



Estudio del desempeño, calidad y costo de fuentes de iluminación LED



Como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Optomecatrónica

Asesor:

Dr. Haggeo Desirena Enrriquez

Presenta:

Ing. Ismael Martínez de la Cruz

Julio de 2017

León, Guanajuato, México

*A mi Mamá,
a mis hermanos,
a mi esposa.*

Agradecimientos

Primero gracias a ti DIOS, por que junto con mis padres me dieron la vida. Gracias por darme un nicho familiar que a pesar de no merecer te lo agradezco profundamente, gracias por permitirme continuar con este hermoso regalo al que llamamos vida.

Gracias a ti mami, ya que a pesar de todo, nunca te has dado por vencida, gracias por tanto amor, por tantos cuidados, por tu motivación, por predicar con el ejemplo, gracias por extenderme la mano cuando caigo, Te Amo Mami, MIL GRACIAS.

Gracias Rosalina, Isabel, Lorena, Guillermo y Esperanza, que no sólo son mis hermanos, son mis amigos, mis compañeros, mi pilar para no caer. Gracias por su apoyo, por no dejarme sólo, por motivarme para continuar creciendo personal y profesionalmente. Gracias porque sé que siempre estarán allí, gracias por confiar en mí, los quiero mucho.

Gracias a ti, mi hermosa esposa. Gracias por tu amor, por tu apoyo, por tu comprensión, por tus cuidados, por ser mi inspiración y por no dejarme caer. Gracias por ser mi complemento, Te Amo.

Gracias Dr. Haggeo, por permitirme ser parte de ese gran equipo de trabajo, gracias por confiar en mí. Gracias por su apoyo, por su motivación, por transmitirme tanto conocimiento. Muchas gracias. Gracias también Dr. Iván Moreno, por compartir una nueva filosofía, por compartir sus ideas, por dar otro enfoque, por apoyarme y motivarme en esta etapa. Y gracias M. Juan Manuel por apoyarme para desarrollar las tesis desde la unidad Aguascalientes y por facilitarme el uso del equipo para la caracterización de las muestras.

Gracias compañeros, por tantos momentos que pasamos, por esos ratos de estrés y de desestres. Gracias por permitirme aprender mucho de ustedes. Gracias a todos los Investigadores y Docentes que conocí en el transcurso de esta formación. Gracias por su amistad, conocimiento y apoyo.

Por último pero no menos importante, quiero agradecer al Centro de Investigaciones en Óptica y al CONACYT, por darme la oportunidad de superarme personal y profesionalmente en tan grande centro de investigación.

Resumen

La iluminación en estado sólido basada en LEDs (SSL), es una de las tecnologías de iluminación que se ha venido desarrollando con el fin de satisfacer la necesidad de iluminación artificial. Las principales ventajas que contempla este tipo de iluminación comparado con las lámparas incandescentes y fluorescentes son: ahorro energético, amigables con el medio ambiente, mayor vida útil, eficiencia y desempeño.

Se encuentran en dispositivos de tamaño reducido, gracias a esto se innovan cada vez más nuevos dispositivos de iluminación de estado sólido, es así como encontramos una gran variedad de éstos en el mercado, que se puede agrupar por su: Temperatura de Color Correlacionada (CCT), Índice de Reproducción de Color (CRI), Flujo Luminoso, Consumo de Potencia Eléctrica, Potencia Óptica Radiante, etc.

Los dispositivos de SSL se pueden componer de: LEDs de potencia, LEDs de montaje superficial, entre otros. Entonces resulta importante plantearse las siguientes preguntas: ¿Cómo elegir una fuente de iluminación LED?, ¿Cuáles son los parámetros a considerar antes de la elección de dicha fuente? e incluso ¿Cuáles son las principales características que se deben de contemplar antes de desarrollar una fuente de iluminación LED?

Conforme a esta problemática el propósito de este trabajo es el realizar un estudio sobre las fuentes de iluminación basadas en LEDs, partiendo de los diodos emisores de luz encontrados en el mercado, para así contestar las cuestiones ya mencionadas.

