
Figura 28. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED nuevo.....	44
Figura 29. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con media onda.....	44
Figura 30. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con onda completa.....	45
Figura 31. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con PWM.....	45
Figura 32. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con corriente continua.....	45
Figura 33. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con un driver comercial.....	46
Figura 34. Resistencias parásitas en el LED.....	47
Figura 35. Resistencia dinámica en base a la corriente y el voltaje a través del LED.....	48
Figura 36. Resistencia dinámica de un LED nuevo.....	49
Figura 37. Resistencia dinámica de un LED alimentado con media onda.....	49
Figura 38. Resistencia dinámica de un LED alimentado con onda completa.....	50
Figura 39. Resistencia dinámica de un LED alimentado con PWM.....	50
Figura 40. Resistencia dinámica de un LED alimentado con corriente continua.....	51
Figura 41. Resistencia dinámica de un LED alimentado con un driver comercial.....	51
Figura 42. FFT de corriente de media onda dada por Mathcad.....	52
Figura 43. Forma de onda de la componente en DC sumada a la componente AC dada por Mathcad.....	53

Figura 44. Curva V-I del LED nuevo alimentado con una corriente de media onda.	53
Figura 45. FFT de corriente de onda completa dada por Mathcad.....	54
Figura 46. Forma de onda Forma de onda de la componente en DC sumada a la componente AC dada por Mathcad.....	55
Figura 47. Curva V-I del LED nuevo alimentado con una corriente de onda completa.....	55
Figura 48. Gráfica de la resistencia tau del LED nuevo con ajuste de curva en Matlab.	58
Figura 49. Gráfica de la resistencia tau del alimentado con media onda con ajuste de curva en Matlab.....	59
Figura 50. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con onda completa con ajuste de curva en Matlab.....	59
Figura 51. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con modulación por ancho de pulso con ajuste de curva en Matlab.	59
Figura 52. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con corriente continua con ajuste de curva en Matlab.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes tipos de fuentes de luz en relación a la eficacia y la vida útil. ..7	
Tabla 2. Sitios de fallas en los LEDs. 14	14
Tabla 3. Variables térmicas y variables eléctricas.23	23
Tabla 4. LED nuevo.27	27
Tabla 5. LED alimentado con media onda.29	29
Tabla 6. LED alimentado con onda completa.31	31
Tabla 7. LED alimentado con modulación de ancho de pulso.33	33
Tabla 8. LED alimentado con corriente continua.35	35
Tabla 9. LED alimentado con un driver comercial.37	37
Tabla 10. Cálculo de resistencias para el LED nuevo.40	40
Tabla 11. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con media onda.40	40
Tabla 12. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con onda completa.41	41
Tabla 13. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con modulación de ancho de pulso.41	41
Tabla 14. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con corriente continua.41	41
Tabla 15. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con el driver comercial.42	42
Tabla 16. Características del LED GOLDEN DRAGON LUW W5SM.43	43
Tabla 17. Puntos de voltaje y corriente para cada LED.43	43
Tabla 18. Coeficiente de temperatura experimental de voltaje directo para cada LED.46	46
Tabla 19. Resistencias obtenidas para el LED nuevo a diferentes temperaturas. 57	57
Tabla 20. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con media onda a diferentes temperaturas.57	57
Tabla 21. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con onda completa a diferentes temperaturas.57	57
Tabla 22. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con modulación de ancho de pulso a diferentes temperaturas.57	57
Tabla 23. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con corriente continua a diferentes temperaturas.57	57

Tabla 24. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con driver comercial a diferentes temperaturas.	58
Tabla 25. Constantes de tiempo para cada LED (experimentales).	60
Tabla 26. Valores de resistencia y de capacitancia para el modelo térmico.	60

OBJETIVOS DE LA TESIS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar y analizar los efectos de los ciclos térmicos en la vida útil de los LEDs de potencia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la confiabilidad en LEDs y los parámetros que influyen en la vida útil.
- Estudiar las técnicas de predicción de la vida útil de los LEDs de potencia.
- Estudiar y analizar los tipos de desgaste en LEDs de potencia.
- Estudiar y analizar los ciclos térmicos en LEDs de potencia y su modelo térmico.
- Realizar y analizar pruebas de ciclos térmicos en dispositivos semiconductores.
- Realizar un banco de pruebas para experimentar los ciclos térmicos en LEDs de potencia.

Capítulo I - INTRODUCCIÓN

1.1 LUZ E ILUMINACIÓN

La luz en la naturaleza tiene una gran importancia, mediante los rayos solares llega hasta nosotros energía luminosa y calorífica en forma de radiaciones que forman parte del espectro electromagnético que abarca desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio, esta forma de radiación electromagnética es visible para el ojo humano que está dentro de los 400 y 700 nanómetros de longitud de onda. La luz, son ondas electromagnéticas que propagan la energía producida por oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos, las características fundamentales de estas ondas son su longitud, la frecuencia y la velocidad en la que se propagan en un régimen periódico en intervalos regulares de tiempo. [1]

Los cuerpos luminosos al emitir un flujo, iluminan a los cuerpos en su alrededor y estos al ser iluminados adquieren la propiedad de iluminar a otros, por ejemplo, el Sol y la Luna que iluminan a la Tierra. La iluminación es una cantidad física que se puede definir como la razón de flujo luminoso proveniente de un cuerpo entre el área perpendicular al flujo, iluminada en otro cuerpo. La unidad de iluminación en el SI es el Lux, cuya equivalencia es el lm/m^2 . [2]

1.1.1 TIPOS DE LUZ

La fuente de luz es un objeto capaz de emitir luz visible. Se puede clasificar en:

- Naturales: Son aquellas que pueden producir luz de manera natural, como el sol y el fuego.
- Artificiales: Son aquellas en las que el ser humano ha influido y las ha creado, como las ampollitas, las velas, lámparas, los fósforos, los tubos fluorescentes, entre otros. La mayor parte de estas fuentes funcionan con energía eléctrica.

La luz que sale de las fuentes luminosas viaja siempre en línea recta y en todas las direcciones, cada una de las líneas rectas en las que viaja la luz se le denomina rayo de luz. La velocidad con la que viaja la luz depende del medio que atraviesa. En la Figura 1 se ilustra un esquema de las fuentes de luz naturales y artificiales [1-3].

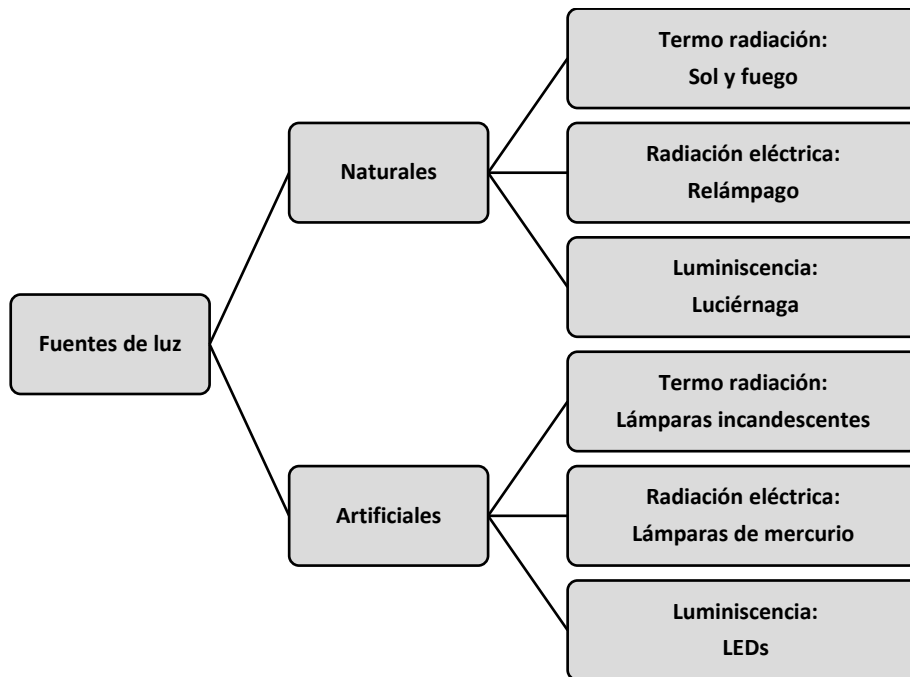


Figura 1. Fuentes de luz naturales y artificiales.

En la actualidad, todos los sistemas de iluminación han tenido un gran avance tecnológico, el desarrollo en esta área ha propuesto dispositivos más eficientes como lo es la iluminación de estado sólido y es aquí donde entran los diodos emisores de luz conocidos como(LEDs). Estos dispositivos son demandados en un gran número de aplicaciones que abarcan desde lo doméstico hasta lo industrial [3].

1.2 HISTORIA DEL LED

El LED es un dispositivo semiconductor opto-electrónico que se ilustra en la Figura 2 que emite luz policromática, cuando es polarizado de manera directa por el cual circula la corriente eléctrica [4].

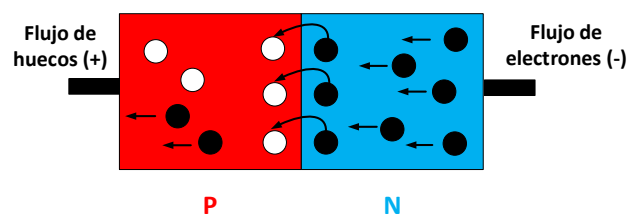


Figura 2. Unión de material PN.

Los LED son diodos semiconductores que permiten que la corriente fluya en una sola dirección. El material semiconductor está en capas en forma de unión PN. Cuando se aplica una tensión a sus terminales externas, los electrones pueden recombinarse con los huecos dentro del dispositivo, liberando la energía en forma de fotones. De ahí el nombre de diodo emisor de luz o LED.

Todos los diodos pueden emitir radiación electromagnética, los materiales semiconductores utilizados en los LED se seleccionan para emitir en el rango visible, diversos materiales producen luz con diferentes longitudes de onda y, por lo tanto, diferentes colores. El material N tiene un exceso de electrones (que son electrones libres), mientras que el material P tiene electrones que faltan, es decir, huecos.

La aplicación de un voltaje a través de la unión PN mueve electrones hacia la unión de los dos materiales, los electrones del material N se introducen en los huecos del material P, al hacerlo, el electrón pasa de un nivel de energía alto a uno más bajo emitiendo la diferencia de energía en forma de luz o calor.

Para la mayoría de las aplicaciones, la luz blanca de los LED se produce a partir de un chip que es una pieza rectangular conformada por capas de distintos materiales semiconductores [5-7]. Este chip también produce longitudes de onda más cortas (invisibles) que estimulan un recubrimiento de fósforo para que produzca luz blanca.

Los dispositivos LEDs suelen fallar por degradación. Este tipo de falla ocurre en algún objeto de estudio en el que se pierde sus características de manera gradual a lo largo del tiempo, existen algunos factores que aceleran o retrasan esta falla, pueden ser: la humedad, la temperatura del LED y la ambiente, el voltaje, la corriente, el material con el que está hecho, entre otros [5-6].

La confiabilidad es importante porque es la probabilidad de que un objeto, equipo o sistema tenga un funcionamiento sin falla por un tiempo determinado, bajo condiciones de operación definidas. Por lo tanto, mediante este análisis se puede determinar la vida útil del dispositivo LED y en un futuro hacer mejoras al diseño [7].

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DEL LED

El dispositivo LED se descubrió en 1907, aunque su primer ejemplar fue desarrollado en 1962. Se consideran una tecnología antigua, sin embargo, tuvieron un cambio dramático en la década de 1990 esto se debió a diferentes factores tales como [8-9]:

- Nuevos materiales semiconductores que se desarrollaron en la búsqueda de láseres rojos, verdes, azules, InGap/GaAs, GaN.
- Mejoras en el aspecto físico como el empaquetado, el diseño del disipador de calor y diseños más estilizados de reflectores.
- Además, nuevos avances en la unión de las obleas y los sustratos transparentes para una mejor extracción de la luz.

1.4 FUNCIONAMIENTO DEL LED

El material semiconductor se encuentra en capas en forma de unión PN. Cuando se aplica un voltaje adecuado a sus terminales de salida, los electrones se

recombinan con los huecos dentro del dispositivo, liberando esa energía producida en forma de fotones por esta razón se le conoce como “diodo emisor de luz”.

Todos los diodos son capaces de emitir radiación electromagnética. Los materiales semiconductores utilizados en los LED se seleccionan para emitir luz en el rango visible del espectro electromagnético Figura 3. Los diferentes materiales producen luz con diferentes longitudes de onda y, por lo tanto, diferentes colores [10].

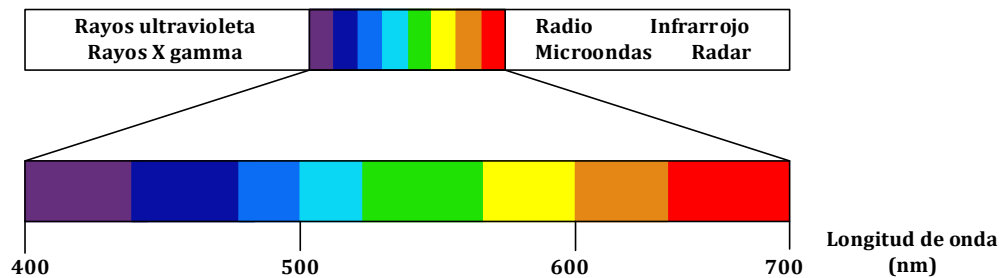


Figura 3. Espectro electromagnético visible al ojo humano.

1.5 TEMPERATURA DE UNIÓN T_j

La temperatura de referencia del LED es la T_j (temperatura de unión). Si el diseño del sistema cumple las especificaciones térmicas del fabricante del LED es posible conseguir 50.000 horas de vida útil.

T_j depende de la eficacia lumínica del LED, se ve afectada por la temperatura de la placa del circuito electrónico, por la temperatura del disipador y por la temperatura ambiente. El rango de temperaturas T_j para un trabajo eficiente del LED se sitúa entre 0 y 70°C, esto depende de los datos del fabricante [11].

1.6 EFICACIA Y EFICIENCIA DEL LED

Los LED son altamente eficientes cuando se hace referencia a los lúmenes emitidos por Watt de electricidad que es consumida, esto en comparación a otros tipos de fuentes de luz mencionados en la tabla 1. En la actualidad, las lámparas LED con más eficacia pueden operar aproximadamente a 150 L/W. Los siguientes aspectos son importantes para el incremento de la eficiencia de los LEDs [12]:

- Mejora de materiales con mejor ancho de banda.
- Mejor técnica de fabricación para reducir costos y aumentar la eficiencia.
- Mejor diseño para la disipación de calor.
- Mejor extracción de luz de los materiales de los diodos.
- Mejora en el fósforo usado para la transformación de la luz visible.

Tabla 1. Diferentes tipos de fuentes de luz en relación a la eficacia y la vida útil.

Fuente de Luz	Eficacia lumínica (lm/W)	Vida útil (Horas)
Bombilla incandescente	15- 25	1,000
Lámpara de halógeno	20-30	4,000
Fluorescente compacto	60-65	15,000
Fluorescente	55-65	20,000
Mercurio	45-60	12,000
Sodio de alta presión	80-105	16,000
LED	85-105	50,000

1.7 TIPOS DE LÁMPARAS LED

Existen diversas formas de empaquetar las lámparas con tecnología LED, las cuales se enlistan a continuación [13-14]:

- Bombillas LED: distribuyen la luz en todas direcciones.
- LED spot PAR: distribuyen la luz mediante un flujo preciso hacia un punto.
- Velas LED: distribuyen la luz en un resplandor o brillo suave.
- Tubos LED: distribuyen la luz de manera suave.
- Cápsulas LED: emiten una luz brillante intensa en todas las direcciones.
- LED spot: distribuye la luz en un punto preciso.

1.8 LEDS BLANCOS

La creación de luz blanca puede ser de tres formas [4]:

- LED azul o LED fósforo convertido, los fósforos se usan para convertir la luz azul o casi ultravioleta del LED en luz blanca.
- LEDs Multicolor, mezclando la cantidad adecuada de luz roja, verde y azul, los LEDs producen luz blanca.
- LEDs de color o LED de método híbrido, un enfoque híbrido usa los dos tipos: de fósforo convertido y LED monocromáticos discretos.

1.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISPOSITIVO LED

Desventajas

- Mayor costo inicial. Actualmente, las lámparas LED tienen un alto precio, en los mercados de iluminación para el hogar. No obstante, la demanda de estos dispositivos en hogares y oficinas está reduciendo los precios rápidamente.
- Gestión térmica. Los LED requieren una gestión térmica y evacuación del calor muy eficientes, sin los cuales la temperatura de unión del LED aumentará, llevándolo a una falla prematura.
- Mantenimiento de color. Los LED pueden cambiar de color debido a la edad y la temperatura.

- Peso en comparación con lámparas fluorescentes compactas y lámparas incandescentes. La mayoría de las lámparas LED incorporan un disipador de calor de metal integrado.

Ventajas

- La alta eficiencia de los LED genera importantes ahorros de energía.
- Menor costo del ciclo de vida, cuando se considera el costo total de propiedad (incluidos los costos de energía y mantenimiento).
- Más fiables, los LED fallan con menor frecuencia, duran más y emiten una luz de espectro completo, más sólida, sin parpadeos.
- Los LED son ideales para su uso en aplicaciones sujetas a frecuentes ciclos de encendido y apagado, a diferencia de las lámparas fluorescentes, que se funden más rápidamente cuando conmutan.
- Los LED se pueden atenuar fácilmente.
- Como una mayor parte de la energía consumida se convierte en luz visible, menos se convierte en pérdidas de calor.
- Funcionamiento silencioso, las lámparas LED consiguen una iluminación prácticamente sin ruido.
- Amplia gama de temperaturas de color, los LED están disponibles en varias temperaturas de color y, en algunos modelos, incluso se pueden controlar los colores.
- Excelente reproducción del color, los LED no eliminan los colores como otras fuentes de luz.
- Los LED no contienen mercurio, a diferencia de las lámparas fluorescentes compactas.

Una de las principales ventajas de las lámparas LEDs es su vida útil (alrededor de 50.000 horas), superior a la que poseen otras fuentes de luz, ya sean halógenas, de mercurio o fluorescentes.

El término vida útil hace referencia a la cantidad de tiempo que funciona la lámpara LED sin perder su mantenimiento lumínico, es decir sin disminuir su capacidad de iluminación, lo que en realidad es la vida media.

Para indicar este dato se utiliza la nomenclatura L70B10, la más común en tecnología LED, donde “L70” es el porcentaje de flujo luminoso que tiene el LED y “B10” las horas transcurridas de vida. Estas cifras indican el flujo luminoso durante la vida útil del LED (50.000 horas), L70B50 quiere decir que el 50% de las lámparas van a mantener, al menos un 70% de flujo luminoso a las 50.000 horas, pasadas las 50.000 horas, seguirán teniendo vida, es decir, seguirán alumbrando.

Capítulo II - ESTADO DEL ARTE

2.1 LED DE POTENCIA

Los LED son dispositivos de estado sólido que emiten energía luminosa al aplicar directamente energía eléctrica, los cuales, dependiendo de la aplicación pueden ser de baja o alta potencia.

Los LEDs de alta potencia son diseños más completos que incluyen diversas alternativas de ópticas de control del flujo luminoso y se fabrican en potencias mayores a 1 W; este tipo de LEDs se utilizan principalmente en aplicaciones arquitectónicas de iluminación en exteriores e interiores, permitiendo tener más posibilidades de diseño y efectos de color, en la Figura 4 se muestra un dibujo del LED de potencia con sus partes [15].

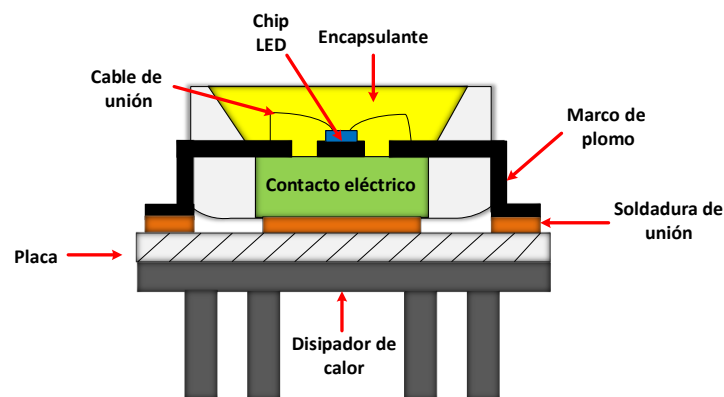


Figura 4. Partes del LED de potencia.

Las características principales de los LEDs son:

- Vida promedio de 50,000 horas.
- Excelente flujo luminoso.
- Alta eficiencia.
- Control preciso y direccional del flujo luminoso.
- Mínimas emisiones de radiaciones infrarrojas y ultravioletas.

2.2 VIDA ÚTIL

A diferencia de las otras fuentes de luz como las lámparas convencionales, en los drivers o convertidores diseñados, el dispositivo LED no falla de manera abrupta o catastrófica.

Lo que sucede es que su potencia lumínica se deteriora con el paso del tiempo de manera gradual, por lo tanto, el tiempo de vida de este dispositivo tiene su base en el factor de mantenimiento de la luz de la lámpara (LLMF), que es la cantidad de luz de la fuente en el instante específico [16].

A la vida útil se conoce como L_{xx} , donde “xx” es el porcentaje de luz restante de un cierto número de horas de uso, como ejemplo es que si se ve la siguiente

expresión “L70 a 60,000” horas significa que, habiendo pasado las 60,000 horas en uso, el LED solo emitirá el 70% de la luminosidad que es capaz de emitir.

Con el desarrollo de los LEDs, se han ido estableciendo diferentes estándares y pruebas para definir su vida útil que más adelante se mencionarán.

Dentro de la vida útil del LED existen el valor L y B, el primero indica el porcentaje de lúmenes iniciales que son emitidos por un LED en un tiempo específico, la salida de luz de los chips LED decrece diferente en comparación a otras fuentes de luz.

El valor B define el porcentaje de los chips LED que emitirán luz debajo del umbral del valor L. Se puede resumir como se afecta la vida útil del LED en el esquema de la Figura 5 [17].

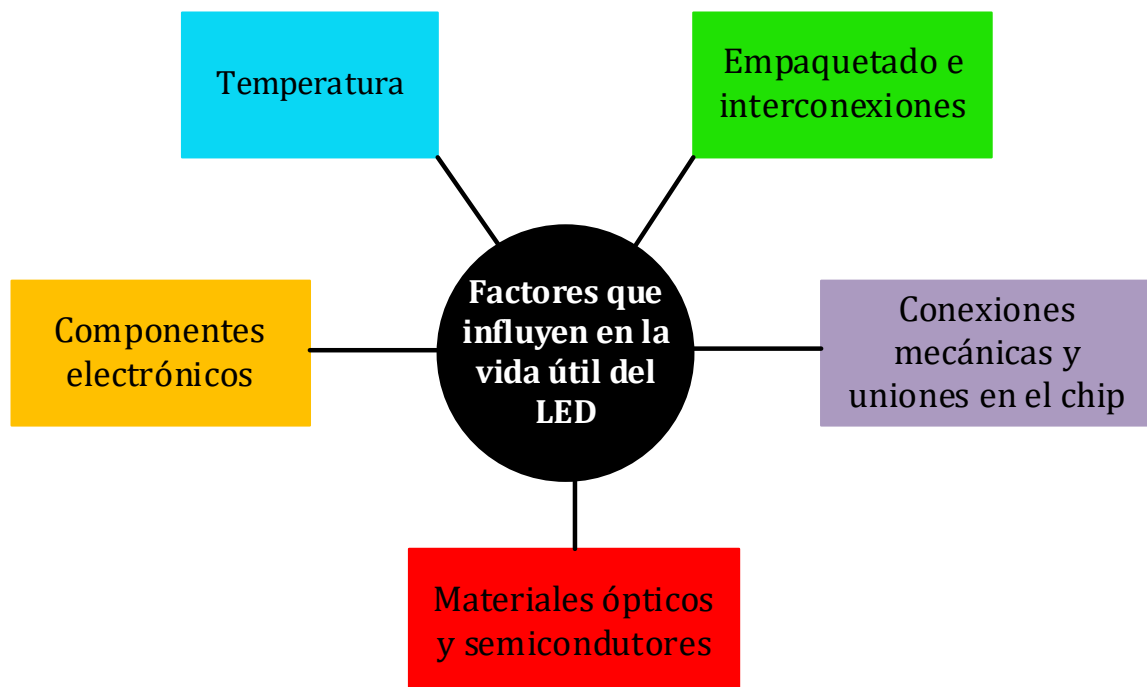


Figura 5. Factores que influyen en la vida útil de un LED.

2.3 FORMAS DE ALIMENTACIÓN DEL LED

Un LED se activa con corriente continua, pero cuando se conecta a una instalación eléctrica la cual suministra corriente alterna, necesita de un controlador que convierta la corriente alterna a corriente continua y también reduzca el voltaje, se pueden alimentar usando desde fuentes de corriente hasta controladores comerciales. Además, también puede ser alimentado con diferentes formas de onda como se muestra en la Figura 6 [18-19].