Índice general

Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Introducción.	1
Referencias.....	11
CARACTERÍSTICAS OPTICAS DE DESEMPEÑO	13
Color [1].....	13
Sensibilidad del ojo humano [3].....	13
Flujo Radiante y Luminoso [4].....	16
Temperatura de Color Correlacionada (CCT) [4].....	18
Índice de Reproducción de color (CRI) [4].....	19
Eficacia luminosa de LEDs [5].....	21
Eficiencia en fuentes de Iluminación de Estado Sólido (LEDs) [6].....	22
“Flicker” en fuentes de Iluminación [4].	23
Consecuencias de uso de luz artificial [17].....	29
Referencias.....	32
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y NORMATIVIDAD	34
Factor de Potencia [1].....	34
Ventajas de un buen factor de potencia [2].	39
Regulaciones y/o recomendaciones para el uso y exposición a fuentes de iluminación LED [3,4,5].	41
Referencias.....	56
ESTUDIO COMPARATIVO	58
Estudio de Pinturas Blancas.....	64
Estudio de disipadores de calor	66
Estudio comparativo teórico de desempeño.....	78
Estudio de desempeño experimental.....	82
Estudio de factor de potencia de diferentes configuraciones de lámparas.....	107
Estudio de controladores de LEDs.....	112
Parpadeo en Fuentes de Iluminación	119
Diseño y evaluación de prototipos.....	130

Construcción de prototipos.....	130
Referencias.....	143
CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	145
ANEXOS.....	A

Índice de Figuras

Figura 1. Generación de luz blanca con LEDs. (a) Muestra de forma visual la colorimetría de la adición de luz de colores. (b) Se muestran las combinaciones de espectros de luz LED que forman luz blanca.....	4
Figura 2. 200 años de evolución de diferentes tecnologías de iluminación [13].	4
Figura 3. Espectros de emisión de luz blanca	5
Figura 4. Máximo flujo luminoso de las principales fuentes de Iluminación [11].	6
Figura 5. Recuento de patentes de Nichia y Osram en componentes LED [15].	7
Figura 6. Recuento de patentes de Nichia y Osram en tecnología de fósforos.....	7
Figura 1.1. Espectro electromagnético [2].	13
Figura 1.2. a) Sección transversal de ojo humano. b) Diagrama de la retina incluyendo los receptores de luz conos y bastones.	14
Figura 1.3. Rangos aproximados de régimen de visión y de receptor.....	15
Figura 1.4. Espectros normalizados de sensibilidad de receptores del ojo humano.	16
Figura 1.5. Flujo luminoso y radiante.	17
Figura 1.6. Función de sensibilidad del ojo (ordenada izquierda) y eficacia luminosa (ordenada derecha) [3].	17
Figura 1.7. a) Curva de cuerpo negro, b) Temperatura de color de fuentes de iluminación.....	19
Figura 1.8. Espectro de radiación de Iluminantes Estándar.....	20
Figura 1.9. Espectro de radiación de Iluminante A.	20
Figura 1. 10. Esfera integradora.....	21
Figura 1.11. Profundidad de riesgo por flicker.	27
Figura 2.1. Representación de la potencia para carga puramente resistiva.....	35
Figura 2.2. Representación de la potencia con retraso de corriente respecto a voltaje por el ángulo de fase.....	36
Figura 2.3. Triángulo de potencias.....	38
Figura 2.4. Representación de valores de factor de potencia.....	39
Figura 3.1. Lámpara Smartlight 7 W.....	59
Figura 3. 2.Eschema de cada LED en la Fig. 3.1. Las dimensiones son en mm [2].....	60
Figura 3.3. Lámpara Sanalec 9 W.	60
Figura 3.4. Esquema de cada LED SMD 5730 en la Fig. 3.3. Las dimensiones son en	61