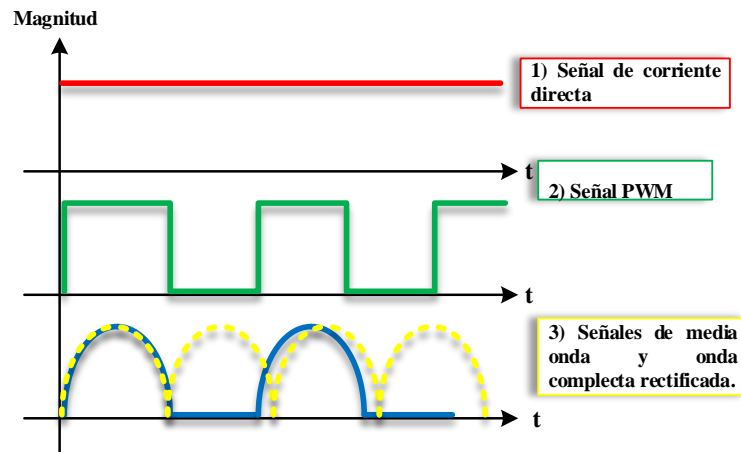


Figura 6. Tipos de formas de onda para alimentar LEDs de potencia.

2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DEL LED

El dispositivo LED tiene dos zonas de polarización y se representan gráficamente en la Figura 7. La polarización directa ocurre cuando el voltaje del diodo y la corriente del diodo son positivas, en caso contrario cuando ambos son negativos a la corriente que es de magnitud pequeña se nombra polarización inversa. Por otro lado, cuando se aplica un voltaje elevado estando en polarización inversa el LED llega a la zona de ruptura y esto permite un flujo grande corriente [20-21].

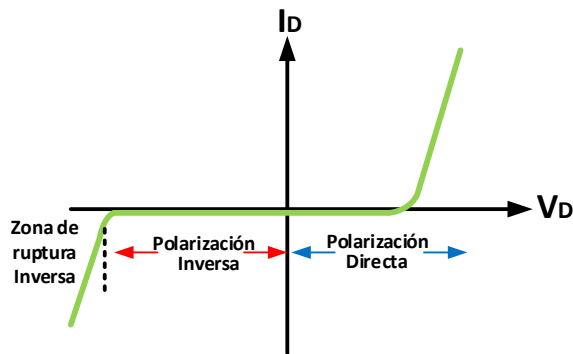


Figura 7. Curva característica V-I del LED.

2.5 TIPOS DE FALLAS EN LEDS

En los LEDs existen distintos modos de fallo dependiendo la parte del componente que lo constituye como lo es en la tarjeta chip, la soldadura y el empaquetado, en la Tabla 2 se muestran los modos, mecanismos de fallas, así como los indicadores de rendimiento que establecen parámetros medibles que permiten reconocer cuando el dispositivo tiene defecto [22].

Tabla 2. Sitios de fallas en los LEDs.

Sitios de falla	Modos de fallo	Mecanismos de falla	Indicadores de rendimiento
Tarjeta Chip	Degradación de lumen.	Generación y movimiento de defectos y dislocaciones; chip agrietado; difusión dopante.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento lumínico (flujo luminoso). Potencia de salida de luz (distribución de potencia espectral). Geometrías, materiales, condiciones ambientales y operacionales.
	Aumento de la corriente de fuga inversa.	Generación y movimiento de defectos y dislocaciones.	<ul style="list-style-type: none"> Corriente de fuga inversa.
	Aumento de la resistencia en serie parásita.	Generación y movimiento de defectos y dislocaciones; difusión dopante.	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia parásita en serie.
	Aumento de la corriente directa.	Difusión dopante.	<ul style="list-style-type: none"> Corriente directa. Voltaje directo.
	Sin luz / cortocircuito.	Electro migración.	<ul style="list-style-type: none"> Geometrías, materiales, condiciones ambientales y operacionales.
Soldadura	Sin luz /circuito abierto.	Fractura de cable de enlace inducida por sobre tensión eléctrica, fatiga de unión en el cable de la soldadura; descarga electrostática.	<ul style="list-style-type: none"> Geometrías, materiales, condiciones ambientales y operacionales.
	Degradación de lumen.	Contacto eléctrico de interdifusión metalúrgica.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento lumínico (flujo luminoso). Potencia de salida de luz (distribución de potencia espectral).
	Aumento de la resistencia en serie parásita.	Contacto eléctrico de interdifusión metalúrgica.	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia parásita en serie.
	Cortocircuito.	Contacto eléctrico de interdifusión metalúrgica.	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia parásita en serie.
	Degradación de lumen.	Carbonización encapsulante; delaminación encapsulante; amarillamiento encapsulante; rotura de lentes; enfriamiento térmico con fósforo; fatiga de la unión de soldadura.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento lumínico (flujo luminoso). Potencia de salida de luz (distribución de potencia espectral). Geometrías, materiales, condiciones ambientales y operacionales.

Empaquetado	Cambio de color/decoloración del encapsulado.	Amarillamiento encapsulante.	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de reproducción cromática. • Distribución espectral del flujo radiante.
	Ampliación del espectro (cambio de color).	Enfriamiento térmico de fósforo.	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de reproducción cromática. • Distribución espectral del flujo radiante.
	Aumento de voltaje directo.	Fatiga de unión de soldadura.	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente directa/ Voltaje directo. • Geometrías, materiales, condiciones ambientales y operacionales.

Además, analizar las propiedades térmicas de los diodos emisores de luz de alta potencia, es esencial para el diseño óptimo de dispositivos LEDs. La resistencia térmica, la capacitancia térmica y la constante de tiempo térmica son dichas propiedades, que tienen un rol muy importante en el área de confiabilidad y rendimiento fotométrico dinámico del LED.

2.6 TIPOS DE DESGASTE EN EL LED

En el desgaste o el fin de la vida útil del dispositivo semiconductor LED existen factores como:

- La cantidad luz.
- El desgaste unión PN.
- El desgaste del cable de unión.

La cantidad de luz está relacionada a medir la degradación del LED, una normativa denominada TM21 propuesta por la IESNA la sociedad de ingenieros en iluminación de Norteamérica proporciona el tiempo de vida estimado del diodo LED partiendo de los datos obtenidos mediante la curva estándar LM-80 de degradación, es decir, el cambio en la cantidad de luz emitida por una fuente lumínica a lo largo de su vida operativa en relación a la cantidad de luz medida inicialmente.

Esta curva estándar es proporcionada por el fabricante y basada en la normativa IES LM-80-2008, publicada por la Asociación de Ingeniería de Iluminación (IES) de EEUU para caracterizar la degradación de un LED. Las fuentes de luz tradicionales se degradan de manera gradual hasta que se destruyen.

Los LEDs no fallan de manera catastrófica, sino que pierden luz gradualmente durante periodos muy largos; cuanto más baja sea la corriente y las temperaturas de funcionamiento, más largas serán las curvas de degradación [23].

Para Medir el desgaste o el fin de la vida útil con respecto a la degradación del LED, se mide cuando el LED deja de producir 20% menos de sus lúmenes, de acuerdo a la norma LM80-08 que se refiere a un método para medir la depreciación lumínica de fuentes de iluminación de estado sólido, como paquetes de LED,

módulos y matrices. Es una metodología estándar que permite evaluar y comparar el mantenimiento del lumen de los componentes LED de diferentes compañías. Esta describe cómo medir la confiabilidad de una parte de una luminaria LED (la fuente de luz LED) durante un período de tiempo y bajo ciertas condiciones establecidas [24].

El desgaste de la unión PN está relacionada a medir V-I, la polarización directa en el LED sucede cuando el voltaje V_D y la corriente I_D son positivas. En caso de valores negativos de V_D , la corriente I_D es pequeña, llamada polarización inversa. Si se aplica una tensión elevada (en polarización inversa) el LED entra en una zona de ruptura permitiendo un flujo de corriente grande [19-20].

Para medir el desgaste o el fin de la vida útil con respecto a la unión PN del LED existen diferentes modelos para representar un LED, los cuales permiten entender su comportamiento. El LED al ser utilizado como una carga presenta un comportamiento dinámico, es decir, tiene distintos puntos de operación. La resistencia interna del LED es dinámica, cambia desde el punto de operación más bajo hasta su punto máximo de operación [26].

- Modelo resistivo del LED: En el modelo resistivo el LED presenta un comportamiento lineal muy parecido al de una resistencia, por lo que se representa de esta forma.
- Modelo lineal del LED: El modelo lineal equivalente del LED se simboliza como una fuente de voltaje, la cual es el voltaje de umbral del LED y una resistencia en serie, que representa la resistencia dinámica del LED.

El desgaste en el cable de unión puede ocurrir por los siguientes factores:

- La sobrecarga eléctrica generalmente causa la fractura del cable de unión.
- La duración muy larga del pulso de los transitorios eléctricos y la alta corriente directa.
- La fatiga de la unión de cable por tensión.
- Los ciclos térmicos repetitivos de alta magnitud.
- Propagación de grietas por fatiga durante el ciclo térmico [27].

El desgaste del cable de unión está relacionada a medir la temperatura de unión, esta unión de cables es el método más común para conectar las almohadillas de un chip a los de los paquetes de LED.

Cuando los paquetes de LED están expuestos a altas corrientes o corrientes transitorias de pico alto, el cable de unión puede comportarse como un fusible. La sobrecarga eléctrica generalmente causa la fractura del cable de unión, donde el alambre se rompe por encima, además el aumento exagerado de la temperatura puede provocar una fatiga en el cable de unión y deformarse geométricamente [26].

Para medir el desgaste o el fin de la vida útil con respecto al cable de unión el método más exacto es medir la temperatura en ese punto de unión con sobrecalentamiento de 293°C es con una cámara térmica rápida y de alta sensibilidad. Otro método es sacar la resistencia térmica total del LED donde se debe medir la temperatura entre dos puntos que se mide la resistencia y la potencia de salida del LED. Los dos puntos de unión posibles para la medición se describen a continuación [25].

Donde

R_{J-PT} Resistencia de evacuación de calor de la unión a la almohadilla.

R_{PT-PCB} Resistencia a la transferencia de calor de la almohadilla a la placa.

R_{PCB} Resistencia a la transferencia de calor a la placa.

$R_{PCB-DISIP}$ Resistencia a la transferencia de calor de la placa al disipador.

R_{DISIP} Resistencia a la transferencia de calor del disipador.

$R_{DISIP-AIRE}$ Resistencia a la transferencia de calor del disipador al ambiente.

Para medir el desgaste o el fin de la vida útil con respecto al cable de unión.

Entonces, la ecuación (2.1) que modela el circuito térmico en la que se puede calcular la temperatura de unión en función de la temperatura ambiente y de la potencia a la que trabaja el LED:

$$T_J = T_A + (R_{JA} \times P_{LED}) \quad (2.1)$$

En esta ecuación (2.2) la resistencia térmica total del LED es la suma de todas las resistencias descritas, la cual permite obtener la temperatura promedio en la unión del cable:

$$R_{JA} = R_{J-PT} + R_{PT-PCB} + R_{PCB} + R_{PCB-DISIP} + R_{DISIP} + R_{DISIP-AIRE} \quad (2.2)$$

2.7 RESISTENCIA TÉRMICA R_J

El primer tipo de métricas térmicas se basa en una definición denotada como R_{thJX} que es la manera de expresar la resistencia térmica. Suponiendo que todo el calor generado por la potencia de calentamiento P_H en el punto de conducción J (generalmente denominado unión) fluye a través una superficie isotérmica en la disposición de medición llamada X ; se define como (2.3):

$$R_{thJX} = \frac{T_J - T_X}{P_H} \quad (2.3)$$

Se aplica una potencia de calentamiento de P_H y luego se mide la T_J absoluto y los valores de T_X por separado [29].

La ventaja de esta medición es que se puede realizar por medios muy simples, como un multímetro de precisión. Por otro lado, este enfoque conlleva muchos problemas de medición y calibración.

Se puede deshacer la mayoría de los errores de medición utilizando una técnica diferencial para medir cantidades, que son por naturaleza diferencias, por ejemplo, en las mediciones de unión a ambiente, se puede aplicar dos niveles de la potencia de calentamiento P_{H1} y P_{H2} , y medir la temperatura después en cada caso. Se obtiene:

$$T_{J1} = P_{H1} \cdot R_{thJA} + T_A \quad (2.4)$$

$$T_{J2} = P_{H2} \cdot R_{thJA} + T_A \quad (2.5)$$

$$(P_{H1} - P_{H2}) \cdot R_{thJA} = T_{J1} - T_{J2} \quad (2.6)$$

$$R_{thJA} = \frac{(T_{J1} - T_{J2})}{(P_{H1} - P_{H2})} \quad (2.7)$$

El elemento sensible a la temperatura es en la mayoría de los casos una unión PN (o una resistencia), necesitando algún sesgo (generalmente una corriente constante) para producir una temperatura dependiente del voltaje.

La sensibilidad a la temperatura de estas estructuras suele ser lineal en un intervalo de temperatura grande, por lo tanto, si el valor de referencia V_{F0} del voltaje directo se conoce para el valor de referencia T_{J0} de la temperatura de unión, el voltaje directo a cualquier temperatura de unión se puede expresar con una relación (2.8):

$$V_F(T_J) = V_{F0} + S_{VF} \cdot (T_J - T_{J0}) \quad (2.8)$$

Donde la sensibilidad S_{VF} depende ligeramente de la corriente de polarización de I_M , también R_{thJA} , se obtiene (2.4):

$$R_{thJA} = \frac{V_F(T_{J1}) - V_F(T_{J2})}{S_{VF} \cdot (P_{H1} - P_{H2})} = \frac{\Delta V_F}{S_{VF} \cdot \Delta P_H} \quad (2.9)$$

El principio diferencial ofrece muchas ventajas. No hay necesidad de directamente medir T_A , solo T_J . Incluso al realizar la calibración para obtener la sensibilidad S_{VF} para (2.9), solo se necesita una medición diferencial. Todos los problemas de compensación en la medición y la calibración se cancelan.

En la literatura, a menudo se utiliza el factor de sensibilidad recíproca $K = 1/S_{VF}$. Por lo tanto, el proceso de calibración para encontrar el valor de S_{VF} también se denomina calibración de factor K . Con el factor K , (2.9) se lee como:

$$R_{thJA} = K \cdot \frac{\Delta V_F}{\Delta P_H} \quad (2.10)$$

Algunas consideraciones para la medición son que se necesita la función (es decir, usar el voltaje de la estructura sensible a la temperatura) entre el equilibrio en P_{H1} y P_{H2} . Uno de los niveles de potencia, P_{H2} por ejemplo, debe mantenerse bajo para evitar el autocalentamiento del dispositivo. Utilizando la técnica diferencial, este efecto es de menor importancia; incluso el efecto en la calibración del factor K puede despreciarse [29].

2.8 CONFIABILIDAD

Un objeto, un equipo o un sistema, es confiable, preciso o reproducible, cuando las mediciones realizadas generan los mismos resultados en diferentes momentos, escenarios y poblaciones si se aplica en las mismas condiciones Figura 8. La precisión en las mediciones está influenciada por el que mide (observador), por aquello con lo que se mide (instrumento de medición); y por lo que es medido, o lo que es observado, ya sea sujeto o variable/s en estudio [30].

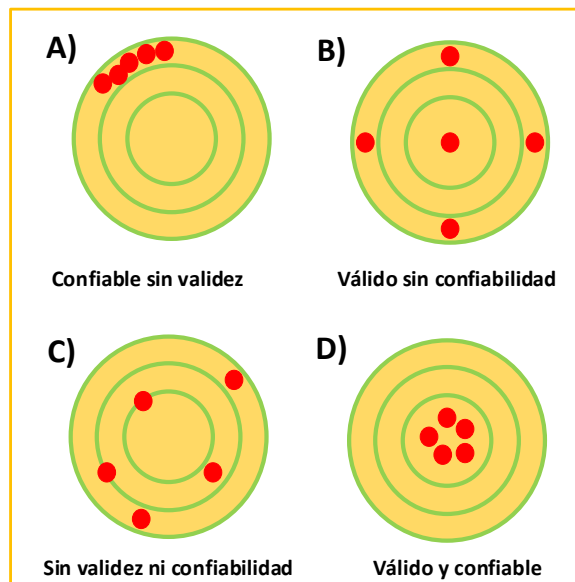


Figura 8. Posibles escenarios de validez y confiabilidad. A) Todas las mediciones son parecidas, pero se alejan de la realidad. B) Las mediciones captan todo el espectro del fenómeno, pero son muy diferentes entre ellas. C) No se capta todo el fenómeno y las mediciones son muy disímiles entre ellas. D) Todas las mediciones son parecidas y se ajustan a la realidad de lo que se está midiendo.

La teoría de confiabilidad que se aplica para describir una parte individual de un conjunto depende de la expectativa de operación en relación al tiempo [21-22]. Para el caso de la vida útil de los LEDs de potencia:

La expectativa de operación es en función continua y del tiempo. El estudio de fallas en el dominio del tiempo es el campo de la confiabilidad y se puede distinguir entre fallas catastróficas y fallas por degradación [20].

- **Falla catastrófica:** Esta falla ocurre cuando el objeto de estudio sufre una pérdida total de la funcionalidad del dispositivo de forma repentina.

- **Falla por degradación:** Este tipo de falla ocurre en algún objeto de estudio en los que va perdiendo sus características de manera gradual a lo largo del tiempo.

La curva de Davies, también conocida como curva de la bañera es una gráfica que muestra la probabilidad de falla de un artefacto en función del tiempo o vida útil, su nombre se debe a que tiene la forma de una tina de baño cortada longitudinalmente. Esta gráfica tiene 3 fases claramente identificables Figura 9 [20].

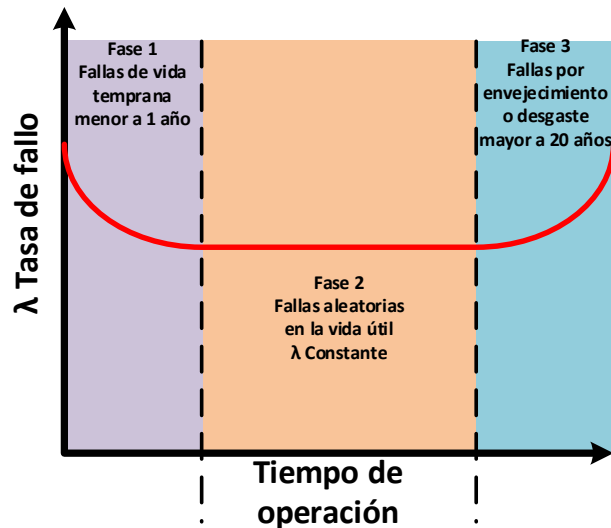


Figura 9. Curva de Davies o de la bañera.

Fase 1: Representa la probabilidad de falla en los primeros ciclos de operación del artefacto, cuyo valor es exponencial decreciente y refleja los fallos asociados a fallas tempranas, estas fallas son asociadas a problemas de diseño, mala instalación, operación inadecuada por parte del personal por desconocimiento del equipo o del procedimiento de operación.

Fase 2: Fase de la curva en la cual la probabilidad de falla se mantiene casi constante y en donde sus fallas son principalmente aleatorias y causadas por factores externos (no hay desgaste en los componentes), también pueden ser producidas por mala operación del equipo o condiciones extremas de operación.

Fase 3: Esta etapa está caracterizada por una probabilidad de falla creciente con el tiempo y obedece al desgaste natural de las partes del artefacto [31].

2.9 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE CONFIABILIDAD

Cada fase de la curva de Davies puede ser modelada con una diferente función de confiabilidad. Las dos principales distribuciones matemáticas de confiabilidad son: la distribución exponencial y la distribución de Weibull; la primera se usa para modelar una tasa de fallo constante y la segunda se usa para modelar un cambio en el tiempo de la tasa de fallos [32].

Distribución Exponencial: Esta distribución es útil en aplicaciones con componentes electrónicos y eléctricos, en los cuales la probabilidad de ocurrencia de falla es alta durante su instalación y relativamente constante a medida que aumenta su vida útil [32].

Distribución de Weibull: Esta distribución puede emplearse en cualquier tipo de componente (electrónico, mecánico etc.) debido a que para el cálculo emplea variables que permiten modelar diferentes condiciones de funcionamiento según se requiera [32].

La función de no confiabilidad determina las probabilidades de fallo en un tiempo t para un artefacto determinado; se define como el área bajo la curva de la función de probabilidad de falla desde el tiempo t_0 hasta el tiempo t , cuya expresión matemática es la siguiente [20]:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2.11)$$

La función de fiabilidad, es la probabilidad de que funcione el objeto de la manera prevista en unas condiciones dadas durante un periodo de tiempo establecido, dicha probabilidad se puede calcular de la siguiente manera:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.12)$$

También puede expresarse en función del número de eventos de falla sobre el total de eventos como:

$$R_a = 1 - \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n = \text{número de eventos de falla}}{N = \text{total de eventos posibles}} \right) \quad (2.13)$$

2.10 NORMAS INTERNACIONALES EN ILUMINACIÓN LED

- IES LM-79-08 es una norma norteamericana creada en el 2008. En ella se indica el procedimiento para medir las características fotométricas, espectrales (Color) y eléctricas para la tecnología LED.
- IES LM-80-08 se refiere a un método para medir la depreciación lumínica de fuentes de iluminación de estado sólido, como paquetes de LED, módulos y matrices.
- IES LM-82-12 Es un método aprobado de desempeño. Determina las características eléctricas y fotométricas en función de parámetros térmicos, es aplicada a lámparas con LEDs, módulos con LEDs con o sin controlador integrado y excluye luminarias con controlador incluido.
- IES LM-84-14 Es un método aprobado de desempeño. Determina las características fotométricas y el mantenimiento de flujo luminoso y de color, es aplicada a luminarias con LEDs con controlador, módulos con LEDs con o sin controlador integrado y lámparas con LEDs con controlador integrado.
- IES LM-85-14 Es un método aprobado de desempeño. Determina las características fotométricas y eléctricas, es aplicada a dispositivos LED,

módulos con LEDs con o sin controlador integrado y excluye luminarias LEDs con controlador integrado.

- IES LM-86-15 Es un método aprobado de desempeño. Determina las características fotométricas y radiométricas, es aplicada a módulos LEDs con controlador integrado con deposición de fósforo en forma remota.
- TM-21-11 Una vez concluida la prueba LM-80-08, se aplica el método recomendado por el IESNA para extrapolar la degradación del flujo luminoso de un módulo o luminaria de LEDs, basado en los datos recogidos de acuerdo con LM-80. La norma TM-21 es el método aprobado para tomar datos LM-80 y realizar proyecciones útiles de vida útil de LED.
- IES TM-28-14 La norma TM-28 es un método aprobado para tomar datos y realizar proyecciones útiles de vida útil de LED a largo tiempo del flujo luminoso. Los estándares se aplican a la proyección de por vida del paquete, matriz o módulo LED.
- IES TM-30-15 En 2015 IES presentó la TM-30, como método de evaluación de la reproducción del color de fuentes de luz. Puede utilizarse para sustituir o complementar el índice de reproducción cromática (CRI), desarrollado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) [33].

2.11 MÉTODOS DE PREDICCIÓN

Los métodos basados en la física suponen que hay disponible un modelo físico que describe el comportamiento de degradación o daño y combina el modelo físico con datos medidos (carga del ciclo de vida y condiciones de operación).

Los métodos basados en datos son probabilísticos que entregan el análisis en modelos gráficos y pueden ser la regresión estadística, red bayesiana estática, filtrado de Kalman, filtrado de partículas y red neuronal artificial.

Los métodos de fusión/híbridos combinan los métodos mencionados anteriormente para mejorar el rendimiento de la predicción [34-35].

2.12 CICLO TÉRMICO Y MODELO TÉRMICO DEL LED

Ciclo térmico se denomina a cualquier serie de procesos termodinámicos en los que un sistema parte de una situación inicial y tras aplicar dichos procesos regrese al estado inicial [29].

Las tres formas básicas de transmisión de calor son:

1. Radiación
2. Convección
3. Conducción

El modelo térmico es la célula principal de los modelos Foster y Cauer, se basa en una red RC, este método permite que se tenga precisión y eficiencia para

que en el momento de implementarse en simuladores o en la vida real pueda estimar la temperatura de unión.

En la Tabla 3 se tiene la analogía de las variables térmicas con respecto las variables eléctricas [29].

Existen dos tipos principales de modelos térmicos. La Figura 10 muestra las redes RC de tipo Foster y Cauer, ambas redes pueden caracterizar la respuesta térmica, sin embargo, el modelo Foster no tiene significado físico pero el de Cauer si [36].

Tabla 3. Variables térmicas y variables eléctricas.

Magnitud	Térmico	Eléctrico
Intensidad	Transferencia de calor, P, W	Corriente, I, A
Diferencia de potencial	Temperatura, $T, degC$	Voltaje V
Resistencia	Resistencia térmica, $R_{th}, degC/W$	Resistencia eléctrica, R, Ω
Capacitancia	Capacitancia térmica, $C_{th}, degC, J/W$	Capacitancia eléctrica, C, F

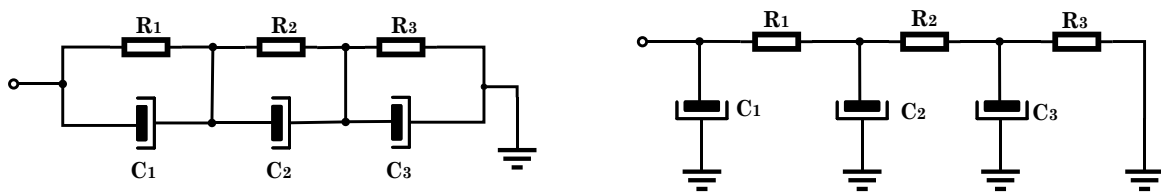


Figura 10. Modelos térmicos Foster y Cauer.