Figura 3.5. Lámpara Neolux 9 W	61
Figura 3.6. LED SMD de lámpara Neolux, con doble chip.....	62
Figura 3.7. Dimensiones (mm) LED 2835 Neolux.....	62
Figura 3.8. Lámpara Philips 9 W, de luz blanca no fría.....	63
Figura 3.9. (a) Barras de acrílico de prueba. (b) Barras de acrílico pintadas de blanco mate de tres distintos tipos. (c) Pinturas de prueba.....	65
Figura 3.10. Medición de reflectancia espectral de las tres pinturas blanco mate de prueba.	65
Figura 3.11. Disipador de calor de lámpara Smartlight de 7 W.....	67
Figura 3.12. (a) Lámpara Sanelec de 9 W. (b) Ventilación. (c) Disipador de calor.....	67
Figura 3.13. a). Lámpara Neolux de 9 W. b)-c). Disipador de calor.....	68
Figura 3.14. (a) Lámpara Philips de 9W. (b) Disipador cubierta. (c)-(d) Imagen lateral y superior de disipador.....	69
Figura 3.15. Dispositivo de monitoreo de temperatura.....	71
Figura 3.16. Espectros de emisión de LED, a diferentes temperaturas.....	74
Figura 3.17. Imagen térmica de lámpara LED de 10W en operación.....	75
Figura 3.18. (a) Lámpara LED 3 W. (b) Lámpara LED 5 W. (c) Lámpara LED 8 W. (d) Lámpara LED 9 W.....	75
Figura 3.19. (a) Lámpara Incandescente. (b) Lámpara Fluorescente. (c) Lámpara LED.	76
Figura 3.20. (a) Disipador sin anodizado. (b) Disipador con anodizado.	77
Figura 3.21. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs Digikey.....	80
Figura 3.22. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs Digikey (acercamiento).....	80
Figura 3.23. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs flujo luminoso total (lm) de LEDs del distribuidor Digikey.	82
Figura 3.24. Índice de Reproducción de Color versus Temperatura de Color Correlacionada, de LEDs adquiridos.....	88
Figura 3.25. Espectros de emisión con CRI de 88.64 y 70.25 con CCT de 20000 °K.....	89
Figura 3.26. Espectro de emisión YAG:Ce [7].	90
Figura 3.27. Costo USD versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.	91
Figura 3.28. Flujo luminoso (lm) versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.	91
Figura 3.29. (a) LED temperatura fría. (b) LED temperatura cálida.	92
Figura 3.30. Espectros de emisión LED “frío” versus LED “cálido” (SMD 5730).	93
Figura 3.31. Eficacia luminosa (lm/W) versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.....	94
Figura 3. 32. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs caracterizados.....	95
Figura 3. 33. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs caracterizados.....	96
Figura 3.34. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs flujo luminoso total (lm) de LEDs caracterizados.....	97
Figura 3.35. Cantidad de LEDs versus flujo luminoso para alcanzar 613.9 lm.	99
Figura 3.36. Costo versus Eficacia luminosa, para un flujo de 613.9 lm.....	100
Figura 3.37. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs flujo luminoso (lm), para 613.9 lm.....	101