El modelo térmico, por tanto, se puede caracterizar por los medios de la red Cauer $R_{th}C_{th}$. La respuesta térmica transitoria se puede expresar mediante una suma de funciones exponenciales individuales de la siguiente manera ecuación (2.14) [37]:

$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{thi}}\right) \quad (2.14)$$

Las constantes de tiempo térmico coinciden con el producto $R_{thi}C_{thi}$ para cada sección y se expresan como ecuación (2.15):

$$\tau_{thi} = R_{thi}C_{thi} \quad (2.15)$$

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Estas constantes térmicas describen el comportamiento del modelo de circuito térmico del LED con respecto a la temperatura.

Capítulo III - PRUEBAS

3.1 PRUEBAS

En este capítulo se presentan las tres pruebas realizadas. A continuación, se describe el procedimiento y los datos obtenidos para cada una de ellas.

- 1) Prueba acumulativa de temperatura.
- 2) Pruebas impulsionales, de tiempo de establecimiento.
- 3) Prueba en frío de la resistencia.

3.2 PRUEBAS ACUMULATIVA DE TEMPERATURA

En esta prueba se obtuvo la curva V-I del LED y la temperatura de unión con un efecto acumulativo de calor en la resistencia tomando en cuenta la temperatura ambiente y la temperatura del disipador.

Las pruebas están hechas bajo un rango de temperatura ambiente que varía de los 27°C a los 29°C, se utiliza una cámara térmica con el lente focal a una distancia de 11 cm para la medición de la unión de temperatura, la humedad en las pruebas varió de 34% a 47%. Para obtener la curva de corriente contra voltaje de cada LED de potencia modelo GOLDEN DRAGON LUW W5SM se usó el siguiente material:

- 1 Fuente de poder.
- 2 Multímetros FLUKE modelo 115.
- 1 Multímetro FLUKE 87V/E2.
- 1 Cámara térmica FLUKE modelo Ti10.
- 1 Base de metal para la cámara térmica.
- LEDs GOLDEN DRAGON LUW W5SM alimentados con diferente forma de onda y con su disipador.

3.2.1 Mediciones a realizar

En las siguientes pruebas se medirá en intervalos de 5 minutos durante 2 horas y 35 minutos, el voltaje, la corriente, la temperatura del disipador, la temperatura de unión, la diferencia de temperatura, para cada LED, Figura 11 se muestra el banco de pruebas para tomar las mediciones.

Para medir el voltaje y la corriente en el LED se usaron los dos multímetros FLUKE modelo 115, para medir la temperatura del disipador se usó un multímetro FLUKE 87V/E2 se colocó en la carcasa del LED, para medir la temperatura de unión se utilizó una cámara térmica FLUKE modelo Ti10 donde se centra la unión del LED como se ilustra en la Figura 12, para cada LED se midieron estas variables.

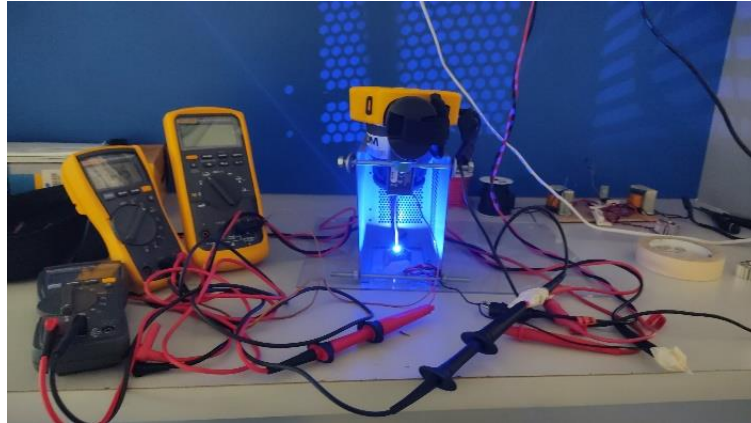


Figura 11. Banco de pruebas para obtener la curva V-I de cada LED.

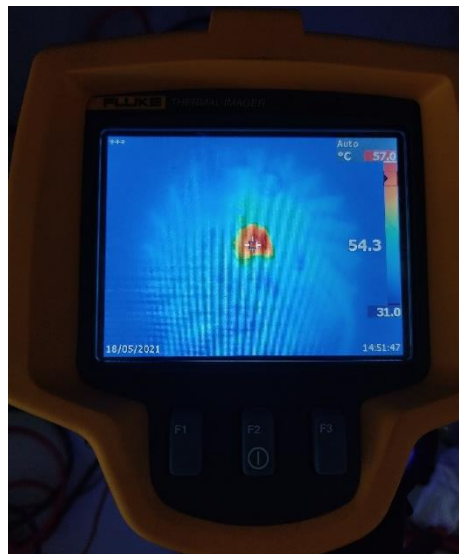


Figura 12. LED bajo prueba visto desde la cámara térmica.

3.2.2 Datos obtenidos

La primera prueba que se realizó para cada LED con su respectiva forma de alimentación fue medir voltaje, corriente y temperatura en el LED iniciando en una temperatura de 25°C a 28°C (temperatura ambiente), aumentando el voltaje y la corriente hasta obtener sus valores de voltaje, corriente, potencia, temperatura del disipador y la temperatura de unión. A continuación, se muestran las tablas de la 4 a la 9 para cada LED medido con sus respectivos valores obtenidos. A esta prueba se muestran las gráficas de voltaje y corriente del LED donde se puede observar que todos los LEDs tienen la forma de la curva característica, además se incluyen las gráficas de la temperatura de unión con respecto el tiempo y se puede ver que el efecto del calor es acumulativo y tiene una forma no tan simétrica debido a que cuando se empieza a bajar el voltaje y la corriente para llegar a su encendido inicial queda un remanente de calor.

Tabla 4. LED nuevo.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	28	29.7	1.7	5
2.399	0.001	0.002399	28.5	29.9	1.4	10
2.449	0.002	0.004898	28.9	30.3	1.4	15
2.499	0.003	0.007497	29.3	31.5	2.2	20
2.549	0.005	0.012745	29.9	32.3	2.4	25
2.596	0.01	0.02596	30.3	32.9	2.6	30
2.649	0.018	0.047682	30.6	33.8	3.2	35
2.699	0.028	0.075572	30.8	34.2	3.4	40
2.729	0.036	0.098244	31.1	34.9	3.8	45
2.799	0.062	0.173538	31.9	36.3	4.4	50
2.833	0.074	0.209642	32.3	37.1	4.8	55
2.889	0.102	0.294678	33.8	39.3	5.5	60
2.933	0.128	0.375424	34.4	40.7	6.3	65
2.995	0.169	0.506155	35.6	43.3	7.7	70
3.049	0.211	0.643339	37.2	46.4	9.2	75
3.099	0.301	0.932799	39.7	52.3	12.6	80
3.099	0.301	0.932799	41.6	54.3	12.7	85
3.049	0.211	0.643339	41.1	50.1	9	90
2.995	0.169	0.506155	39.7	47.7	8	95
2.933	0.128	0.375424	38.1	44.6	6.5	100
2.889	0.102	0.294678	37	42.5	5.5	105
2.833	0.074	0.209642	35.8	40.8	5	110
2.799	0.062	0.173538	34.9	39.5	4.6	115
2.729	0.036	0.098244	34.2	37.9	3.7	120
2.699	0.028	0.075572	33.4	36.9	3.5	125
2.649	0.018	0.047682	32.9	36	3.1	130
2.596	0.01	0.02596	32.3	35.7	3.4	135
2.549	0.005	0.012745	32.1	35.1	3	140
2.499	0.003	0.007497	31.8	34.7	2.9	145
2.449	0.002	0.004898	31.6	34.3	2.7	150
2.399	0.001	0.002399	31.5	34.1	2.6	155
2.349	0.001	0.002349	31.4	34.2	2.8	160

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED nuevo, se puede

enfatar que durante la prueba acumulativa de calor la temperatura máxima en la unión de este LED fue de 41.6°C; esta temperatura máxima es la comparativa con respecto los otros LEDs alimentados de distinta forma. En la Figura 13 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED nuevo y en la Figura 14 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente.

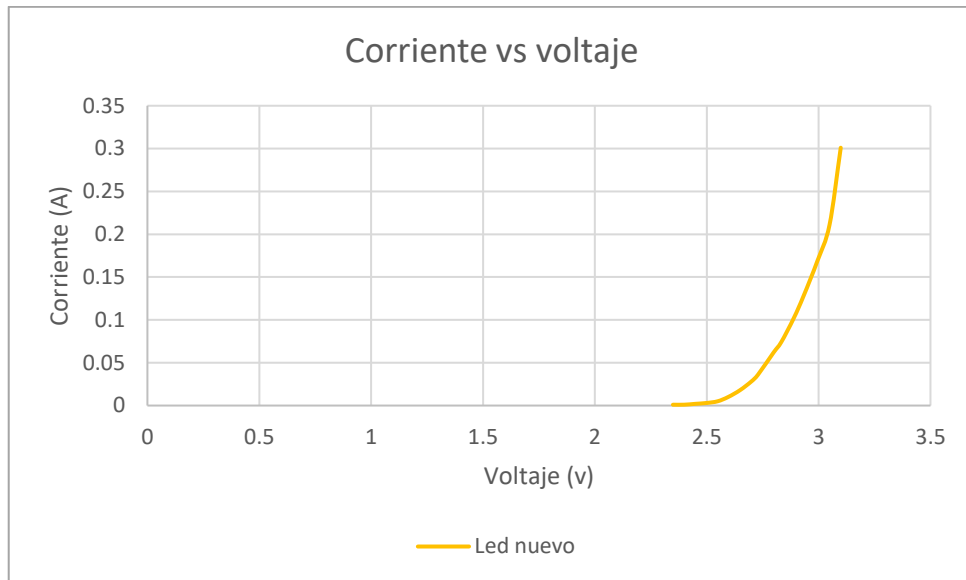


Figura 13. Gráfica de la curva V-I del LED nuevo.

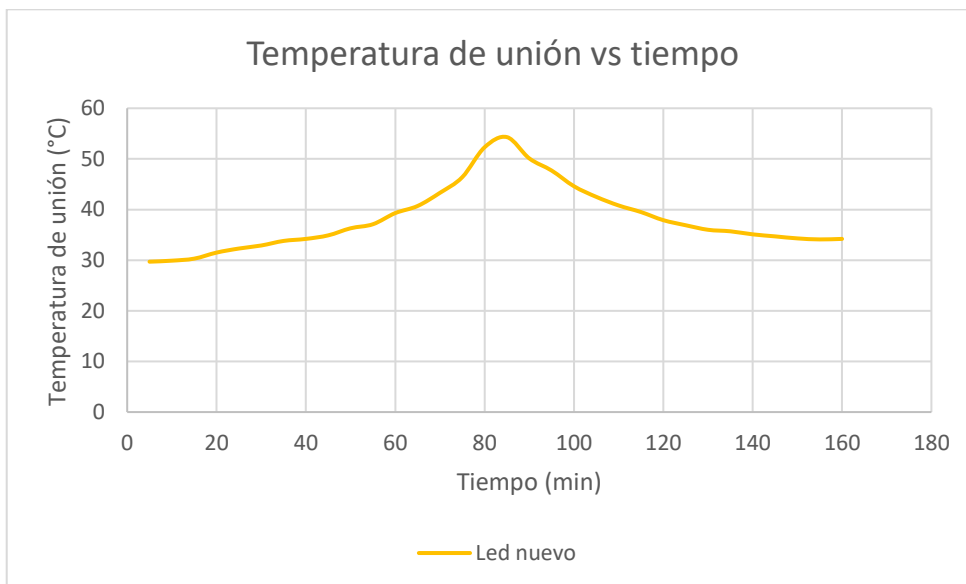


Figura 14. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED nuevo.

Tabla 5. LED alimentado con media onda.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	28	30	2	5
2.399	0.001	0.002399	28.2	30.9	2.7	10
2.449	0.002	0.004898	28.4	31.2	2.8	15
2.499	0.004	0.009996	28.7	31.4	2.7	20
2.549	0.01	0.02549	28.9	32	3.1	25
2.596	0.019	0.049324	29.1	32.9	3.8	30
2.649	0.03	0.07947	29.5	34.2	4.7	35
2.691	0.048	0.129168	30	36.3	6.3	40
2.729	0.065	0.177385	30.6	37.3	6.7	45
2.791	0.101	0.281891	31.4	40.7	9.3	50
2.833	0.129	0.365457	32.4	43.3	10.9	55
2.889	0.166	0.479574	33.5	47.6	14.1	60
2.933	0.204	0.598332	34.7	49.3	14.6	65
2.98	0.251	0.74798	36.4	54.6	18.2	70
3.049	0.31	0.94519	37.8	59.1	21.3	75
3.099	0.349	1.081551	39.5	64	24.5	80
3.099	0.349	1.081551	40.6	65.2	24.6	85
3.049	0.31	0.94519	40.6	62.9	22.3	90
2.98	0.251	0.74798	39.8	58.2	18.4	95
2.933	0.204	0.598332	38.6	53.3	14.7	100
2.889	0.166	0.479574	37.6	50.1	12.5	105
2.833	0.129	0.365457	36.4	46.3	9.9	110
2.791	0.101	0.281891	35.4	43.8	8.4	115
2.729	0.065	0.177385	34.5	40.6	6.1	120
2.691	0.048	0.129168	33.5	39.3	5.8	125
2.649	0.03	0.07947	32	36.7	4.7	130
2.596	0.019	0.049324	32.7	35.4	2.7	135
2.549	0.01	0.02549	31.9	34.3	2.4	140
2.499	0.004	0.009996	33.9	31.1	2.8	145
2.449	0.002	0.004898	33.6	30.7	2.9	150
2.399	0.001	0.002399	33.1	30.5	2.6	155
2.349	0.001	0.002349	32.8	30.4	2.4	160

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED alimentado con media onda, se puede enfatizar que durante la prueba acumulativa de calor la

temperatura máxima en la unión de este LED fue de 65.2°C en comparación con el LED nuevo que su temperatura máxima fue de 41.6°C; en la Figura 15 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED de media onda de color azul donde se ve un desplazamiento y el LED nuevo de color amarillo que es la referencia y en la Figura 16 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente y podemos denotar que en el LED de media onda la temperatura aumenta más que en el LED nuevo.

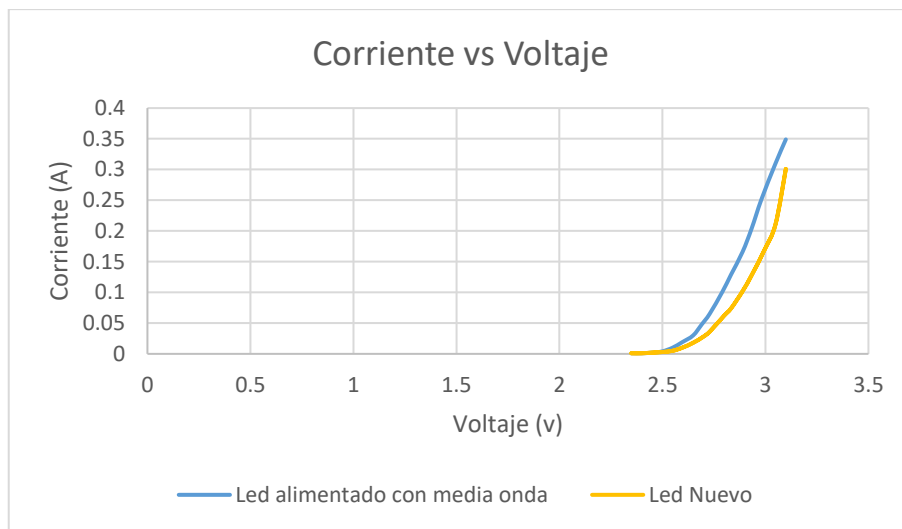


Figura 15. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con media onda vs el LED nuevo.

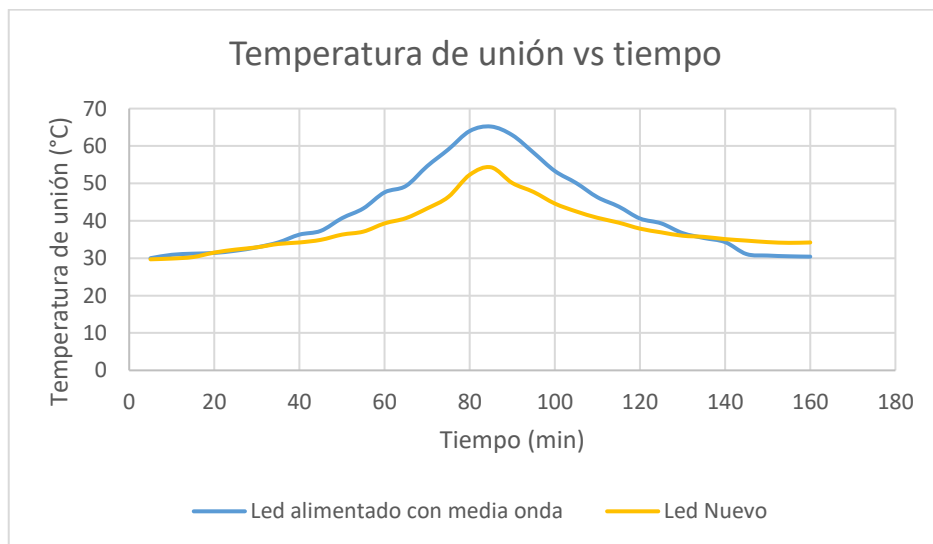


Figura 16. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con media onda vs el LED nuevo.

Tabla 6. LED alimentado con onda completa.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	28	29.1	1.1	5
2.399	0.001	0.002399	28.1	29.4	1.3	10
2.449	0.001	0.002449	28.2	29.6	1.4	15
2.499	0.002	0.004998	28.2	29.7	1.5	20
2.549	0.006	0.015294	28.3	30.5	2.2	25
2.596	0.013	0.033748	28.5	30.9	2.4	30
2.649	0.025	0.066225	28.9	32.4	3.5	35
2.699	0.04	0.10796	29.5	34.2	4.7	40
2.729	0.053	0.144637	30.1	35.9	5.8	45
2.799	0.091	0.254709	31.2	39.8	8.6	50
2.833	0.113	0.320129	32.6	42.9	10.3	55
2.889	0.156	0.450684	34.1	47.3	13.2	60
2.933	0.199	0.583667	36.2	52.5	16.3	65
2.995	0.255	0.763725	38.7	58.9	20.2	70
3.049	0.325	0.990925	41.4	67.5	26.1	75
3.099	0.349	1.081551	43.5	71.6	28.1	80
3.099	0.349	1.081551	44.5	72	27.5	85
3.049	0.325	0.990925	44.6	70.2	25.6	90
2.995	0.255	0.763725	43.7	63.3	19.6	95
2.933	0.199	0.583667	41.7	58.4	16.7	100
2.889	0.156	0.450684	40	53.7	13.7	105
2.833	0.113	0.320129	38.4	48.8	10.4	110
2.799	0.091	0.254709	36.7	45.3	8.6	115
2.729	0.053	0.144637	35.1	41.3	6.2	120
2.699	0.04	0.10796	33.8	39.2	5.4	125
2.649	0.025	0.066225	32.8	36.7	3.9	130
2.596	0.013	0.033748	31.8	34.9	3.1	135
2.549	0.006	0.015294	31.4	34.1	2.7	140
2.499	0.002	0.004998	30.8	33.3	2.5	145
2.449	0.001	0.002449	30.6	32.9	2.3	150
2.399	0.001	0.002399	30.3	32.8	2.5	155
2.349	0.001	0.002349	30.2	32.7	2.5	160

En la Tabla 6 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED alimentado con onda completa, se puede enfatizar que durante la prueba acumulativa de calor la temperatura máxima en la unión de este LED fue de 72°C en comparación con el LED nuevo que su temperatura máxima fue de 41.6°C; en la Figura 17 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED de onda completa de color verde donde se ve un desplazamiento y el LED nuevo de color amarillo que es la referencia y en la Figura 18 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente y podemos denotar que en el LED de onda completa la temperatura aumenta más que en el LED nuevo.

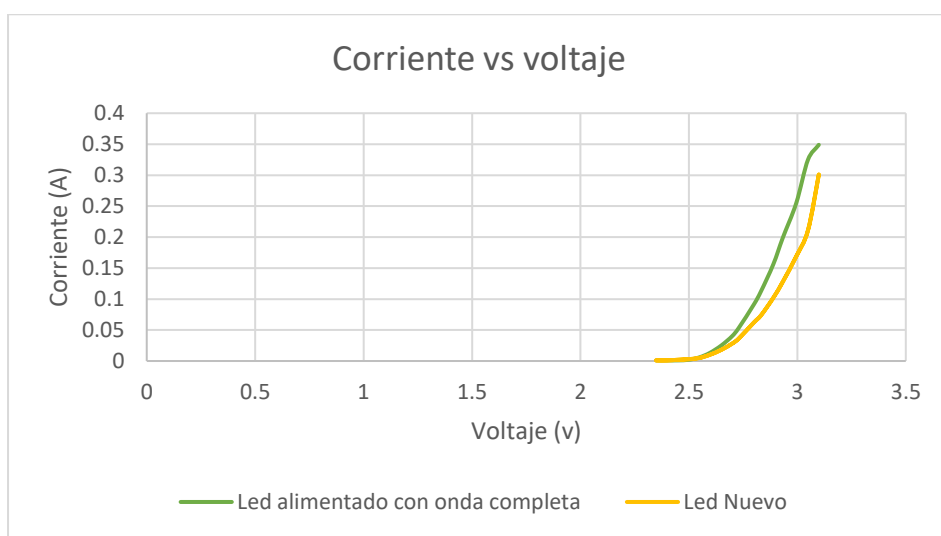


Figura 17. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con onda completa vs el LED nuevo.

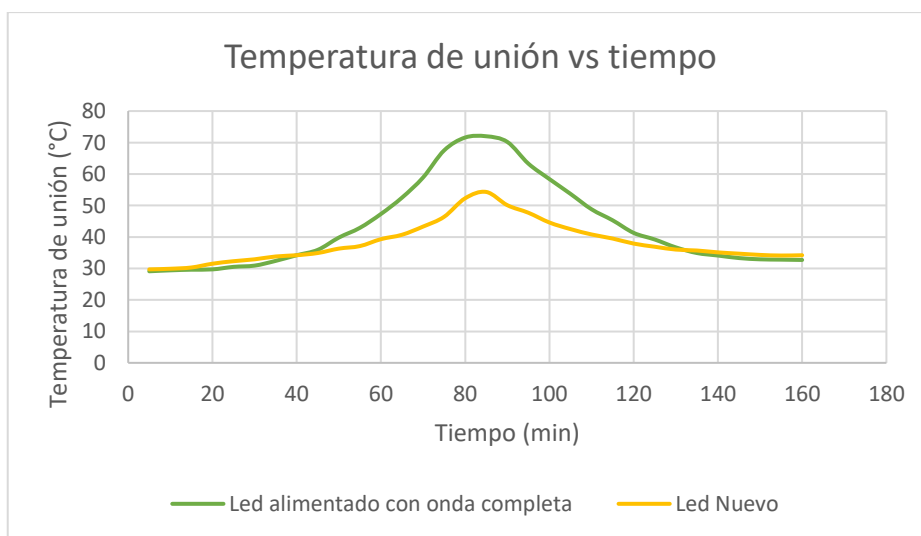


Figura 18. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con onda completa vs el LED nuevo.