Figura 3.38. Curvas de desempeño eléctrico lámpara incandescente.....	107
Figura 3.39. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED Foxanon.....	109
Figura 3.40. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED Philips.....	110
Figura 3.41. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED High Power.....	111
Figura 3.42. Driver lámpara LED Smartlight 7 W.....	114
Figura 3.43. Driver lámpara LED Sanalec 9 W.....	114
Figura 3.44. Driver lámpara LED Foxanon 3 W.....	115
Figura 3.45. Driver lámpara LED Osram 9 W.....	116
Figura 3.46. Driver lámpara LED Philips 9 W.....	116
Figura 3.47. Driver lámpara LED High Power de 4W.....	117
Figura 3.48. Diagrama electrónico de driver con .3 de f.p.....	118
Figura 3.49. Imágenes de parpadeo lámpara incandescente Osram.....	120
Figura 3.50. Atenuación de lámpara incandescente debida al parpadeo.....	121
Figura 3.51. Profundidad de riesgo por parpadeo, lámpara incandescente.....	122
Figura 3.52. Imágenes de parpadeo lámpara fluorescente Osram.....	123
Figura 3.53. Atenuación de lámpara fluorescente debida al parpadeo.....	124
Figura 3.54. Profundidad de riesgo por parpadeo, fluorescente Osram.....	125
Figura 3.55. Imágenes de parpadeo lámpara LED Osram.....	125
Figura 3.56. Atenuación de lámpara LED debida al parpadeo.....	126
Figura 3.57. Profundidad de riesgo por parpadeo, LED Osram.....	127
Figura 3.58. Imágenes de parpadeo lámpara halógena Osram.....	127
Figura 3.59. Atenuación de lámpara halógena debida al parpadeo.....	128
Figura 3.60. Profundidad de riesgo por parpadeo, lámpara halógena.....	129
Figura 3.61. Atenuación de lámparas debidas a parpadeo.....	129
Figura 3.62. Diagrama básico de conexión de LEDs a CA.....	131
Figura 3.63. Arreglo de LEDs 5mm. a) LEDs en PCB. b) LEDs en funcionamiento. c) LEDs con difusor.	132
Figura 3.64. Arreglo de LEDs SMD 5730. a) LEDs en PCB. b) LEDs en funcionamiento. c) LEDs con difusor.....	133
Figura 3.65. Espectros de emisión de LED SMD 5730 versus Arreglo de LEDs.....	134
Figura 3.66. Arreglo de LEDs SMD 5730 con LEDs 5mm.....	136
Figura 3.67. Parpadeo de Arreglo de LEDs (5mm) con variación de capacitancia.....	136
Figura 3.68. Parpadeo de arreglo de LEDs (SMD 5730) con variación de capacitancia.....	138
Figura 3.69. Parpadeo de arreglo de LEDs (5 mm - SMD 5730) con variación de capacitancia.....	139
Figura 3.70. Parpadeo lámpara Foxanon con .5 de F.p.....	140

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Unidades de conversión (flujo radiante - flujo luminoso).....	18
Tabla 2.1. Bonificaciones y/o penalizaciones por factor de potencia [2].	41
Tabla 2.2. Dispositivos de iluminación LED [3].	42
Tabla 2.3. Principales regulaciones obligatorias de iluminación LED [3].	44
Tabla 2.4. Principales regulaciones no obligatorias entorno a iluminación LED [3].	45
Tabla 2.5. Eficacia luminosa mínima para lámpara LED omnidireccional, según NOM-030-ENER-2012.	47
Tabla 2.6. Tolerancia de CCT.....	48
Tabla 2.7. Flujo luminoso total mínimo mantenido.	48
Tabla 2.8. Requerimientos de la regulación Energy Star (U.S.A.) potencia vs eficacia.	49
Tabla 2.9. Requerimientos Energy Star para valores nominales de la CCT.....	50
Tabla 2.10. Requerimientos Energy Star sobre el CRI.	50
Tabla 2.11. Requerimientos Energy Star sobre cromaticidad.	50
Tabla 2.12. Requerimientos Energy Star flujo luminoso vs vida útil.....	51
Tabla 2.13. Requerimientos Energy Star F.P.	51
Tabla 2.14. Requerimientos Energy Star sobre frecuencia de luz de salida.	52
Tabla 2.15. Requerimientos Energy Star tiempo de estabilización.....	52
Tabla 3.1. Características de disipación.....	70
Tabla 3.2. Características de LED a diferentes temperaturas.....	72
Tabla 3.3. Conductividad Térmica de YAG:Ce [7].....	73
Tabla 3.4. Comparación de desempeño de disipación térmica de un disipador con y sin anodizado.	78
Tabla 3.5. Características de desempeño de LEDs.....	84
Tabla 3.6. Características calculadas de LEDs.....	87
Tabla 3.7. LED “frío” versus LED “cálido”	92
Tabla 3.8. Comparativa de arreglos para lograr un flujo de 800 lm.....	103
Tabla 3.9. LED SMD 5730 vs LED LG SDM 7030 para lograr un flujo de 800lm.	104
Tabla 3.10. Tarifa de energía eléctrica CFE (MXN).....	104
Tabla 3.11. Costo de operación (MXN) LED SMD 5730 vs LED LG 7030.	105
Tabla 3.12. Ahorro de energía eléctrica lámparas Osram.....	106
Tabla 3.13. Características de desempeño eléctrico lámpara incandescente.	108
Tabla 3.14. Características de desempeño eléctrico lámpara LED Foxanon.....	109
Tabla 3.15. Características de desempeño eléctrico lámpara LED Philips.....	111
Tabla 3.16. Características de desempeño eléctrico lámpara LED High Power.	112
Tabla 3.17. Características de desempeño del arreglo de LEDs SMD 5730.	134
Tabla 3.18. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED 5mm.....	137
Tabla 3.19. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED SMD.....	138