Tabla 7. LED alimentado con modulación de ancho de pulso.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	29	32.4	3.4	5
2.399	0.001	0.002399	29.3	32.7	3.4	10
2.449	0.002	0.004898	29.7	32.8	3.1	15
2.499	0.004	0.009996	30	33	3	20
2.549	0.009	0.022941	30.2	33.5	3.3	25
2.596	0.018	0.046728	30.5	34.4	3.9	30
2.649	0.032	0.084768	30.9	36.2	5.3	35
2.699	0.048	0.129552	31.6	38.4	6.8	40
2.729	0.064	0.174656	32.4	40.1	7.7	45
2.799	0.104	0.291096	33.5	44.8	11.3	50
2.833	0.129	0.365457	34.7	48.3	13.6	55
2.889	0.173	0.499797	36.6	54.3	17.7	60
2.933	0.213	0.624729	38.4	59.4	21	65
2.995	0.273	0.817635	40.1	67.4	27.3	70
3.049	0.332	1.012268	42.7	75.7	33	75
3.099	0.349	1.081551	44.9	79.5	34.6	80
3.099	0.349	1.081551	45.7	80.5	34.8	85
3.049	0.332	1.012268	46	79.4	33.4	90
2.995	0.273	0.817635	45.1	73.4	28.3	95
2.933	0.213	0.624729	44.3	65.9	21.6	100
2.889	0.173	0.499797	42.1	60.2	18.1	105
2.833	0.129	0.365457	39.8	54.5	14.7	110
2.799	0.104	0.291096	38.6	50.8	12.2	115
2.729	0.064	0.174656	36.9	45.4	8.5	120
2.699	0.048	0.129552	35.9	43.1	7.2	125
2.649	0.032	0.084768	34.6	40.2	5.6	130
2.596	0.018	0.046728	33.7	37.8	4.1	135
2.549	0.009	0.022941	32.9	36.3	3.4	140
2.499	0.004	0.009996	32.4	35.1	2.7	145
2.449	0.002	0.004898	32	34.6	2.6	150
2.399	0.001	0.002399	31.8	34.4	2.6	155
2.349	0.001	0.002349	31.6	34	2.4	160

En la Tabla 7 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED alimentado con

PWM, se puede enfatizar que durante la prueba acumulativa de calor la temperatura máxima en la unión de este LED fue de 80.5°C en comparación con el LED nuevo que su temperatura máxima fue de 41.6°C; en la Figura 19 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED de PWM de color negro donde se ve un desplazamiento y el LED nuevo de color amarillo que es la referencia y en la Figura 20 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente y podemos denotar que en el LED de onda completa la temperatura aumenta más que en el LED nuevo.

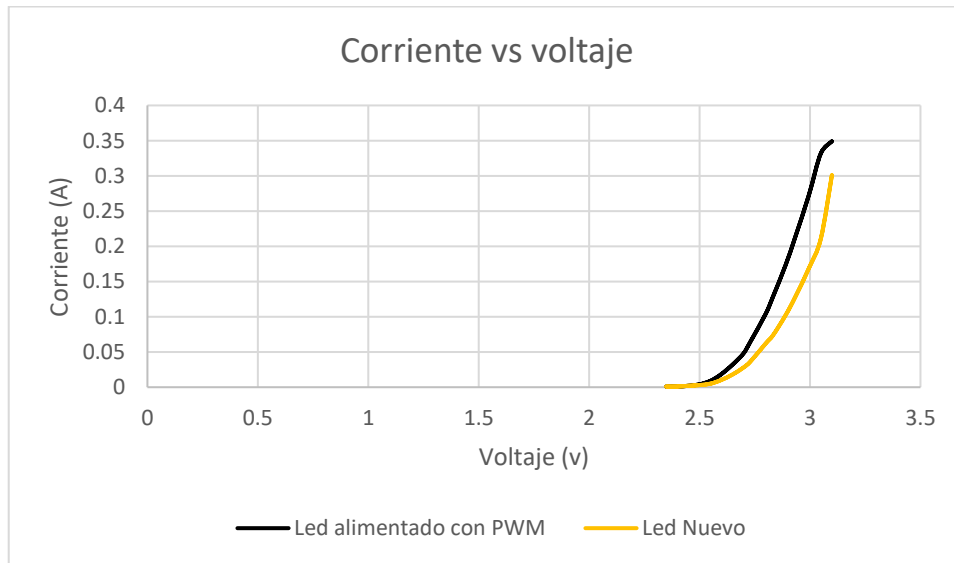


Figura 19. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con modulación de ancho de pulso vs el LED nuevo.

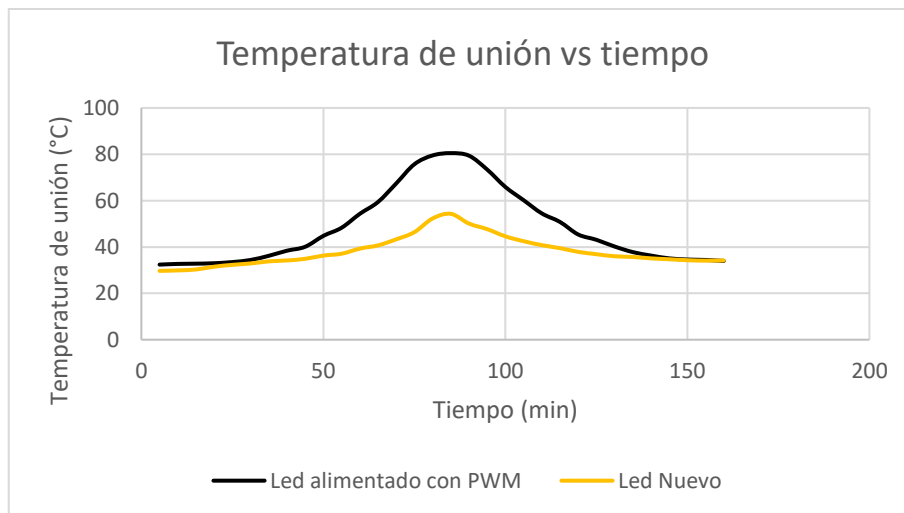


Figura 20. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con modulación de ancho de pulso vs el LED nuevo.

Tabla 8. LED alimentado con corriente continua.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	28	29.2	1.2	5
2.399	0.001	0.002399	28.5	29.6	1.1	10
2.449	0.001	0.002449	28.6	30	1.4	15
2.499	0.002	0.004998	28.6	30.2	1.6	20
2.549	0.005	0.012745	28.8	31	2.2	25
2.596	0.011	0.028556	29	31.3	2.3	30
2.649	0.023	0.060927	29.4	32.2	2.8	35
2.699	0.039	0.105261	30	32.9	2.9	40
2.729	0.052	0.141908	30.9	33.7	2.8	45
2.799	0.088	0.246312	31.8	34.4	2.6	50
2.833	0.112	0.317296	33.4	35.6	2.2	55
2.889	0.158	0.456462	35.4	36.8	1.4	60
2.933	0.198	0.580734	37.1	39.7	2.6	65
2.995	0.265	0.793675	39.4	41.3	1.9	70
3.049	0.325	0.990925	41.5	43	1.5	75
3.099	0.349	1.081551	43.6	45.1	1.5	80
3.099	0.349	1.081551	44.6	46.4	1.8	85
3.049	0.325	0.990925	46.9	47.4	0.5	90
2.995	0.265	0.793675	45.5	49.3	3.8	95
2.933	0.198	0.580734	44.1	52.2	8.1	100
2.889	0.158	0.456462	41.6	49.3	7.7	105
2.833	0.112	0.317296	39.9	46.3	6.4	110
2.799	0.088	0.246312	38.4	42.2	3.8	115
2.729	0.052	0.141908	36.7	40.1	3.4	120
2.699	0.039	0.105261	35.4	38.6	3.2	125
2.649	0.023	0.060927	34.3	36.9	2.6	130
2.596	0.011	0.028556	33.3	36.1	2.8	135
2.549	0.005	0.012745	32.7	35.4	2.7	140
2.499	0.002	0.004998	32.1	34.9	2.8	145
2.449	0.001	0.002449	31.8	34.6	2.8	150
2.399	0.001	0.002399	31.6	34.3	2.7	155
2.349	0.001	0.002349	31.3	34.2	2.9	160

En la Tabla 8 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED alimentado con

corriente continua, se puede enfatizar que durante la prueba acumulativa de calor la temperatura máxima en la unión de este LED fue de 52.2°C en comparación con el LED nuevo que su temperatura máxima fue de 41.6°C; en la Figura 21 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED de corriente continua de color gris donde se ve un desplazamiento y el LED nuevo de color amarillo que es la referencia y en la Figura 22 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente y podemos denotar que en el LED de corriente continua la temperatura aumenta más que en el LED nuevo.

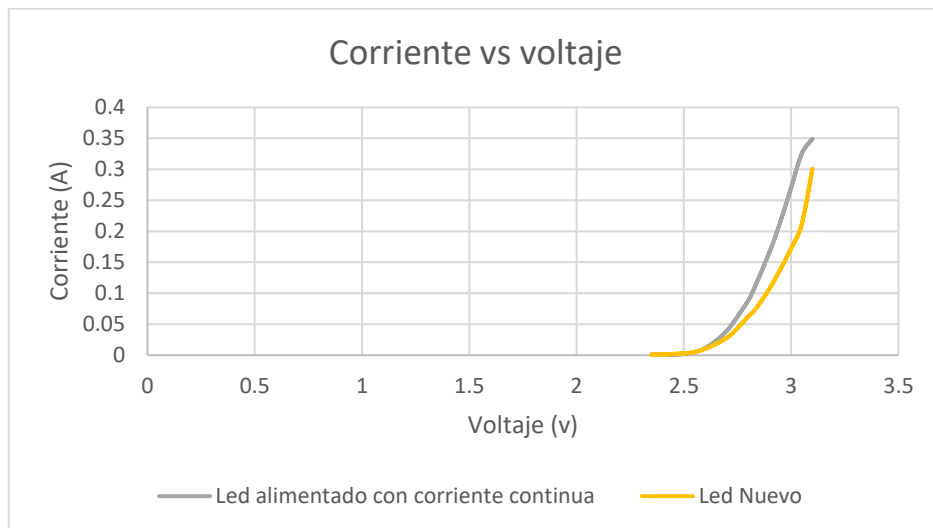


Figura 21. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con corriente continua vs el LED nuevo.

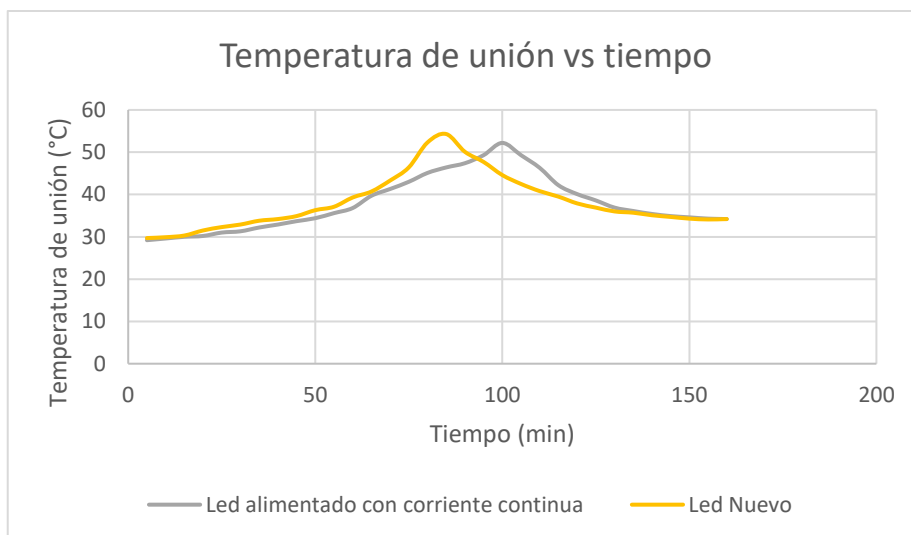


Figura 22. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con corriente continua vs el LED nuevo.

Tabla 9. LED alimentado con un driver comercial.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura Disipador (°C)	Temperatura de unión (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)	Lectura (min)
2.349	0.001	0.002349	28	29.1	1.1	5
2.399	0.001	0.002399	28.1	29.4	1.3	10
2.449	0.001	0.002449	28.2	29.6	1.4	15
2.499	0.002	0.004998	28.2	29.7	1.5	20
2.549	0.006	0.015294	28.3	30.5	2.2	25
2.596	0.013	0.033748	28.5	30.9	2.4	30
2.649	0.025	0.066225	28.9	32.4	3.5	35
2.699	0.04	0.10796	29.5	34.2	4.7	40
2.729	0.053	0.144637	30.1	35.9	5.8	45
2.799	0.091	0.254709	31.2	39.8	8.6	50
2.833	0.113	0.320129	32.6	42.9	10.3	55
2.889	0.156	0.450684	34.1	47.3	13.2	60
2.933	0.199	0.583667	36.2	52.5	16.3	65
2.995	0.255	0.763725	38.7	58.9	20.2	70
3.049	0.325	0.990925	41.4	67.5	26.1	75
3.099	0.349	1.081551	43.5	71.6	28.1	80
3.099	0.349	1.081551	44.5	72	27.5	85
3.049	0.325	0.990925	44.6	70.2	25.6	90
2.995	0.255	0.763725	43.7	63.3	19.6	95
2.933	0.199	0.583667	41.7	58.4	16.7	100
2.889	0.156	0.450684	40	53.7	13.7	105
2.833	0.113	0.320129	38.4	48.8	10.4	110
2.799	0.091	0.254709	36.7	45.3	8.6	115
2.729	0.053	0.144637	35.1	41.3	6.2	120
2.699	0.04	0.10796	33.8	39.2	5.4	125
2.649	0.025	0.066225	32.8	36.7	3.9	130
2.596	0.013	0.033748	31.8	34.9	3.1	135
2.549	0.006	0.015294	31.4	34.1	2.7	140
2.499	0.002	0.004998	30.8	33.3	2.5	145
2.449	0.001	0.002449	30.6	32.9	2.3	150
2.399	0.001	0.002399	30.3	32.8	2.5	155
2.349	0.001	0.002349	30.2	32.7	2.5	160

En la Tabla 9 se muestran los resultados de los datos recolectados durante las mediciones de voltaje, corriente y temperatura para el LED alimentado con un

driver comercial, se puede enfatizar que durante la prueba acumulativa de calor la temperatura máxima en la unión de este LED fue de 58.9°C en comparación con el LED nuevo que su temperatura máxima fue de 41.6°C en la Figura 23 se ilustra la construcción de la curva de corriente y voltaje del LED de corriente continua de color naranja donde se ve un desplazamiento y el LED nuevo de color amarillo que es la referencia y en la Figura 24 se ilustra la temperatura de unión contra el tiempo donde se puede apreciar ese calor remanente al momento de hacer descender la temperatura hasta la temperatura ambiente y podemos denotar que en el LED alimentado con un driver la temperatura aumenta más que en el LED nuevo.

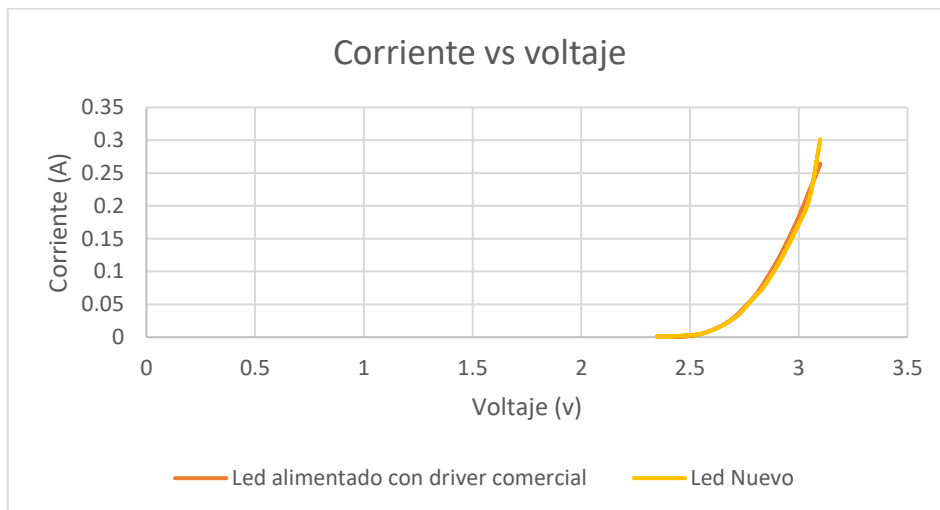


Figura 23. Gráfica de la curva V-I del LED alimentado con un driver comercial vs el LED nuevo.

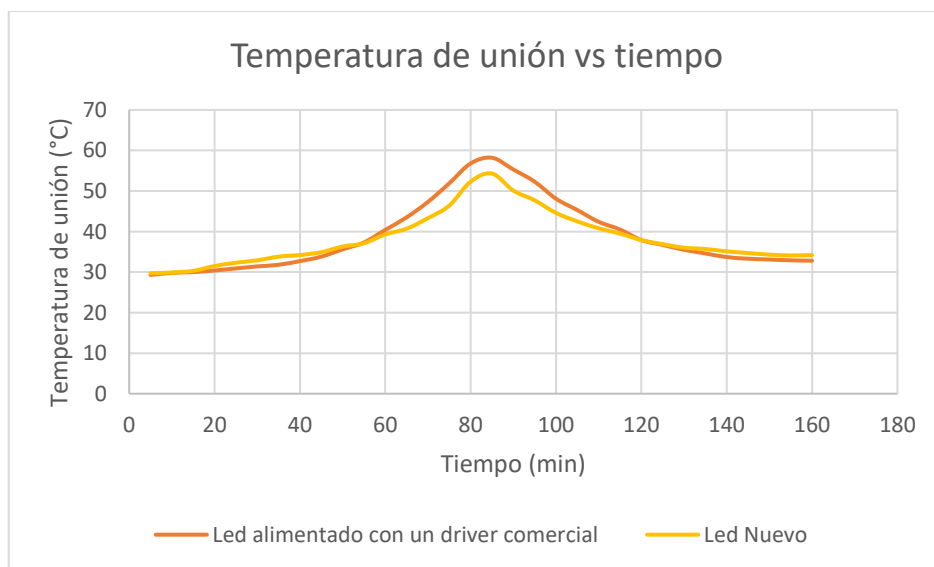


Figura 24. Gráfica de la temperatura de unión contra el tiempo del LED alimentado con onda completa.

3.3 PRUEBAS IMPULSIONALES, DE TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO

En la siguiente prueba se introduce un impulso escalón de potencia en el orden de nanosegundos es una prueba rápida que permite obtener valores de corriente y voltaje sin tener el efecto acumulado de calor de la temperatura de la resistencia. Fue una prueba rápida que se hizo para poder obtener el punto exacto de la constante de tiempo τ que es un indicador de la velocidad de reacción del circuito ante una perturbación.

Para las pruebas impulsionales el procedimiento es mediante un circuito impulsor que funciona dando la potencia mínima y la potencia máxima a través de cortocircuitar una resistencia y así obtener una salida de corriente del LED de una potencia mínima a una potencia máxima.

En la Figura 25 se muestra un esquema eléctrico de cómo funciona el circuito impulsor y en la Figura 26 se muestra el circuito impulsor implementado para la prueba y las ecuaciones (3.1) y (3.2) son las expresiones para calcular el juego de resistencias para cada LED y así obtener los impulsos y cambios de potencia del 10%-20%, 10%-30%, 10%-40%, 10%-50%, 10%-60%, 10%-80% y 10%-100% estos porcentajes de acuerdo a la potencia máxima del LED que son 350 mA.

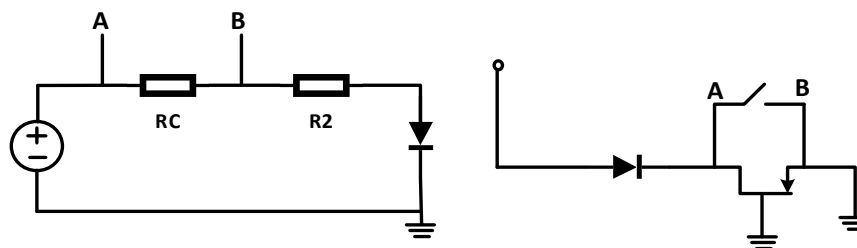


Figura 25. Diagrama de circuito impulsor.

$$R_2 = \left(\frac{V_{cc} - V_{led}}{P_{max}} \right) * V_{led} \quad (3.1)$$

$$R_c = \left(\frac{V_{cc} - V_{led}}{P_{min}} \right) * (V_{led}) - R_2 \quad (3.2)$$



Figura 26. Circuito impulsor implementado.

En seguida, se muestran las tablas de los cálculos de resistencia para cada LED. Los valores de las Tablas 10 a 15 son muy cercanos por los que se tomó los valores reales de resistencias más cercanos para hacer las pruebas.

Tabla 10. Cálculo de resistencias para el LED nuevo.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.833	101.52	101.52	0.1	0.2	10%-20%
10	2.889	68.48	136.96	0.1	0.3	10%-30%
10	2.933	51.82	155.46	0.1	0.4	10%-40%
10	2.995	41.96	167.84	0.1	0.5	10%-50%
10	3.049	35.32	176.61	0.1	0.6	10%-60%
10	3.099	26.73	187.13	0.1	0.8	10%-80%
10	3.3	22.11	198.99	0.1	1	10%-100%

Tabla 11. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con media onda.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.729	99.21	99.21	0.1	0.2	10%-20%
10	2.791	67.07	134.14	0.1	0.3	10%-30%
10	2.833	50.76	152.28	0.1	0.4	10%-40%
10	2.889	41.09	164.35	0.1	0.5	10%-50%
10	2.933	34.55	172.73	0.1	0.6	10%-60%
10	2.98	26.15	183.05	0.1	0.8	10%-80%
10	3.049	21.19	190.74	0.1	1	10%-100%

Tabla 12. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con onda completa.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.729	99.21	99.21	0.1	0.2	10%-20%
10	2.799	67.19	134.37	0.1	0.3	10%-30%
10	2.833	50.76	152.28	0.1	0.4	10%-40%
10	2.889	41.09	164.35	0.1	0.5	10%-50%
10	2.933	34.55	172.73	0.1	0.6	10%-60%
10	2.995	26.22	183.57	0.1	0.8	10%-80%
10	3.099	21.39	192.48	0.1	1	10%-100%

Tabla 13. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con modulación de ancho de pulso.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.833	101.52	101.52	0.1	0.2	10%-20%
10	2.889	68.48	136.96	0.1	0.3	10%-30%
10	2.933	51.82	155.46	0.1	0.4	10%-40%
10	2.995	41.96	167.84	0.1	0.5	10%-50%
10	3.049	35.32	176.61	0.1	0.6	10%-60%
10	3.099	26.73	187.13	0.1	0.8	10%-80%
10	3.3	22.11	198.99	0.1	1	10%-100%

Tabla 14. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con corriente continua.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.729	99.21	99.21	0.1	0.2	10%-20%
10	2.799	67.19	134.37	0.1	0.3	10%-30%
10	2.833	50.76	152.28	0.1	0.4	10%-40%
10	2.889	41.09	164.35	0.1	0.5	10%-50%
10	2.933	34.55	172.73	0.1	0.6	10%-60%
10	2.995	26.22	183.57	0.1	0.8	10%-80%
10	3.049	21.19	190.74	0.1	1	10%-100%

Tabla 15. Cálculo de resistencias para el LED alimentado con el driver comercial.

Vcc	Vled	R2	Rc	Pmin	Pmax	Porcentaje de la potencia
10	2.833	101.52	101.52	0.1	0.2	10%-20%
10	2.889	68.48	136.96	0.1	0.3	10%-30%
10	2.933	51.82	155.46	0.1	0.4	10%-40%
10	2.995	41.96	167.84	0.1	0.5	10%-50%
10	3.049	35.32	176.61	0.1	0.6	10%-60%
10	3.099	26.73	187.13	0.1	0.8	10%-80%
10	3.2	21.76	195.84	0.1	1	10%-100%

Estas pruebas se realizaron para cada LED y se hicieron 3 mediciones a diferentes temperaturas 25°, 55° y 85° C que se proponen utilizando el estándar LM-80, en la Figura 27 se muestran los LEDs físicos y el horno que permitió tener la temperatura constante para cada prueba. En el anexo A se muestran los oscilogramas de la corriente, el voltaje y la potencia obtenidos para cada LED a las diferentes temperaturas.



Figura 27. LEDs reales utilizados y horno.

3.4 ANÁLISIS DEL VOLTAJE EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

El siguiente análisis para la temperatura de unión corresponde a la variación del voltaje de diodo V_D en función de la temperatura, es decir lambda ecuación (3.3):

$$\frac{\partial V_D}{\partial T_j} = \lambda \quad (3.3)$$

Los fabricantes suelen proporcionar el coeficiente de temperatura que cuantifica la relación entre la alteración de esta propiedad de un material y la variedad de temperatura para el voltaje directo relacionado con una temperatura de 25°C entorno al voltaje directo se puede determinar por la ecuación (3.4):

$$V_D = V_D(25^\circ C) + \lambda(T_j(^{\circ}C) - 25) \quad (3.4)$$

Sin embargo, existen pocos estudios sobre los efectos térmicos de la resistencia dinámica del LED, los cambios en la resistencia dinámica alteran el voltaje en LED generando grandes saltos de corriente cambiando las características de potencia pudiendo reducir el efecto de la vida útil. Por lo tanto, es importante comprender el envejecimiento del LED y la relación con la resistencia dinámica R_D . Para lo cual emplearemos el LED Golden Dragón, las características del fabricante se muestran en la siguiente Tabla 16:

Tabla 16. Características del LED GOLDEN DRAGON LUW W5SM.

LED	$T_j(\text{max})(^{\circ}\text{C})$	$I_D(\text{max})(\text{A})$	$R_{\theta j-c}(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	$\lambda(\text{mV}/^{\circ}\text{C})$
Dragon	135	1	11(max)	

$T_j(\text{max})(^{\circ}\text{C})$ = Temperatura máxima de la unión

$R_{\theta j-c}(^{\circ}\text{C}/\text{W})$ = Resistencia térmica de la unión y la carcasa

$\lambda(\text{mV}/^{\circ}\text{C})$ = Coeficiente de temperatura en V_{DC}

Para las pruebas impulsiones se asume un escalón se instantáneo donde este sea de una escala muy rápida en tiempo se refiere a nanosegundos a una potencia inicial de 10% de la nominal, esto debe influir lo menos en la temperatura del LED, es decir debe ser la misma que la base y el disipador. Con el objetivo de no variar R_D y observar el comportamiento. Se procede a obtener la corriente y voltaje final en la prueba impulsiones, para una corriente final de 350mA , para tres distintas temperaturas a 25°C , 55°C y 85°C . Es importante medir con una prueba impulsional la corriente y voltaje en LED en función de al menos 3 temperaturas. Los puntos son para cada LED se presentan en la Tabla 17:

Tabla 17. Puntos de voltaje y corriente para cada LED.

LED nuevo	25°C	55°C	85°C
Voltaje (v)	3.15	3.07	2.98
Corriente (mA)	350	350	350
LED alimentado con media onda			
Voltaje (v)	3.68	3.5	3.39
Corriente (mA)	350	350	350
LED alimentado con onda completa			
Voltaje (v)	3.54	3.46	3.4
Corriente (mA)	350	350	350
LED alimentado con PWM			
Voltaje (v)	3.66	3.49	3.56
Corriente (mA)	350	350	350
LED alimentado con corriente continua			
Voltaje (v)	3.68	3.56	3.48
Corriente (mA)	350	350	350
LED alimentado con un driver comercial			
Voltaje (v)	3.80	3.66	3.58
Corriente (mA)	350	350	350

Se realiza un ajuste de curva con la aplicación de “Curving Fitting” del programa Matlab se ilustra en la Figura 28 para el LED nuevo, para obtener fácilmente el valor de lambda, es decir la derivada. Lineal queda como la ecuación (3.5):

$$V_D = -0.002833T_j + 3.222 \quad (3.5)$$

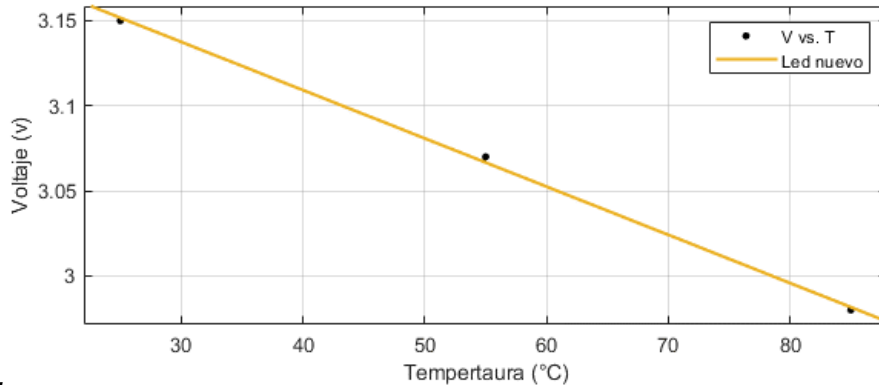


Figura 28. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED nuevo.

$$V_D = -0.004833T_j + 3.789 \quad (3.5.1)$$

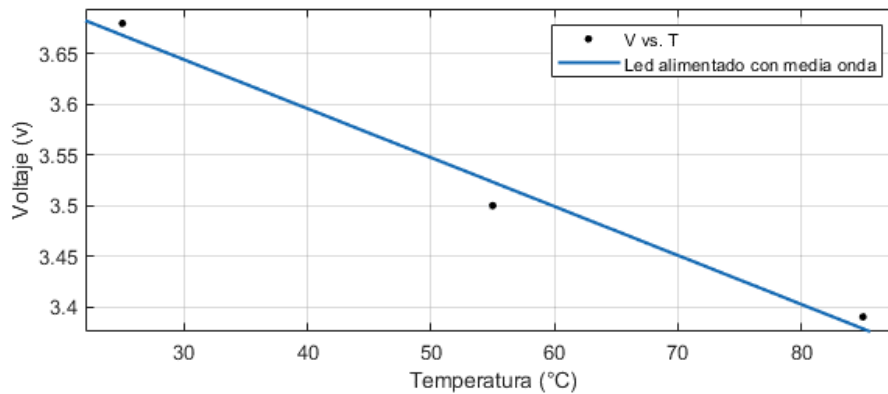


Figura 29. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con media onda.

$$V_D = -0.002333T_j + 3.595 \quad (3.5.2)$$

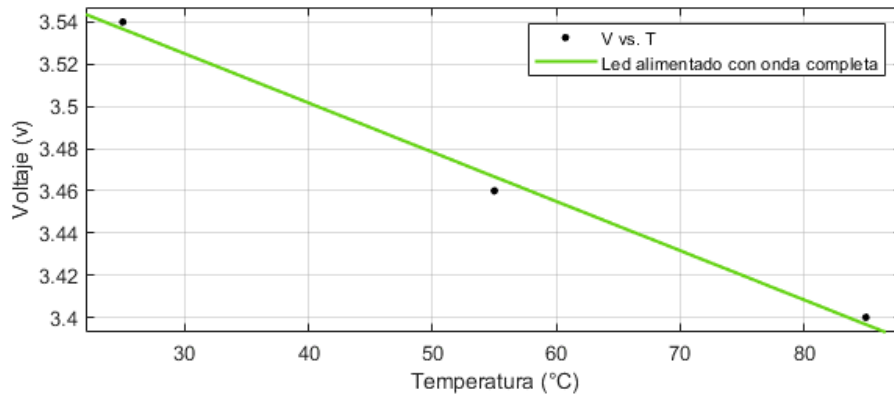


Figura 30. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con onda completa.

$$V_D = -0.001667T_j + 3.662 \quad (3.5.3)$$

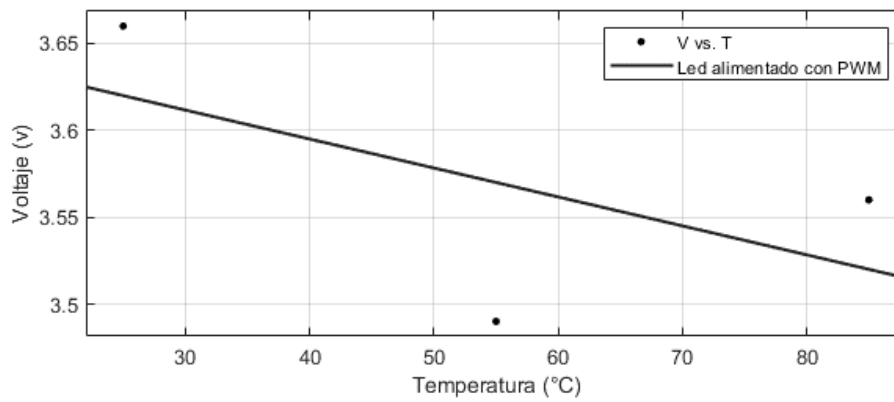


Figura 31. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con PWM.

$$V_D = -0.003333T_j + 3.757 \quad (3.5.4)$$

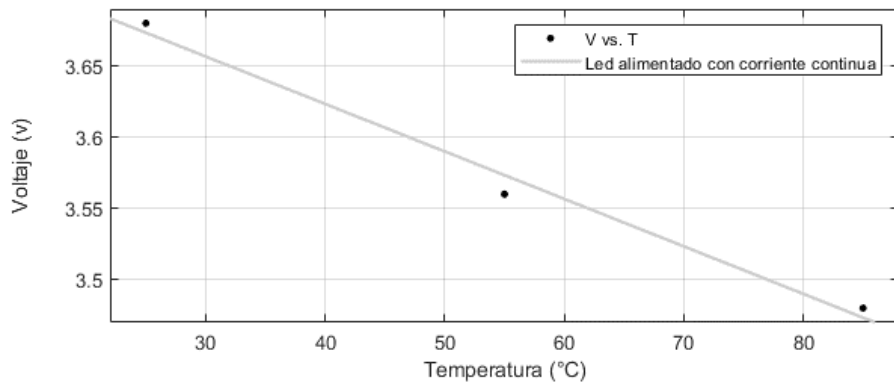


Figura 32. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con corriente continua.

$$V_D = -0.003667T_j + 3.882 \quad (3.5.5)$$

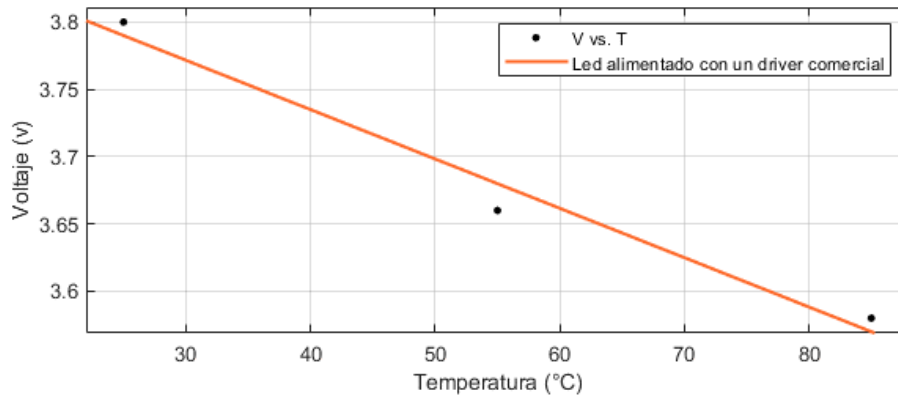


Figura 33. Curva lineal de voltaje vs temperatura para LED alimentado con un driver comercial.

Para obtener el coeficiente de temperatura (λ) se despeja de la ecuación (3.4) y se obtienen los valores para cada LED utilizado en la Tabla 18 se muestran los resultados, se tiene para este conjunto de LEDs de manera lineal, los coeficientes de temperatura, la cual es una aproximación del voltaje y la temperatura.

Tabla 18. Coeficiente de temperatura experimental de voltaje directo para cada LED.

LEDs	$\lambda(mV/^{\circ}C)$	Intervalo	R^2
LED nuevo	-2.43	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.9988
LED alimentado con media onda	-2.84	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.9809
LED alimentado con onda completa	-2.73	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.9932
LED alimentado con PWM	-0.79	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.3425
LED alimentado con corriente continua	-0.80	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.9868
LED alimentado con driver comercial	-0.82	350mA $25^{\circ}C \leq T_j \leq 85^{\circ}C$	0.9758

3.5 ANÁLISIS EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES INTRÍNSECAS DEL LED, PARA OBTENER UN ESCALÓN DE LA RESISTENCIA DINÁMICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE UNIÓN

La ecuación de Shockley es la relación entre el voltaje aplicado a la unión PN y la corriente directa ecuación (3.6)

$$I_D = I_S e^{(q/nkT_j)V_a} \quad (3.6)$$

Donde I_S , es la corriente de saturación inversa, q es la carga del electrón, n es el factor de idealización, k la constante del Boltzman, y T_j es la temperatura de unión en grados Kelvin. De acuerdo a la expresión de la derivada se tiene, el inverso de la resistencia dinámica, donde ecuación (3.7):

$$1/R_D = \partial I_D / \partial V_D = (q/nkT_j) I_S e^{(q/nkT_j)V_d} \quad (3.7)$$

Como se puede apreciar la resistencia dinámica es dependiente de la temperatura.

Hay que tomar en cuenta el conjunto de LED la existencia de elementos parásitos entre ellos, son la resistencia parásita al LED y la resistencia en serie al LED, donde se tiene el Thevenin de dicho circuito es representada por la ecuación (3.8)

$$R_{th} = R_p * R_s / (R_p + R_s) \text{ y } V_{pn} = R_p / (R_p + R_s) V_D \quad (3.8)$$

Realizando el análisis de circuito se obtiene la Figura 34:

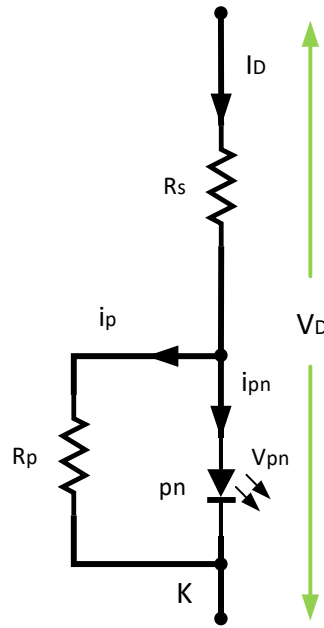


Figura 34. Resistencias parásitas en el LED.

$$I_D = (V_D - R_s I_D / R_p) + I_S e^{(q/nkT_j)(V_d - I_D R_s)} \quad (3.9)$$

Donde despejando V_D se obtiene la ecuación (3.10):

$$V_D = R_s I_{pn} + q/nkT_j (1 + R_s/R_p) * \ln(I_{pn}/I_S) \quad (3.10)$$

Por lo tanto

$$V_D = R_s I_{pn} + (q/nkT_j) * \ln(I_{pn}/I_S) \quad (3.10.1)$$

Entonces, $I_{pn} = I_D$

$$V_D = R_s I_D + (q/nkT_j) * \ln(I_D/I_S) \quad (3.10.2)$$

Por lo tanto, la resistencia dinámica la resistencia R_D se puede calcular con la derivada de la tensión directa con respecto a la corriente directa como se observa en la ecuación (3.11):

$$R_D = \partial I_D / \partial V_D = R_s + (nkT_j/q) * 1/I_D \quad (3.11)$$

Se puede observar que la resistencia se ve directamente afectada por la temperatura de la unión T_j y el factor n . El segundo término en la ecuación es inversamente proporcional a la corriente directa, por lo tanto un aumento de la resistencia dinámica con el aumento de la corriente directa será esperado, y con respecto a los efectos de la resistencia dinámica dependerá de qué la variación de parámetros es predominante: o el factor n , la resistencia en serie o la temperatura de la unión.

Con este se puede medir la R_D y, se puede conocer el valor de R_s , conociendo R_D y la corriente I_D en función de la temperatura.

El procedimiento para obtener la resistencia dinámica consiste en medir las variaciones en torno a un punto fijo de corriente continua. Para medir dicha resistencia en un laboratorio se realiza el siguiente procedimiento:

- 1) Establecer punto fijo de corriente de DC, preferentemente la nominal del LED
- 2) Sumarle una onda sinusoidal de 10% de valor de la corriente de DC del LED
- 3) La frecuencia de esta corriente debe ser alta para evitar efectos térmicos debido a la corriente en AC, para este caso se emplean una frecuencia de 1 kHz
- 4) La temperatura se varia en 3 puntos: 25°C, 55°C y 85°C
- 5) La temperatura es determinada midiendo el voltaje directo y usando el polinomio lineal del ajuste.

La resistencia dinámica se puede calcular como la ecuación (3.12):

$$R_D = V_{ca}/i_{ca} || I_D, T_j \quad (3.12)$$

Para la corriente directa y la temperatura de unión, donde V_{ca} es voltaje medido a través del LED Figura 35.

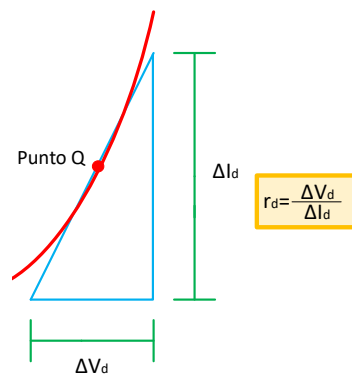


Figura 35. Resistencia dinámica en base a la corriente y el voltaje a través del LED.

A continuación, se realiza el análisis de las formas de onda de alimentación de cada una de las pruebas LED, para determinar la corriente continua y la corriente en AC, se realiza un análisis en Fourier de cada una de las ondas. La resistencia dinámica con una onda que no afecte a la temperatura para este caso es de un LED nuevo Figura 36.

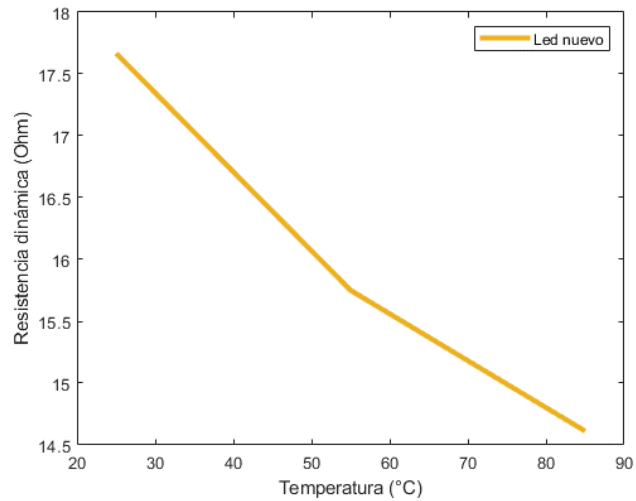


Figura 36. Resistencia dinámica de un LED nuevo.

La resistencia dinámica para un LED alimentado con media onda para este caso Figura 37.

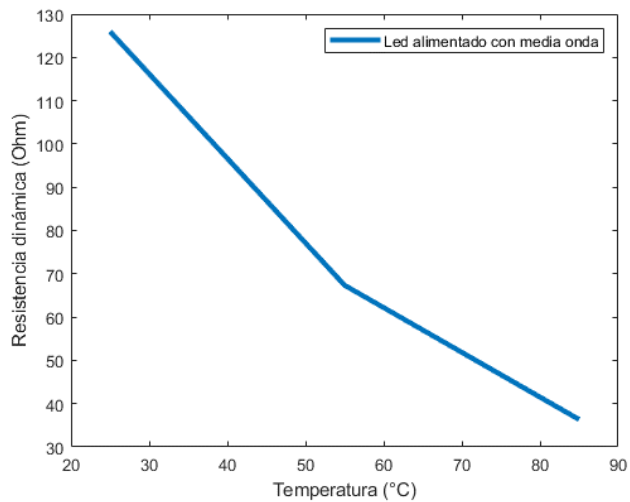


Figura 37. Resistencia dinámica de un LED alimentado con media onda.

La resistencia dinámica para un LED alimentado con onda completa para este caso Figura 38.

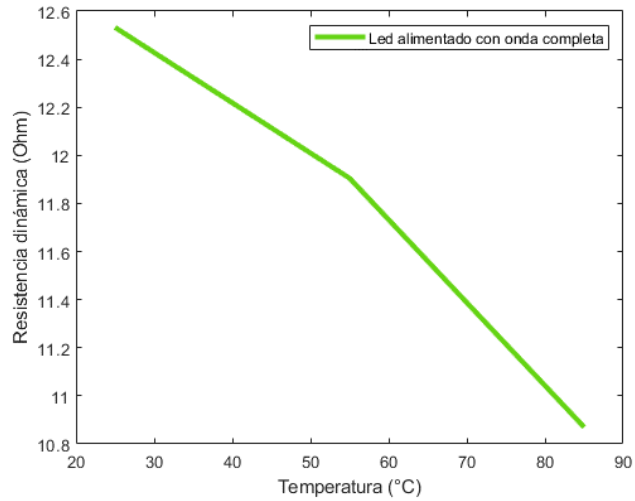


Figura 38. Resistencia dinámica de un LED alimentado con onda completa.

La resistencia dinámica para un LED alimentado con PWM para este caso Figura 39.

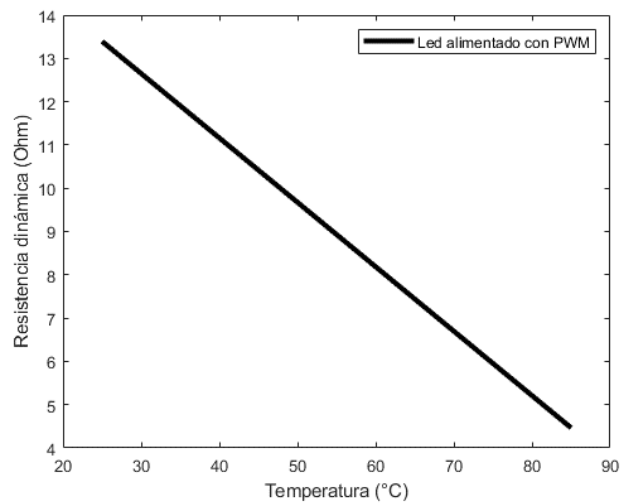


Figura 39. Resistencia dinámica de un LED alimentado con PWM.

La resistencia dinámica para un LED alimentado con corriente continua para este caso Figura 40.

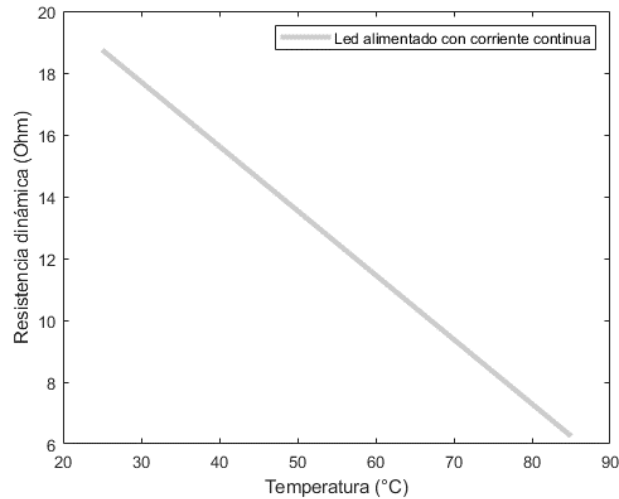


Figura 40. Resistencia dinámica de un LED alimentado con corriente continua.

La resistencia dinámica para un LED alimentado con un driver comercial para este caso Figura 41.

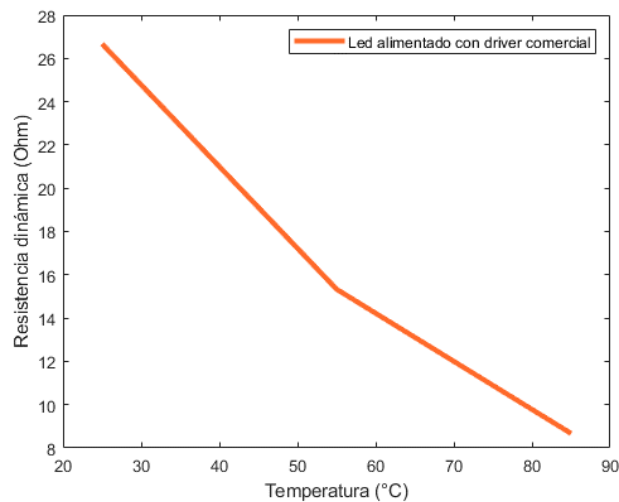


Figura 41. Resistencia dinámica de un LED alimentado con un driver comercial.

En la cual se determina la resistencia dinámica de cada una de las formas de onda de alimentación.

3.6 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DINÁMICA EN FUNCIÓN DE LAS FORMAS DE ONDA DE ALIMENTACIÓN

En este análisis de la resistencia dinámica en función de las formas de onda, lo primero es medir la salida de corriente y voltaje de las señales de salida de cada forma de onda con la que fueron alimentados los LEDs. Para cada LED alimentado con media onda, onda completa, modulación por ancho de pulso, corriente continua y un driver comercial se midió la corriente a la salida de cada controlador, se guardaron los valores del osciloscopio, estos datos obtenidos se importaron al programa de Matlab y con la aplicación de ajuste de curva se obtuvieron los

coeficientes para realizar la transformada de Fourier en el programa de Mathcad y así obtener la resistencia dinámica.

3.6.1 FFT de corriente del LED alimentado con media onda

Los coeficientes obtenidos para este LED son

$a_0 = 0.433$	$a_3 = -0.08762$	$b_5 = 0.04677$
$a_1 = 0.4082$	$b_3 = 0.05776$	$a_6 = 0.00394$
$b_1 = 0.4669$	$a_4 = 0.03763$	$b_6 = 0.01241$
$a_2 = -0.04762$	$b_4 = 0.008858$	$a_7 = 0.02254$
$b_2 = 0.3602$	$a_5 = 0.02765$	$b_7 = 0.003906$
$a_8 = 0.007729$	$b_8 = 0.01555$	

Con los valores de los coeficientes se hizo la transformada rápida de Fourier para la corriente obteniendo la sumatoria de a_0, a_n y b_n ecuación 3.13

$$\begin{aligned}
 f(t) := & \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(\omega \cdot 1 \cdot t) + b_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 1 \cdot t)) + (a_2 \cdot \cos(\omega \cdot 2 \cdot t) + b_2 \\
 & \cdot \text{sen}(\omega \cdot 2 \cdot t)) + (a_3 \cdot \cos(\omega \cdot 3 \cdot t) + b_3 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 3 \cdot t)) + (a_4 \\
 & \cdot \cos(\omega \cdot 4 \cdot t) + b_4 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 4 \cdot t)) + (a_5 \cdot \cos(\omega \cdot 5 \cdot t) + b_5 \\
 & \cdot \text{sen}(\omega \cdot 5 \cdot t)) + (a_6 \cdot \cos(\omega \cdot 6 \cdot t) + b_6 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 6 \cdot t)) + (a_7 \\
 & \cdot \cos(\omega \cdot 7 \cdot t) + b_7 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 7 \cdot t)) + (a_8 \cdot \cos(\omega \cdot 8 \cdot t) + b_8 \\
 & \cdot \text{sen}(\omega \cdot 8 \cdot t))
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Esta función se graficó y la forma de onda se ilustra en la Figura 42 que muestra la gráfica de la transformada de Fourier hasta el armónico número ocho de la señal de corriente de salida del rectificador de media onda.