Tabla 3.20. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED 5mm -LED SMD.	139
Tabla 3.21. Costos de arreglos.....	141

Introducción.

El ser humano en gran medida depende de la luz para el desarrollo de sus actividades, en el transcurso de la noche o en ambientes con poca iluminación. El uso de luz artificial le ha brindado la oportunidad de realizar dichas actividades. La primera fuente de iluminación artificial fue el fuego, pero las necesidades del hombre lo llevaron a mejorar esta forma de iluminación artificial. Las fuentes de iluminación evolucionaron para dar paso a la vela y a las lámparas de combustión, estas últimas utilizaron combustibles como petróleo, aceite, queroseno, alcohol, etcétera [1].

Un tipo de vela fue desarrollada alrededor de los 1800, era la vela espermaceti la cual dio origen a la candela (cd), que fue la primera unidad de medida estándar de la intensidad luminosa. La candela era la luz producida por una vela espermaceti, que era una vela de aceite de ballena que pesaba una sexta parte de libra y que se quemaba a razón de 120gr por hora [2,3].

Posteriormente la llegada de electricidad trajo consigo el gran paso en iluminación artificial, ya que se pudieron desarrollar lámparas incandescentes que durante más de 120 años han iluminado nuestro entorno [4]. Iluminando sobre todo durante las noches, proporcionando luz artificial en calles, fábricas, comercios, hospitales, oficinas y en una infinidad de sitios más, incluyendo nuestros hogares. Para cubrir la demanda de iluminación cada vez mayor, se continúan desarrollando e innovando nuevas alternativas y sistemas de iluminación.

Las lámparas incandescentes suelen contener un filamento metálico sellado dentro de un tubo de vidrio y utilizan electricidad para calentar el metal hasta que ilumina. La iluminación eléctrica por lámpara incandescente se le considera la menos eficiente [5]. Aunque ineficientes, éste tipo de fuentes poseen una serie de ventajas clave:

- Bajo costo de compra
- No presentan retardo de encendido
- Disponibilidad de variedad de tamaños y formas

- Proporcionan una luz agradable y cálida con excelente reproducción de colores.

Sin embargo, debido a su relativa ineficiencia y corta duración se desarrollaron nuevas tecnologías de iluminación, principalmente las lámparas fluorescentes compactas (CFL) y los diodos emisores de luz (LED) [6].

La lámpara fluorescente estándar fue desarrollada para uso comercial durante la década de 1930 [7]. Los tipos de lámparas fluorescentes principalmente son: Lámparas fluorescentes compactas (CFL) y Tubos fluorescentes. Las lámparas fluorescentes compactas (CFL) sólo utilizan entre el 25% y el 35% de la energía utilizada por los productos incandescentes para proporcionar una cantidad similar de luz, además duran unas 10 veces más (7.000-24.000 horas) [8].

Si en la República Mexicana se sustituyeran 40 millones de lámparas incandescentes por fluorescentes (CFLs) se obtendría un ahorro de energético anual de 2,396 gigawatts/hora, un ahorro en demanda de 398 megawatts, representando 2,721 millones de pesos anuales en ahorro en el gasto familiar y se evitaría la emisión a la atmósfera de 1,165,533 toneladas de bióxido de carbono en un año [9].

Por consiguiente si las lámparas fluorescentes compactas (CFL) consumen menos electricidad que las incandescentes tradicionales, éstas pueden pagar por sí mismas su costo en menos de nueve meses [8], y a partir de ahí tener un ahorro considerable. No obstante una peculiaridad nociva para este tipo de iluminación es que; las bombillas fluorescentes contienen una pequeña cantidad de mercurio así como también emiten radiación UV [4].

El contenido de mercurio de las CFLs y la necesidad de mayores eficiencias energéticas hizo continuar con el desarrollo de nuevas tecnologías de iluminación. El más reciente paso se dio con la tecnología LED, que se empezó a desarrollar alrededor de 1962 con la invención del primer LED, siendo éste de color rojo [10]. Sin embargo aún faltaba para poder utilizar esta tecnología en iluminación, ya que los primeros LEDs emitían muy

poca luz y sólo se utilizaban como señalizadores. Fue hasta que Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura desarrollaron una nueva fuente de luz energéticamente eficiente y amigable con el medio ambiente, el diodo emisor de luz azul de alta brillantez [11]. Con la llegada del LED azul empezó la carrera por la iluminación de estado sólido, ya que con este LED la luz blanca se puede crear de una nueva forma, y es utilizando dispositivos de estado sólido.

La forma de obtener luz blanca a partir de dispositivos de estado sólido se obtiene mediante diferentes métodos como lo son:

- Por medio de la combinación de los tres colores primarios, LED Rojo + LED Verde + LED Azul.
- Por la combinación de LED Azul + LED Amarillo (bajo ciertas proporciones la suma puede producir color blanco).
- La forma más usada en la actualidad es utilizar un chip Azul + fósforo amarillo, el cual absorbe una parte de la luz azul y emite cierta cantidad de luz amarilla. La combinación de luz azul con luz amarilla da como resultado luz blanca, éste método es el más utilizado y se le conoce como PC proveniente del acrónimo Phosphor Conversion (Conversión de Fósforo) [12].
- Otro método es mediante la utilización de un LED UV que excita un fósforo rojo, uno verde y uno azul y la combinación de estos origina luz blanca.

En la Figura 1, se observa los diferentes espectros de emisión para la generación de luz blanca por medio de LEDs, así mismo se muestra los 3 colores primarios y la combinación de los mismos

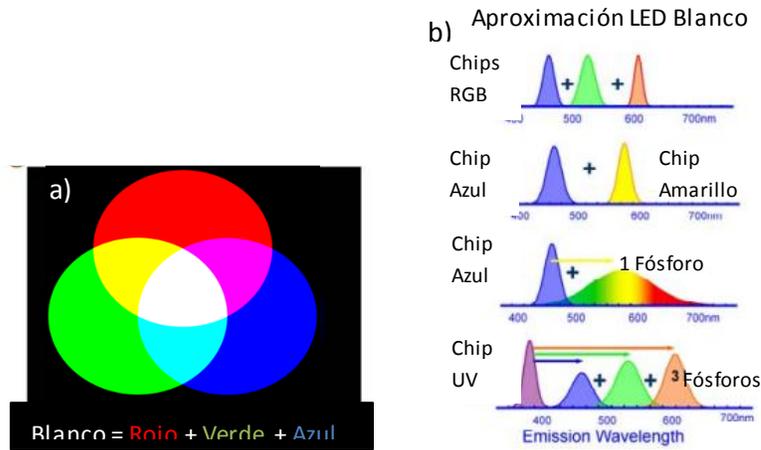


Figura 1. Generación de luz blanca con LEDs. (a) Muestra de forma visual la colorimetría de la adición de luz de colores. (b) Se muestran las combinaciones de espectros de luz LED que forman luz blanca.

La iluminación de estado sólido es la última tecnología de fuentes de luz, la cuales se han desarrollado cada vez más para satisfacer las necesidades del hombre. En la Figura 2 se observa la evolución en iluminación y una curva de predicción para la Iluminación de estado sólido.