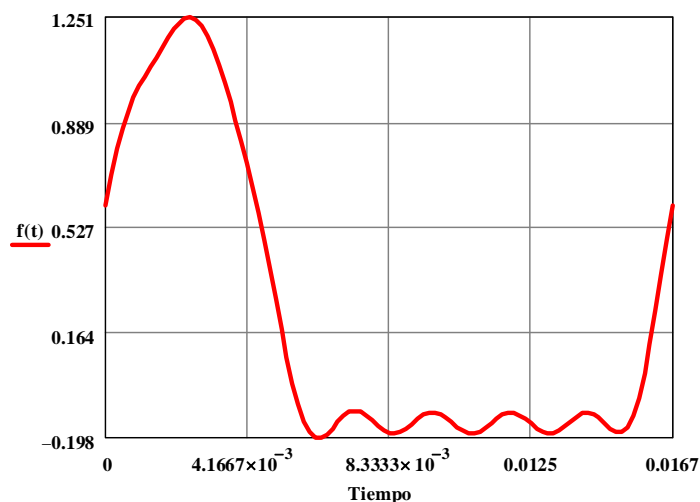


Figura 42. FFT de corriente de media onda dada por Mathcad.

La corriente promedio corresponde a $I_{dc} = 0.398mA$

Después se obtiene la función $g(t)$ que es la componente de DC $\frac{a_0}{2} = 0.217$ y la componente de AC se toma en cuenta solo el primer armónico por ser el de mayor amplitud ecuación (3.15) está función se ilustra de manera gráfica en la Figura 43.

$$g(t) := \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(\omega \cdot 1 \cdot t) + b_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot 1 \cdot t)) \quad (3.15)$$

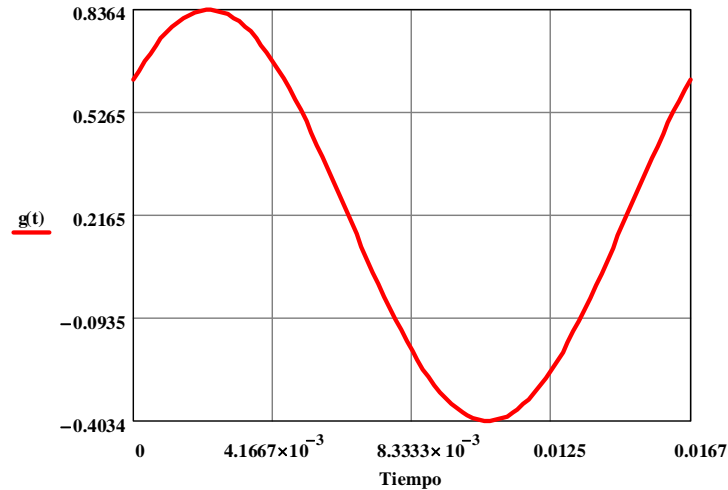


Figura 43. Forma de onda de la componente en DC sumada a la componente AC dada por Mathcad.

Esta forma de onda es la que se proyecta la componente de AC el armónico 1 en color verde y la resistencia en DC en color azul, en la curva I-V de diodo de color rojo, por lo que su resistencia dinámica se representa en la Figura 44:

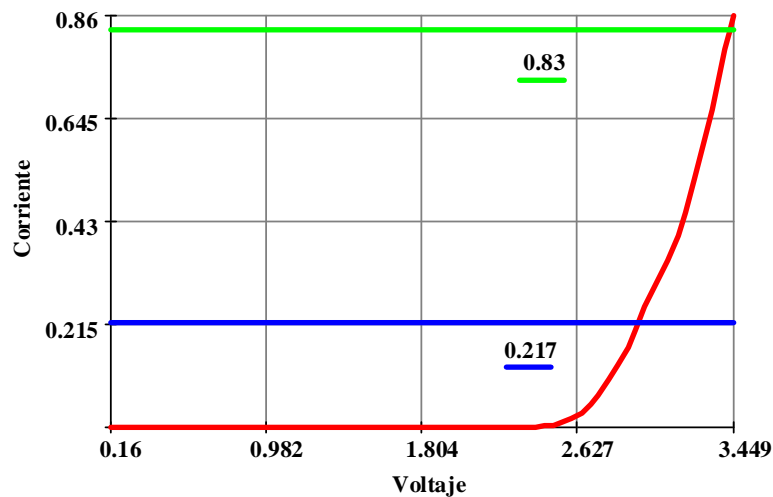


Figura 44. Curva V-I del LED nuevo alimentado con una corriente de media onda.

Por lo tanto, R_{D1} para este caso de LED nuevo alimentado con un corriente media onda es de:

$$R_{D1} = 1.024\Omega$$

Por lo tanto es necesario hacer lo siguiente para cada uno de los LEDs madurados (es decir se dejan los LEDs alimentados con distintas formas de onda encendidos durante un intervalo de tiempo), para verificar como varió esta R_D en

transcurso de 9000 horas, por lo tanto, se realizó para cada uno de los casos la resistencia R_D de cada forma de onda.

3.6.2 FFT de corriente del LED alimentado con onda completa

Los coeficientes obtenidos para este LED son

$a_0 = 0.4937$	$b_3 = 0.001076$	$b_6 = 0.04381$
$a_1 = 0.0003633$	$a_4 = -0.001564$	$a_7 = -4.345e-05$
$b_1 = 0.001894$	$b_4 = 0.004753$	$b_7 = -0.0001532$
$a_2 = 0.4738$	$a_5 = -0.0005433$	$a_8 = 0.01711$
$b_2 = -0.1801$	$b_5 = -0.0005404$	$b_8 = -0.02449$
$a_3 = 0.00130$	$a_6 = -0.008368$	

Con los valores de los coeficientes se hizo la transformada rápida de Fourier para la corriente obteniendo la sumatoria de a_0, a_n y b_n ecuación 3.13

Esta función se graficó y la forma de onda se ilustra en la Figura 45 que muestra la gráfica de la transformada de Fourier hasta el armónico número ocho de la señal de corriente de salida del rectificador de onda completa.

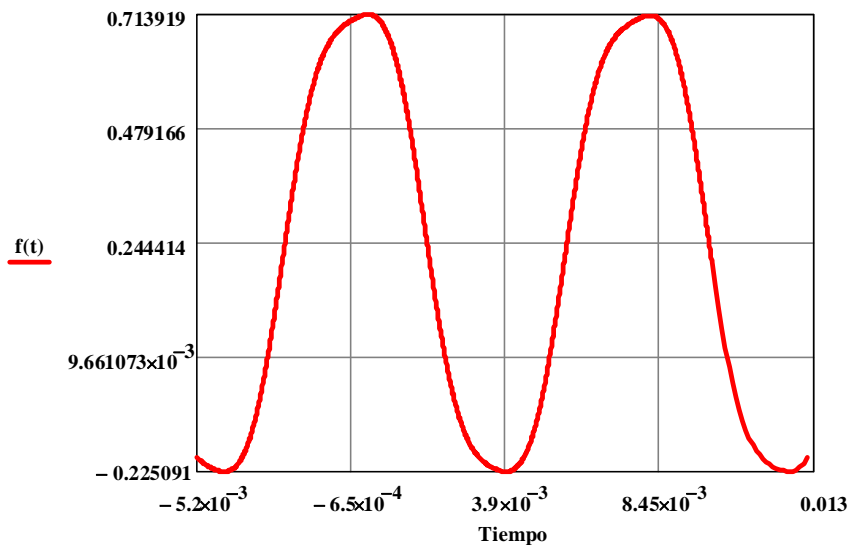


Figura 45. FFT de corriente de onda completa dada por Mathcad.

Después se obtiene la función $g(t)$ que es la componente de DC $\frac{a_0}{2} = 0.247$ y la componente de AC se toma en cuenta solo el primer armónico por ser el de mayor amplitud ecuación (3.15) esta función se ilustra de manera gráfica en la Figura 46.

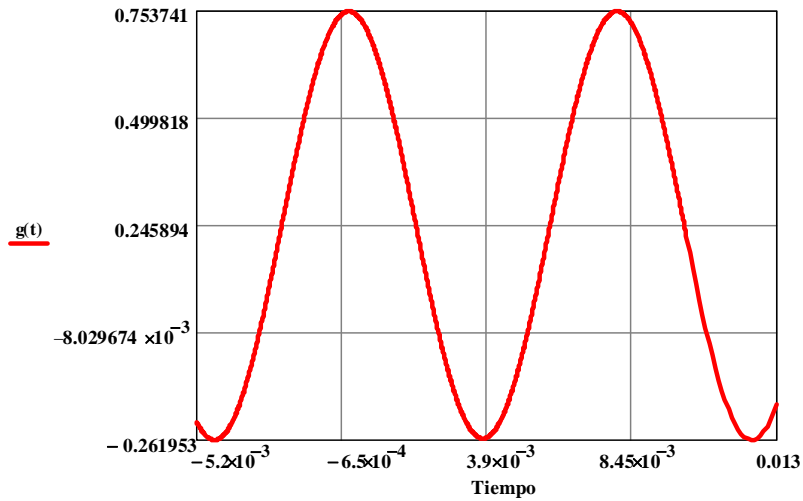


Figura 46. Forma de onda Forma de onda de la componente en DC sumada a la componente AC dada por Mathcad.

Esta forma de onda se proyecta la resistencia en DC en color azul, en la curva I-V del diodo de color rojo, por lo que su resistencia dinámica se representa en la Figura 47:

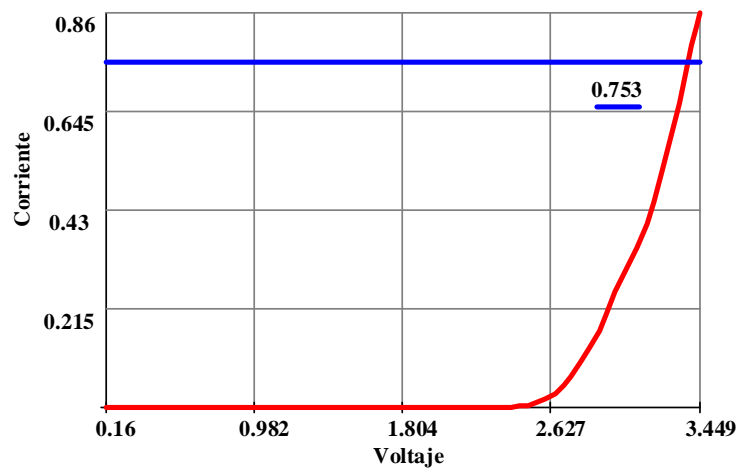


Figura 47. Curva V-I del LED nuevo alimentado con una corriente de onda completa.

Por lo tanto, R_{D2} para este caso de LED alimentado con un corriente de onda completa es de:

$$R_{D2} = 1.262\Omega$$

En el anexo B se muestran los programas de Mathcad del LED alimentado con modulación de ancho de pulso, alimentado con corriente continua y alimentado con un driver comercial.

Capítulo IV - RESULTADOS

4.1 RESISTENCIA R_τ PARA CADA LED

Para cada LED se muestran los resultados de las resistencias tau de la Tabla 19 a la 24. Se le denota como resistencia tau, porque es la resistencia que se encuentra en la primera evolución del sistema.

Tabla 19. Resistencias obtenidas para el LED nuevo a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_τ (Ω)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
17.667	25
15.750	55
14.612	85

Tabla 20. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con media onda a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_τ (Ω)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
125.963	25
67.341	55
36.333	85

Tabla 21. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con onda completa a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_τ (Ω)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
12.532	25
11.905	55
10.870	85

Tabla 22. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con modulación de ancho de pulso a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_τ (Ω)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
13.393	25
8.929	55
4.464	85

Tabla 23. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con corriente continua a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_τ (Ω)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
18.75	25
12.5	55
6.25	85

Tabla 24. Resistencias obtenidas para el LED alimentado con driver comercial a diferentes temperaturas.

Resistencia tau R_{τ} (Ω)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
26.667	25
15.333	55
8.667	85

Enseguida se muestran los ajustes de curva de las resistencias para cada LED hechos en Matlab.

Gráfica de la resistencia tau del LED nuevo con ajuste de curva en Matlab de la forma $y = mx + b$ Figura 48.

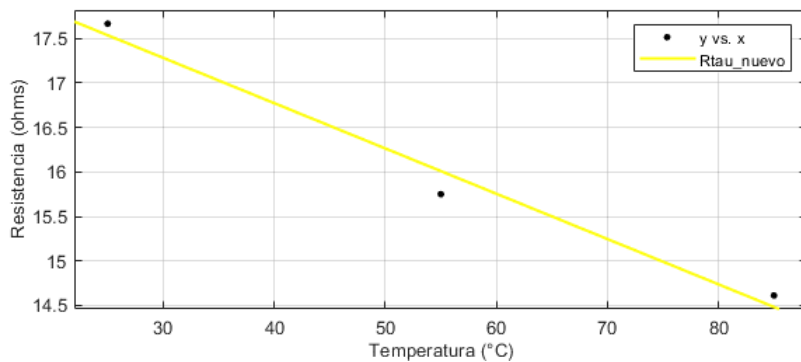


Figura 48. Gráfica de la resistencia tau del LED nuevo con ajuste de curva en Matlab.

Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con media onda con ajuste de curva en Matlab de la forma $y = mx + b$ Figura 49.

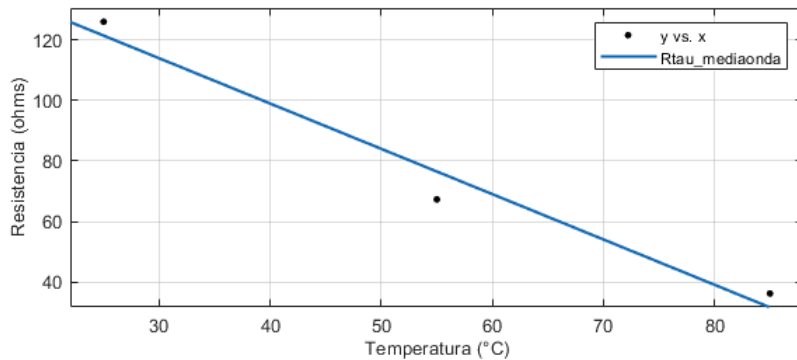


Figura 49. Gráfica de la resistencia tau del alimentado con media onda con ajuste de curva en Matlab.

Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con onda completa con ajuste de curva en Matlab de la forma $y = mx + b$ Figura 50.

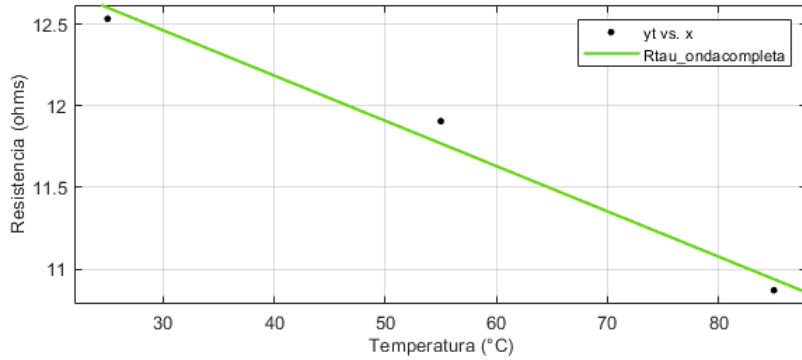


Figura 50. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con onda completa con ajuste de curva en Matlab.

Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con modulación por ancho de pulso con ajuste de curva en Matlab de la forma $y = mx + b$ Figura 51.

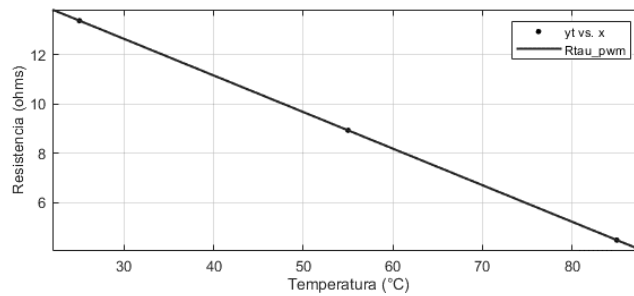


Figura 51. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con modulación por ancho de pulso con ajuste de curva en Matlab.

Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con corriente continua con ajuste de curva en Matlab de la forma $y = mx + b$ Figura 52.

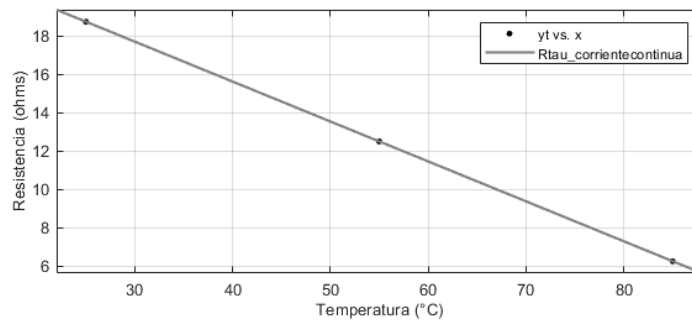


Figura 52. Gráfica de la resistencia tau del LED alimentado con corriente continua con ajuste de curva en Matlab.

4.2 CONSTANTES DE TIEMPO PARA CADA LED

En las pruebas impulsionales la corriente se asemeja a un sistema de primer orden, en la literatura de los sistemas de control específicamente para el escalón unitario una característica de la curva de la respuesta exponencial es que el valor de la primera evolución de la primera constante de tiempo es de 0.632 en porcentaje el 63%. Como se puede apreciar en la Tabla 25 se obtuvieron las constantes de tiempo para cada LED de manera experimental.

Tabla 25. Constantes de tiempo para cada LED (experimentales).

Constante de tiempo τ	Valor
LED Driver	120ns
LED Media onda	145ns
LED PWM	200ns
LED Onda completa	110ns
LED CD	100ns
LED Nuevo	120ns

4.3 VALORES DE RESISTENCIA Y CAPACITANCIA PARA EL MODELO TÉRMICO DEL LED.

Como se mencionó en el estado del arte sobre el modelo térmico se empleó la red RC de Cauer ya que esta representación es la usada para dispositivos semiconductores se mostró el diagrama de la red de Cauer en el capítulo 2 y tiene 3 mallas que representan la temperatura ambiente, la temperatura de unión y la temperatura del disipador. Para este caso en particular se pueden despreciar la malla de la temperatura ambiente y la temperatura del disipador, esto tiene fundamento en que las pruebas realizadas se hicieron en el orden de los nanosegundos y no afectó la temperatura ambiente y la temperatura del disipador. En la Tabla 26 se muestran los valores de capacitancia y resistencia. Se puede apreciar que el LED Nuevo y el LED alimentado con corriente continua tienen valores muy parecidos y esto sigue confirmando que el mejor modo de alimentar un LED es con corriente continua.

Tabla 26. Valores de resistencia y de capacitancia para el modelo térmico.

LEDs	Resistencia (Ω)	Capacitancia (nF)
LED Driver	11.738	0.1022
LED Media onda	8.879	0.1630
LED PWM	10.970	0.1823
LED Onda completa	9.381	0.1172
LED CD	11.301	8.8487
LED Nuevo	14.450	8.3044

CONCLUSIONES

Con los análisis y las pruebas realizadas se presentan las conclusiones a las que se llegó mediante este trabajo de tesis.

En el desarrollo de este trabajo se implementó un banco de pruebas para medir el conjunto de LED de potencia que anteriormente fueron alimentados con diferentes formas de onda donde se había concluido que la peor manera de alimentar un LED es con una forma de media onda y la mejor es con corriente continua. Se calculó algunas de las variables y otras se obtuvieron a través de los datos recolectados en las 3 pruebas que se hicieron.

La primera prueba demostró que midiendo el conjunto de LEDs madurados para reconstruir la curva característica de cada uno se puede observar que con el aumento de la temperatura en la unión del LED los valores de corriente y voltaje son los que influyen de manera directa, además se corroboró que existe un efecto acumulativo de calor en esta prueba y la temperatura remanente se queda en la unión y el disipador. Se pudo observar desde este punto que cada forma de onda con la que fueron alimentados afectan la vida útil del LED.

Para la segunda prueba se utilizó el circuito impulsor y en esta prueba se observaron las variaciones de la resistencia del led si afecta proporcionalmente de la temperatura, además que se pudo notar que el LED de media onda llegó al fin de su vida útil por las gráficas y los valores arrojados.

En la última prueba se pudo observar que dependiendo de la forma de onda de alimentación en comparación al LED Nuevo su resistencia disminuye de manera gradual y se comprobó con los resultados obtenidos.

Al analizar todos los resultados pude comparar mis resultados basados en el pequeño ciclo térmico que es la temperatura con los resultados obtenidos anteriormente de las formas de onda y se sigue comprobando que las formas de onda más recomendadas para alimentar un LED es la corriente continua y la PWM, y esto se sustenta en que la forma de media onda rectificadas, tiene un constante encendido y apagado que el ojo humano no puede percibir pero si notar en la degradación del material y en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores.

Es importante mencionar que estos resultados obtenidos no son una base estricta, son estudios comparativos para ver por qué el LED envejece, haciendo énfasis en que los valores obtenidos para cada LED de resistencia y capacitancia no predicen la vida útil del LED, si no que da un indicio de cuál es el efecto que causa la resistencia R_j y como va degradándose.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Turnet, *Diseño con luz*, Mc Graw Hill, 2000, pp. 19-43.
- [2] «Estudio y análisis de las técnicas para la estabilización de lámparas de descarga sin lazos de retroalimentación,» *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*, 2011.
- [3] J. gudiño, «Análisis Técnico de las ventajas y desventajas de las lámparas incandescentes y las lámparas fluorescentes compactas,» *Universidad de los Andes*, 2014.
- [4] W. E. J. Barbosa, «Fabricación y caracterización de Diodo Emisor de Luz Blanca Orgánico basado en estados excíplex,» *Centro de investigaciones en óptica, A.C.*, 2016.
- [5] McPherson, J., 2010. *Reliability Physics And Engineering*. Berlin: Springer US.
- [6] van Driel, W., Fan, X. and Zhang, G., 2018. *Solid State Lighting Reliability*. Cham: Springer International Publishing
- [7] Bajaria, H. J. 1983. Integration of Reliability, Maintainability and Quality Parameters in Design of Heavy Duty Vehicles (L. Ray Buckendale lecture) - Society of Automotives Engineers, Inc. Palo Alto : Warrendale, 1983. ISBN: 0898833043.
- [8] W. van Driel y X. Fan, «Solid State Lighting Technology,» *Springer science & business Media*, 2013.
- [9] aniLED, «Presente y futuro de la tecnología led, claves para cambiar a iluminación led,» *Asociación española de la industria LED*, 2013.
- [10] P. Lennie, «Color Vision,» *Principes of neural science*, pp. 573-586, 2000.
- [11] Jeong Park; Lee, C.C.; «An Electrical Model With Junction Temperature for Light-Emitting Diodes and the Impact on Conversion Efficiency,» in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, Issue 5, pp. 308- 310. May 2005.
- [12] P. C. C. Fernández, «Estudio de la eficiencia energética en instalaciones de iluminación. Un caso práctico,» *Universidad de Cantabria*, 2015.
- [13] A. T., «Illumination whit solid state lighting technology,» *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 8, nº 2, pp. 310-320, March/April 2002.
- [14] I. Villanueva, M. Juárez y G. Vázquez, «Estudio y análisis de la confiabilidad de convertidores CD-CD para LED de potencia,» *Instituto Tecnológico Superior de Irapuato*, vol. 1, pp. 17-35, Noviembre 2016.
- [15] V. Bender, T. Marchesan y J. Alonso, «Solid-State lighting: A concise review of the state of the art on LED and OLED modeling,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 6-16, 2015.

- [16] L. Europe, «Evaluating performance of LED based luminaires, guidance paper,» pp. 7-9, 2018.
- [17] LEDVANCE GmbH, «Vida útil LED: calidad de luz duradera,» LEDVANCE, 2019.
- [18] B. Bose, «Power electronics and motor drivers recent progress and perspective,» *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 56, nº 2, pp. 581-588, February 2009.
- [19] W. E. J. Barbosa, «Fabricación y caracterización de Diodo Emisor de Luz Blanca Orgánico basado en estados excíplex,» *Centro de investigaciones en óptica, A.C.*, 2016.
- [20] P. Flesch, «Light and light sources:high-intensity discharge lamps,» Springer-Verlag, 2006.
- [21] R. Simpson, «Lighting control:technology and applications,» Taylor & Francis, 2003.
- [22] B. Sun, X. Jiang, K. Yung, J. Fan and M. G. Pecht, "A Review of Prognostic Techniques for High-Power White LEDs," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6338-6362, Aug. 2018.
- [23]Arrow Electronics. "Arrow Lighting Solutions Seminar". Madrid. 1 Junio 2011
- [24] Gabriel Torres Aguilar. (2016). Normas y especificaciones para los sistemas de iluminación LED. 23/Septiembre/2020, de Iluminet Revista de Iluminación Sitio web: <https://www.iluminet.com/normas-especificaciones-sistemas-iluminacion-led/>
- [25] Fraile Vilarrasa, Jorge Gago Calderón, Alfonso. (2012). ILUMINACIÓN CON TECNOLOGÍA LED. España: Paraninfo.
- [26]V. Bender, T. Marchesan y J. Alonso, Solid-State lighting: A concise review of the state of the art on LED and OLED modeling, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 6-16, 2015.
- [27] F. Qin, X. Bie, T. An, J. Dai, Y. Dai and P. Chen, "A Lifetime Prediction Method for IGBT Modules Considering the Self-accelerating Effect of Bond Wire Damage," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
- [28] Van Driel, W., Fan, X. and Zhang, G., 2013. *Solid State Lighting Reliability Part 2*. 1st ed. New York: Springer.
- [29] K. Yang, "Transient Electro-Thermal Analysis of Traction Inverters" (Tesis doctoral), Hamilton, Ontario: McMaster University, 2014.
- [30] Manterola, Carlos, Grande, Luis, Otzen, Tamara, García, Nayely, Salazar, Paulina, & Quiroz, Guissela. (2018). Confiabilidad, precisión o reproducibilidad de las mediciones. Métodos de valoración, utilidad y aplicaciones en la práctica clínica.

Revista chilena de infectología, 35(6), 680-688. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-1018201800600680>

[31] Bajaria, H. J. 1983. Integration of Reliability, Maintainability and Quality Parameters in Design of Heavy Duty Vehicles (L. Ray Buckendale lecture) - Society of Automotives Engineers, Inc. Palo Alto : Warrendale, 1983. ISBN: 0898833043.

[32] González, Francisco Javier - Fernández. 2014. Auditoría del manetenimiento e indicadores de gestión. [ed.] S.A. ARTEGRAF. Primera. Madrid : Fundación CONFEMETAL, 2014. ISBN: 84-96169-36-7

[33] <http://www.iesna.org>

[34] C. Segura Antúnez, «Estudio de la fiabilidad mediante ensayos acelerados de diodos ultravioleta de alta potencia,» Universidad politécnica de Madrid, 2014.

[35] K. Choudhary y P. Sidharthan, «Reliability prediction of electronic power conditioner using MIL-HDBK-217 based parts count method,» In computer, communication and control, International conference, pp. 1-4, 2015.

[36]Infineon, *Transient Thermal Measurements and thermal*, 2017.

[37] J.B. Chen, C. Li, Y.P. Wu. Study on rapid thermal cycling by inducted heating for microstructure of single SnAgCu solder joint, Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 237-243.

[38] Baureis, P.; "Compact modeling of electrical, thermal and optical LED behavior," Proceedings of 35th European Solid-State Device Research Conference, 2005, ESSDERC 2005, 12-16 September 2005, pp. 145- 148.

[39] Qin, Y.X.; Hui, S.Y.R.; "Comparative Study on the Structural Designs of LED Devices and Systems Based on the General Photo-ElectroThermal Theory," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, Issue 2, pp. 507-513. February 2010.

[40] Hui, S.Y.; Qin, Y.X.; "A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, Issue 8, pp. 1967 – 1976. August 2009

[41] Ryu, Han-Youl; Ha, Kyoung-Ho; Chae, Jung-Hye; Nam, Ok-Hyun; Park, Yong-Jo; "Measurement of junction temperature in GaN-based laser diodes using voltage-temperature characteristics," in Applied Physics Letters, vol. 86, Issue 9, pp. 093506-1 - 093506-3. August 2005.

[42] Qifeng Shan, Qi Dai, Sameer Chhajed, Jaehee Cho, E. Fred Schubert; "Analysis of thermal properties of GaInN light-emitting diodes and laser diodes," in Journal of Applied Physics, vol. 108, 084504. October 2010.

[43] Shah, J.M.; Li, Y.-L.; Gessmann, T.; Schubert, E.F.; "Experimental analysis and a new model for the high ideality factors in GaN-based diodes,".

[44] Luxeon Rebel IES LM-80 Test Report, Design Resource DR04 (2011). [3] IES LM-80-08 Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources, Illuminating Engineering Society, 2008.

[45] Jeong Park; Lee, C.C.; "An Electrical Model With Junction Temperature for Light-Emitting Diodes and the Impact on Conversion Efficiency," in IEEE Electron Device Letters, vol. 26, Issue 5, pp. 308- 310. May 2005.

[46] Bhattacharya, A.; Lehman, B.; Shteynberg, A.; Rodriguez, H, "A Probabilistic Approach of Designing Driving Circuits for Strings of High-Brightness Light Emitting Diodes", Power Electronics Specialists Conference, 2007, PESC'07, 17-21 June 2007, pp.1429 – 1435.

[47] S. E. De León Aldaco, J. H. Calleja Gjumlich y J. E. Arau Roffiel, «Comparación de metodologías de evaluación de confiabilidad,» Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico, 2011.

[48] J. Jones y J. Hayes, «A comparison of electronic-reliability prediction models,» IEEE transactions on reliability, vol. 48, pp. 127-134, 1999.

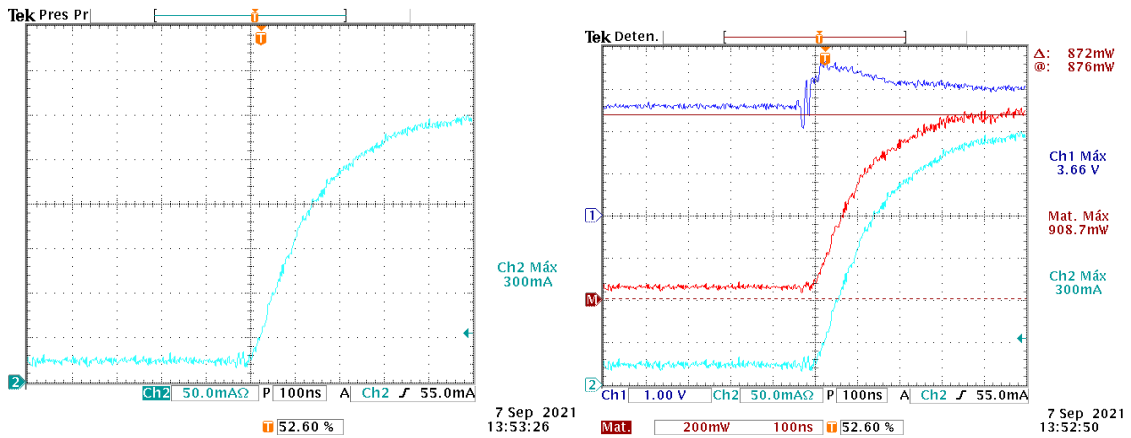
[49] Y. Z. N. T. W. C. Y. H. a. F. S. G. Lin, «Materials challenges and solutions for the packaging of high power LEDs,» 11th International Symposium on Advanced packaging materials: processes and interface, pp. 63-63, 2006.

[50] V. Schwabe, «Understanding LED driver technology,» Lighting solutions, 2014.

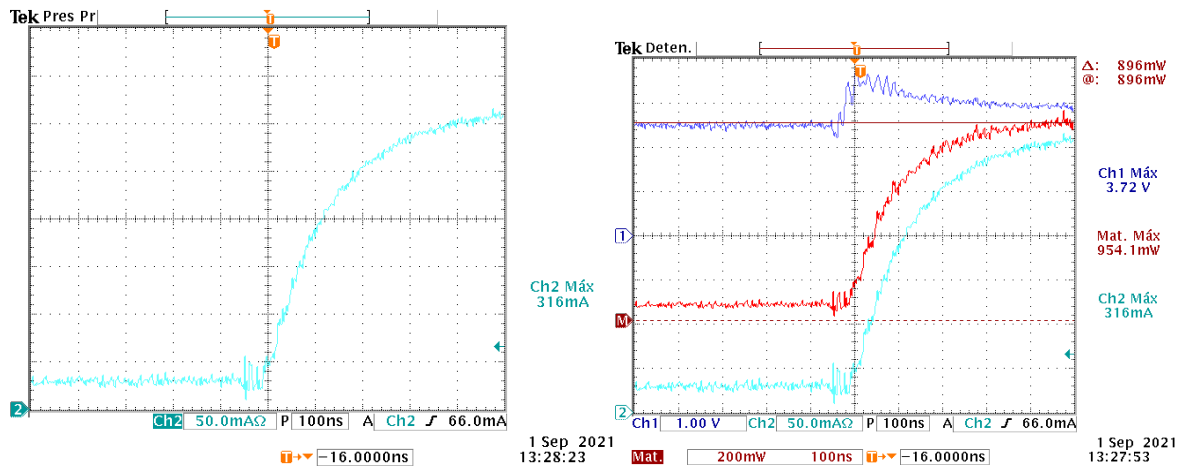
ANEXO A

En este anexo se adjuntan las imágenes obtenidas del osciloscopio de las pruebas impulsionales de cada LED de la potencia mínima a la máxima.

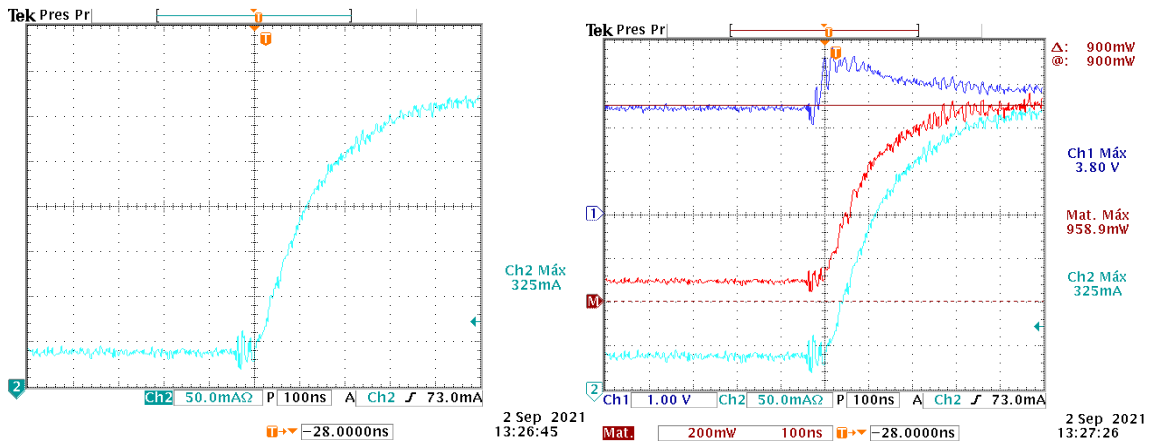
LED alimentado con driver comercial a temperatura de 25°C



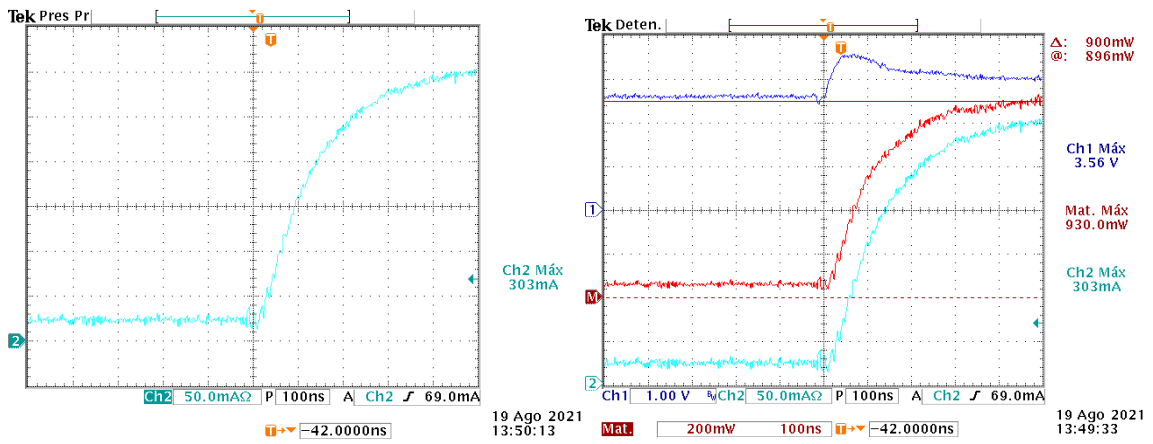
LED alimentado con driver comercial a temperatura de 55°C



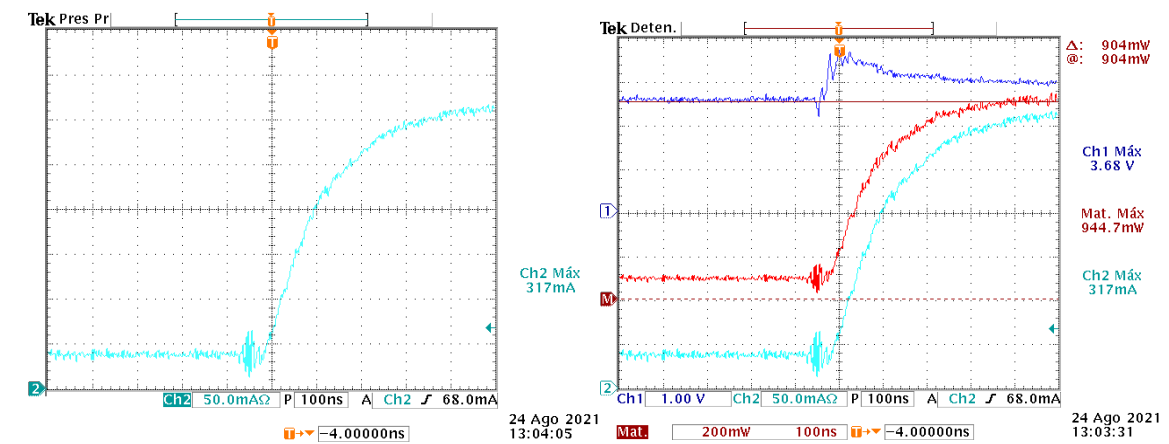
LED alimentado con driver comercial a temperatura de 85°C



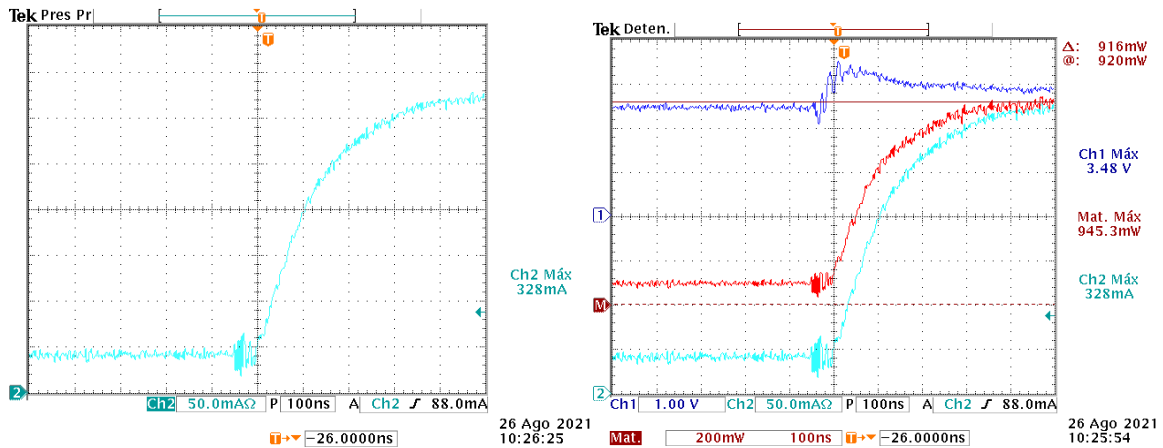
LED alimentado con corriente continua a temperatura de 25°C



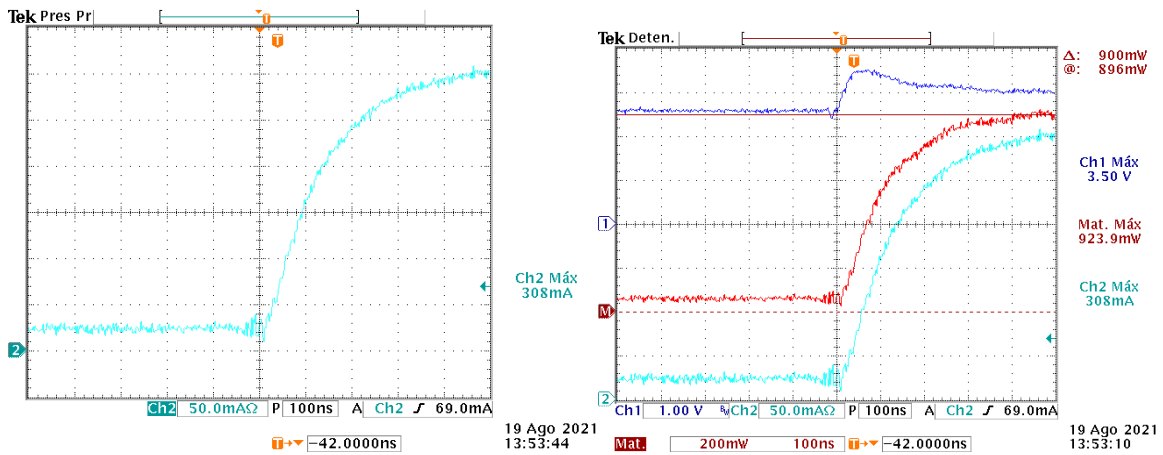
LED alimentado con corriente continua a temperatura de 55°C



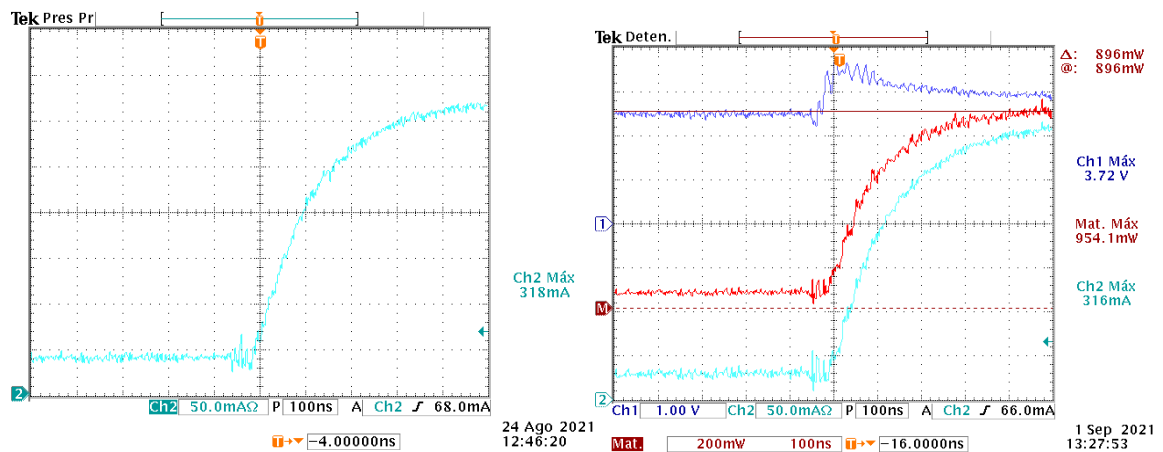
LED alimentado con corriente continua a temperatura de 85°C



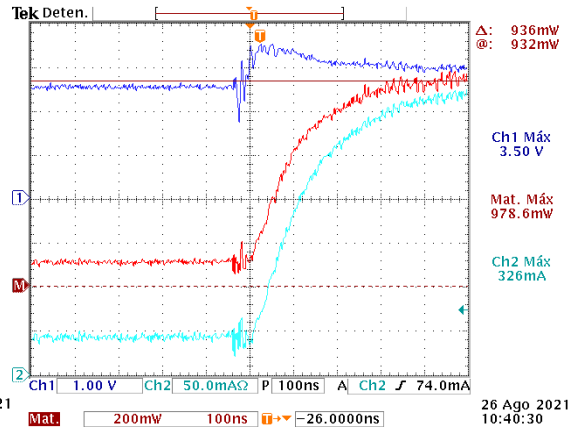
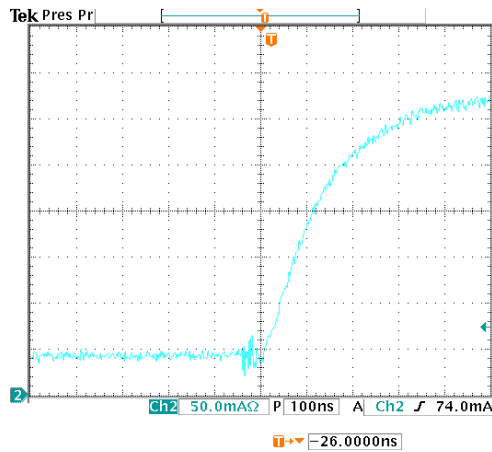
LED alimentado con media onda a temperatura de 25°C



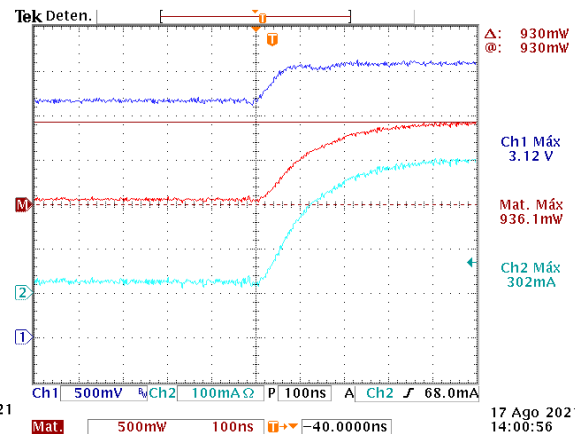
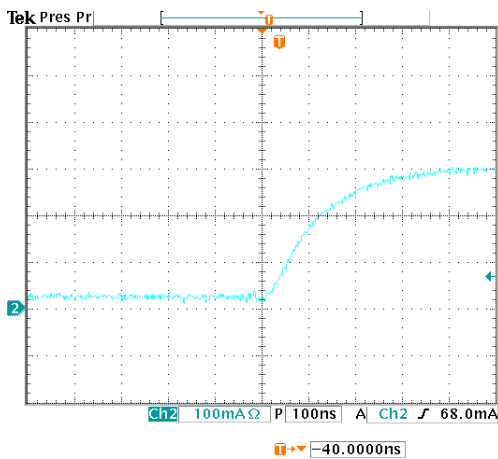
LED alimentado con media onda a temperatura de 55°C



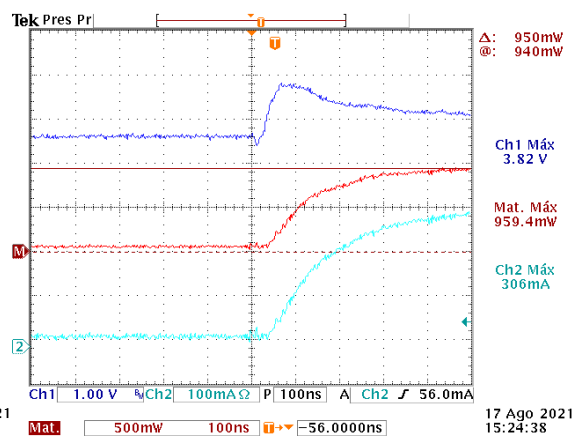
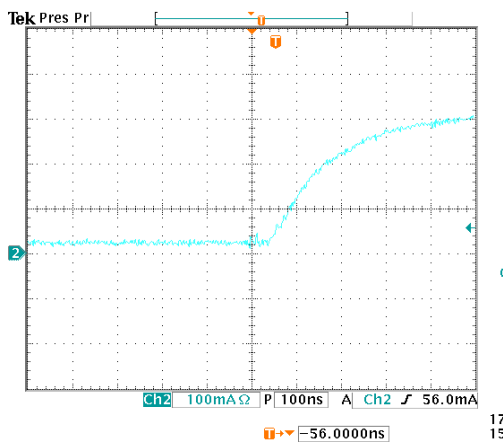
LED alimentado con media onda a temperatura de 85°C



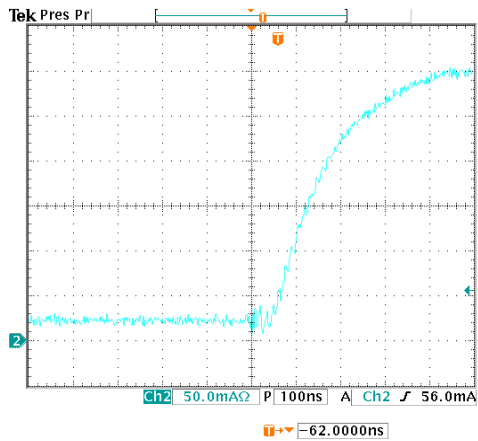
LED nuevo a temperatura de 25°C



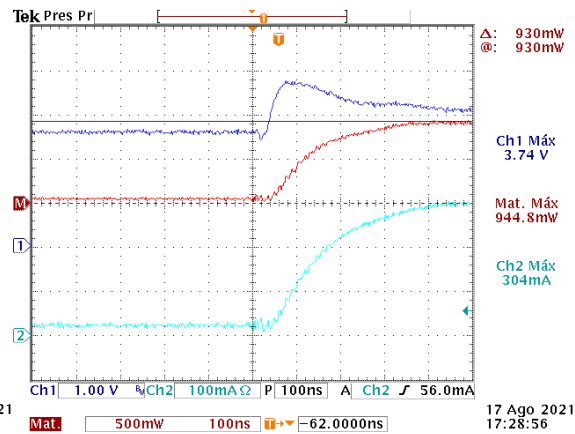
LED nuevo a temperatura de 55°C



LED nuevo a temperatura de 85°C

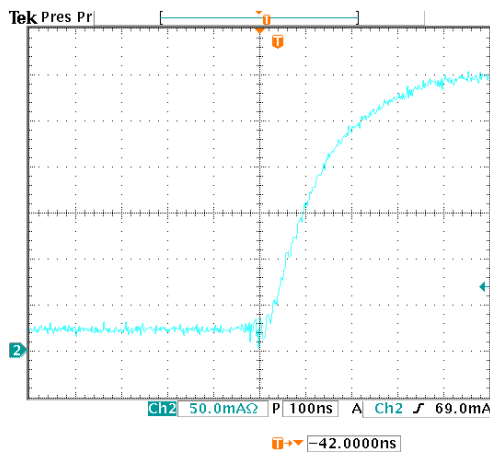


17 Ago 2021
17:29:43

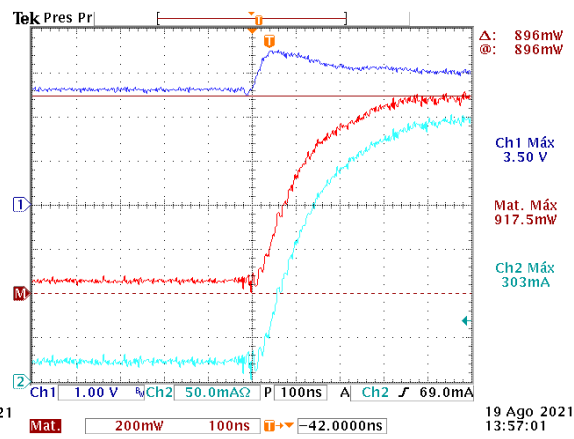


17 Ago 2021
17:28:56

LED alimentado con onda completa a temperatura de 25°C

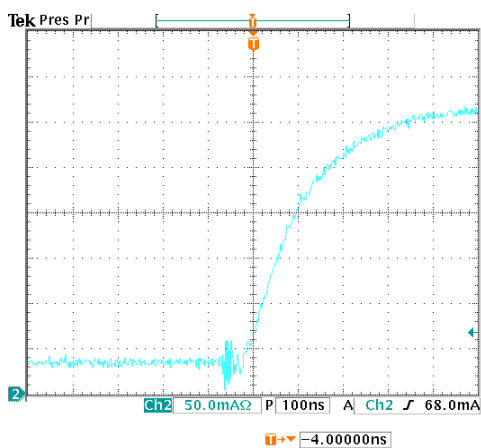


19 Ago 2021
13:57:44

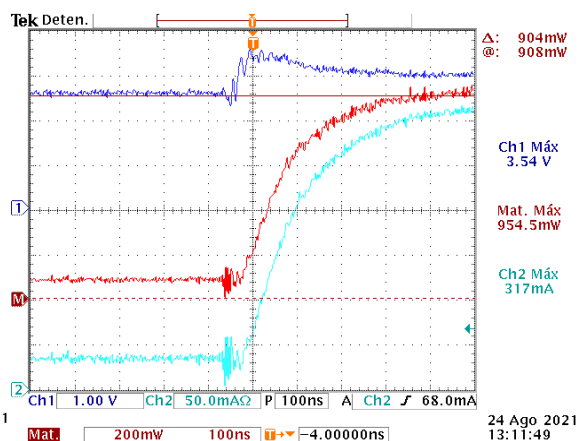


19 Ago 2021
13:57:01

LED alimentado con onda completa a temperatura de 55°C

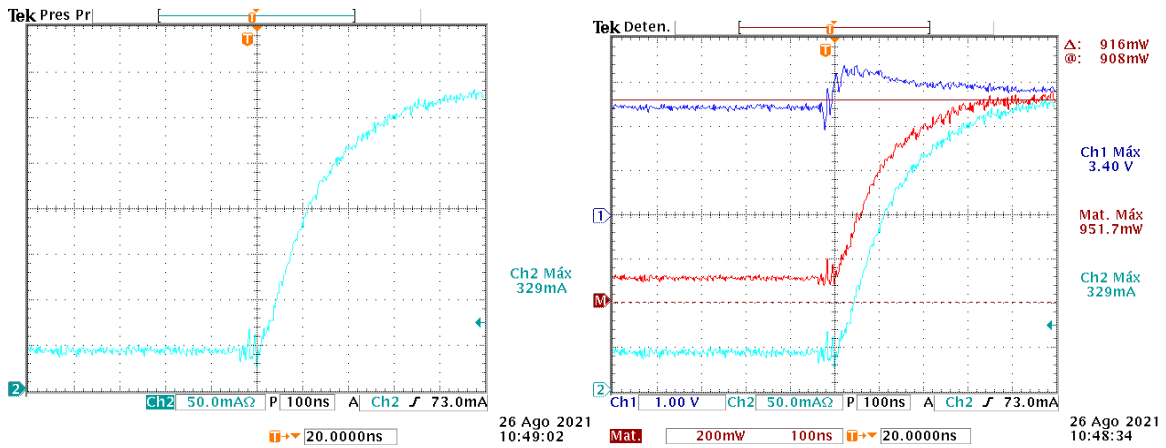


24 Ago 2021
13:12:22

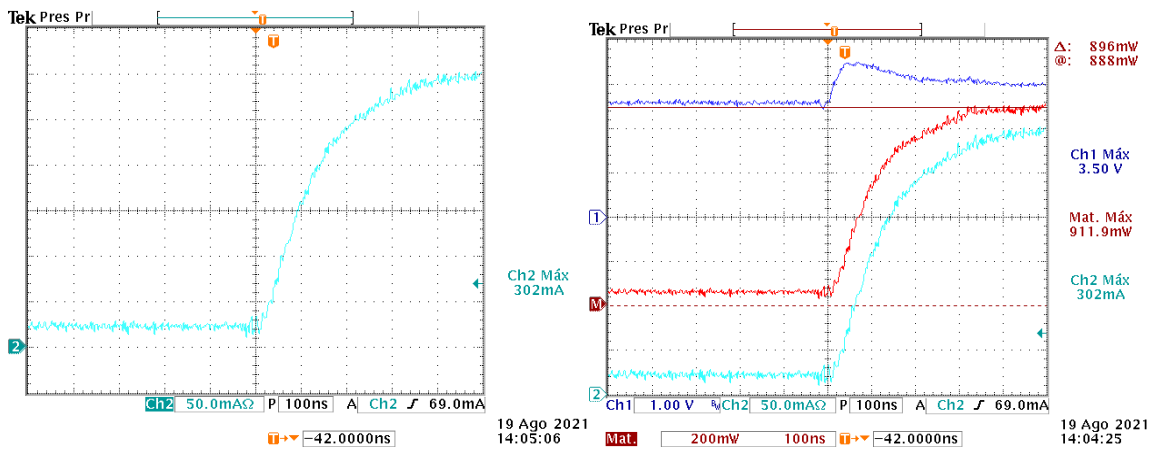


24 Ago 2021
13:11:49

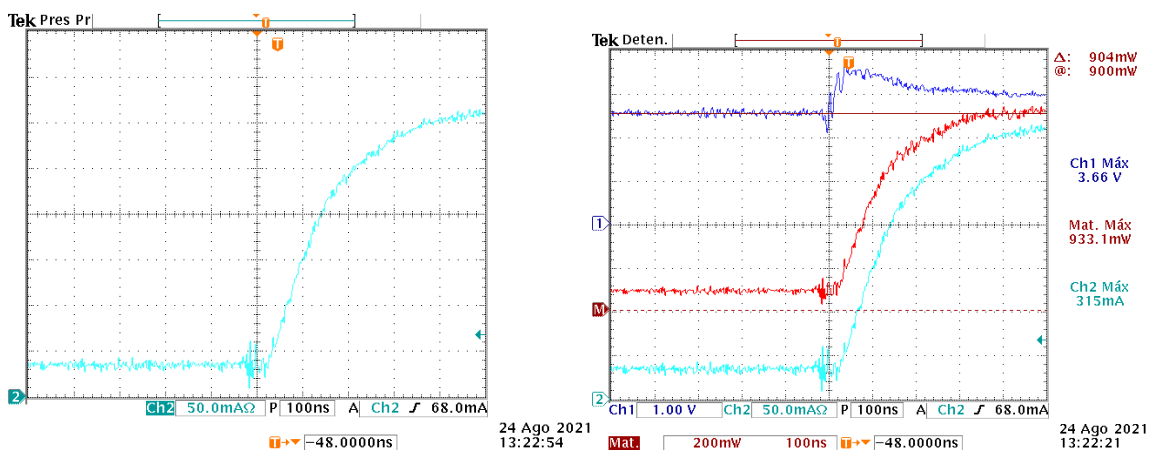
LED alimentado con onda completa a temperatura de 85°C



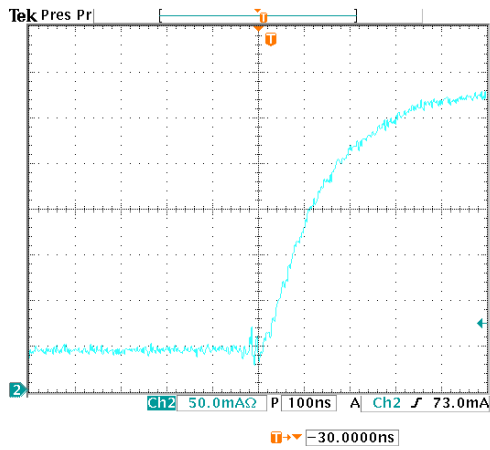
LED alimentado con modulación de ancho de pulso a temperatura de 25°C



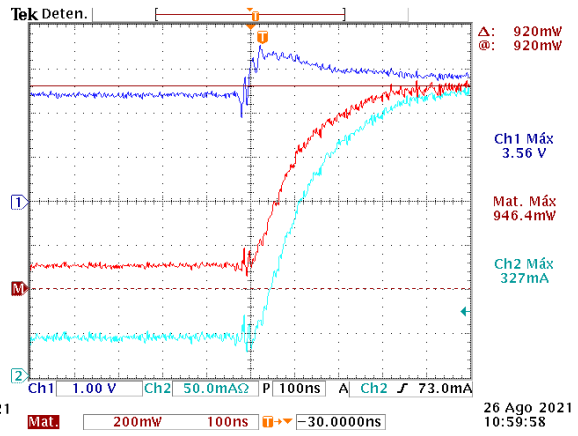
LED alimentado con modulación de ancho de pulso a temperatura de 55°C



LED alimentado con modulación de ancho de pulso a temperatura de 85°C



26 Ago 2021
11:00:38



ANEXO B

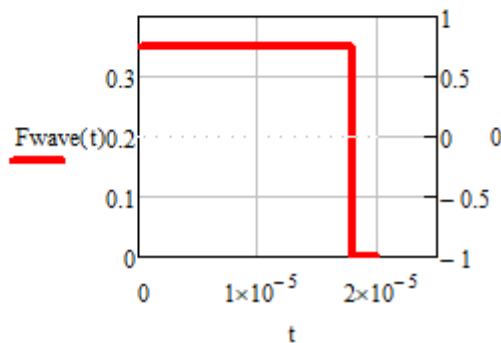
Programa de Mathcad de la serie de Fourier para el LED alimentado por modulación de ancho de pulso.

FFT de corriente para LED alimentado por modulación de ancho de pulso

Onda rectificada

$F_s := 50000$	Frecuencia		
$T_s := F_s^{-1}$	Periodo	$I_{pk} := 0.350$	$\omega := 2 \frac{\pi}{T_s}$
$t := 0, \frac{T_s}{100} .. T_s$	Contador para gráficar	$D := 0.9$	

$$F_{wave}(t) := \begin{cases} I_{pk} & \text{if } 0 < t < T_s \cdot D \\ 0 & \text{if } T_s \cdot D \leq t \leq T_s \end{cases}$$



Calculo de los coeficientes de fourier

Calculo de

a_0

$$a_{cero} := \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} F_{wave}(t) dt \quad a_{cero} = 0.63$$

$$a_0 := \frac{2}{T_s} \left(\int_0^{T_s \cdot D} I_{pk} dt + \int_{T_s \cdot D}^{T_s} 0 dt \right)$$

Calculo de coeficiente

a_n

$$a_0 = 0.63$$

$$a_{ene}(n) := \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} F_{wave}(t) \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot t) dt \quad a_{ene}(2) = -0.053$$

$$a_n(n) := \frac{2}{T_s} \left(\int_0^{T_s \cdot D} I_{pk} \cos(\omega \cdot n \cdot t) dt + \int_{T_s \cdot D}^{T_s} 0 \cos(\omega \cdot n \cdot t) dt \right) \quad a_n(2) = -0.053$$

Calculo del coeficiente de b_n

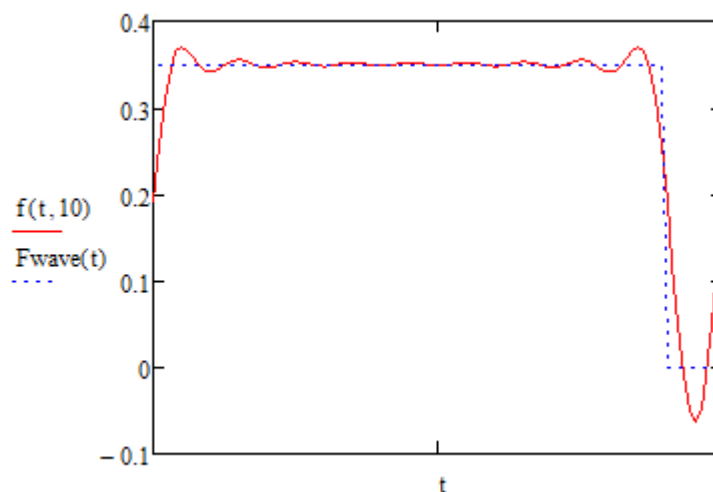
$$b_{ene}(n) := \frac{2}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} F_{wave}(t) \cdot \sin(\omega \cdot n \cdot t) dt \quad b_{ene}(4) = 0.05$$

$$b_n(n) := \frac{2}{T_s} \left(\int_0^{T_s \cdot D} I_{pk} \sin(\omega \cdot n \cdot t) dt + \int_{T_s \cdot D}^{T_s} 0 \sin(\omega \cdot n \cdot t) dt \right) \quad b_n(4) = 0.05$$

Sumatoria de a_0 , a_n y b_n (serie de Fourier)

$$f(t, c) := \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^c (a_n(n) \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot t) + b_n(n) \cdot \sin(\omega \cdot n \cdot t))$$

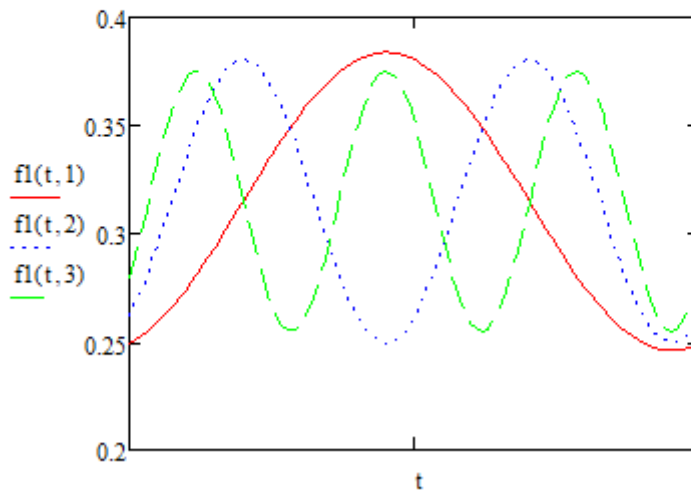
$$f_2(t, c) := \frac{a_{cero}}{2} + \sum_{n=1}^c (a_{ene}(n) \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot t) + b_{ene}(n) \cdot \sin(\omega \cdot n \cdot t))$$



Amplitud de los
armonicos

$$f_1(t, n) := \frac{a_0}{2} + (a_n(n) \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot t) + b_n(n) \cdot \sin(\omega \cdot n \cdot t))$$

$$\frac{a_0}{2} = 0.315$$



Programa de Mathcad de la serie de Fourier para el LED alimentado con corriente continua.

FFT de corriente del LED alimentado con corriente continua

$$a_0 := 0.3232$$

$$a_3 := -0.02341$$

$$a_6 := -0.004359$$

$$a_1 := 0.04983$$

$$b_3 := 0.04396$$

$$b_6 := -0.002041$$

$$b_1 := -0.4557$$

$$a_4 := -0.03317$$

$$a_7 := -0.01298$$

$$a_2 := -0.242$$

$$b_4 := -0.01054$$

$$b_7 := 0.005544$$

$$b_2 := -0.05721$$

$$a_5 := -0.01525$$

$$a_8 := -0.005075$$

$$b_5 := 0.02202$$

$$b_8 := 0.007492$$

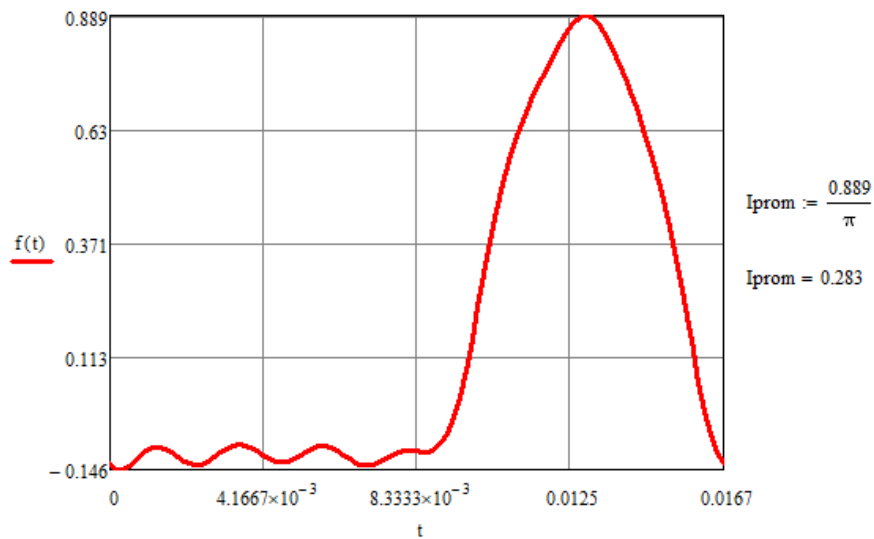
$$Fr := 60$$

$$Tr := \frac{1}{Fr}$$

$$t := 0, \frac{Tr}{100} .. Tr$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot Fr$$

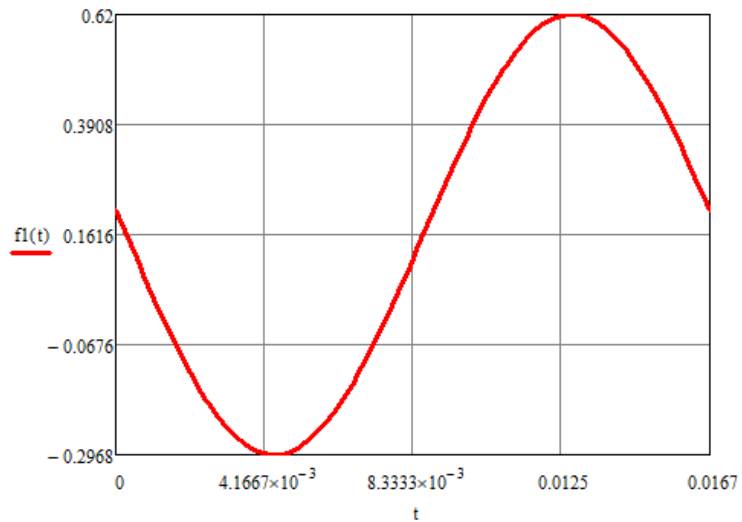
Sumatoria de a_0 , a_n y b_n



Armonico de mayor amplitud y DC

$$f_1(t) := \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) + b_1 \cdot \sin(\omega \cdot t))$$

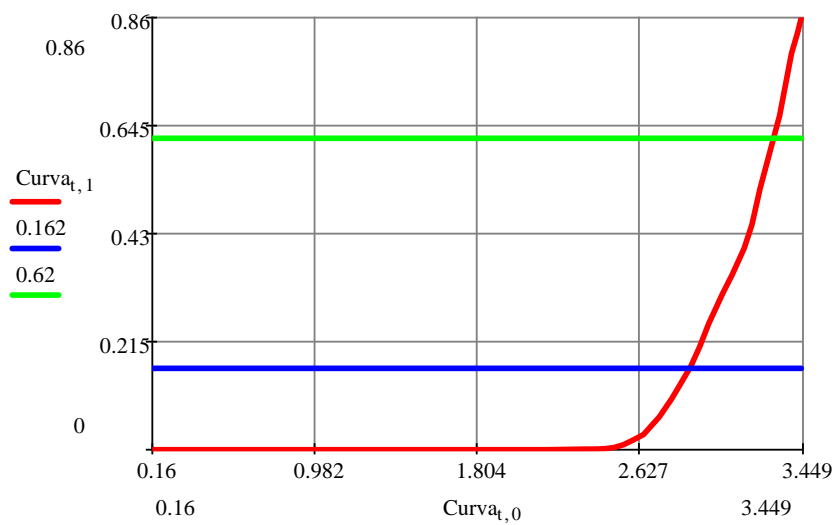
$$\frac{a_0}{2} = 0.162$$



Curva :=

	0	1
0	0.16	0
1	0.319	...

$$t := 0..last(Curva\langle 0 \rangle)$$



Cálculo de la resistencia dinámica

$$R_d := \frac{3.3 - 2.45}{0.62 - 0} \quad R_d = 1.371$$

Programa de Mathcad de la serie de Fourier para el LED alimentado con driver comercial.

FFT de corriente del LED alimentado con driver

$$a_0 := 0.428$$

$$a_3 := -0.0002789$$

$$a_6 := 0.0002411$$

$$a_1 := -2.173e-05$$

$$b_3 := 0.0002653$$

$$b_6 := -0.0006516$$

$$b_1 := -0.0001063$$

$$a_4 := -5.271e-05$$

$$a_7 := -0.0001142$$

$$b_4 := 0.0003592$$

$$b_7 := 0.0002467$$

$$a_2 := -0.003341$$

$$a_5 := 2.124e-05$$

$$a_8 := -0.0003177$$

$$b_2 := 6.63e-05$$

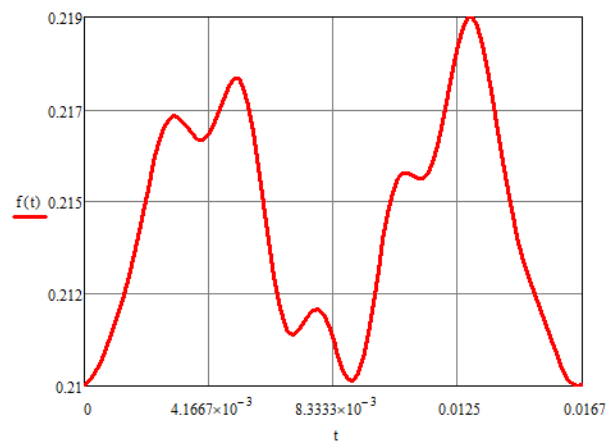
$$b_5 := -0.0001572$$

$$b_8 := 0.00019$$

$$Fr := 60$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot Fr$$

Sumatoria de a_0 , a_n y b_n $Tr := \frac{1}{Fr}$ $t := 0, \frac{Tr}{100} .. Tr$



Armonico de mayor amplitud y DC

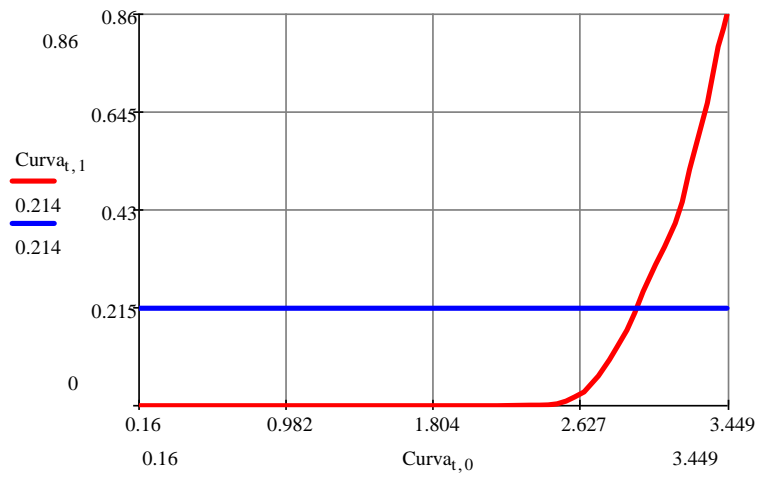
$$f_1(t) := \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) + b_1 \cdot \sin(\omega \cdot t))$$

$$\frac{a_0}{2} = 0.214$$

Curva :=

	0	1
0	0.16	0
1	0.319	...

$$t := 0 .. \text{last}(\text{Curva})^{(0)}$$



$$Rd := \frac{3.3 - 2.45}{0.214 - 0}$$

$$Rd = 3.972$$