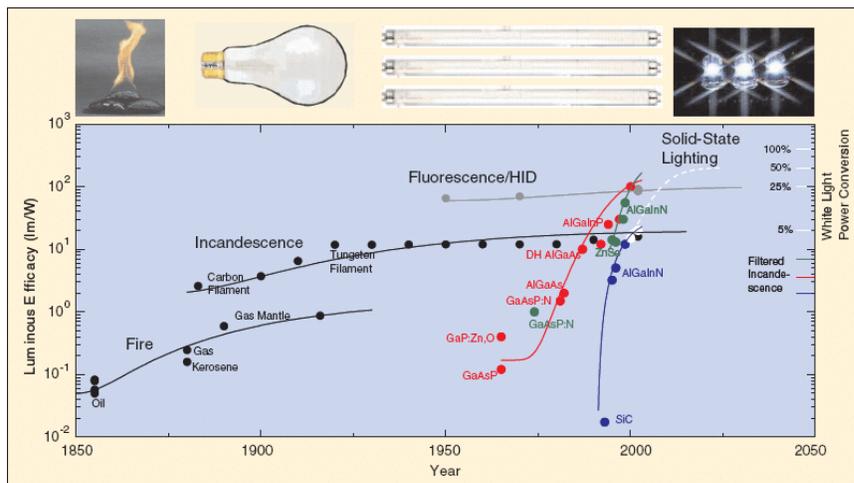


Figura 2. 200 años de evolución de diferentes tecnologías de iluminación [13].

Conforme a las diferentes fuentes de iluminación se obtienen diferentes espectros de emisión. En la Figura 3 se observan los espectros de emisión de diferentes lámparas para la generación de luz blanca.

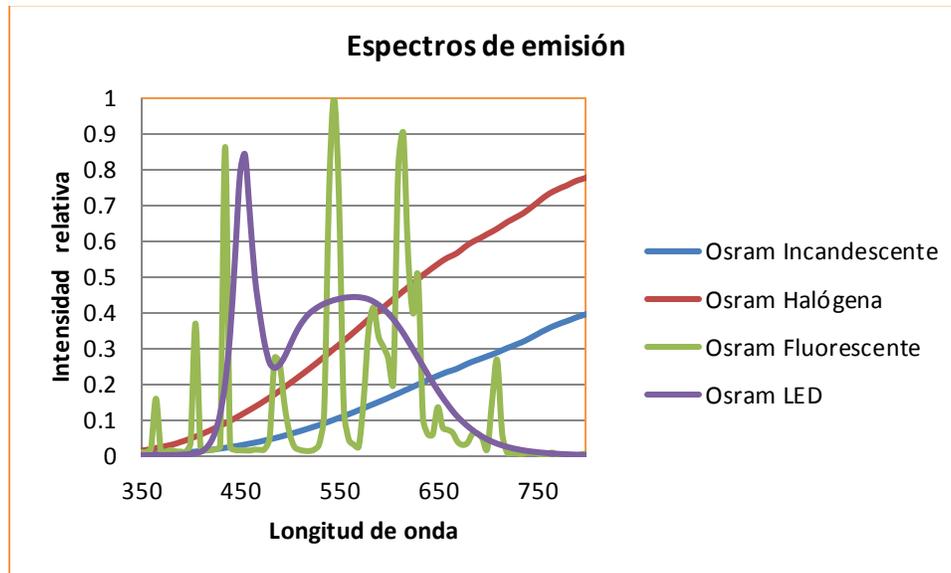


Figura 3. Espectros de emisión de luz blanca.

En la curva de emisión de la lámpara halógena e incandescente se observa que el espectro tiende a cubrir mayormente la zona roja e infrarroja (IR), otorgando así una temperatura de color cálida. Para el caso del espectro de la lámpara fluorescente se observa que esta fuente tiene diferentes picos de emisión a lo largo del ancho de banda del visible, con una mínima representación en la zona del IR así como en la zona UV. Por último para el espectro de emisión LED PC se observan dos picos de emisión característicos, uno perteneciente a la emisión del chip azul y otro con un ancho de banda perteneciente a la emisión del fósforo.

Existen diversos parámetros para caracterizar las fuentes de iluminación (que se verán más adelante), uno de ellos es la eficacia energética, es decir que tan eficientes para producir luz son. Técnicamente la eficacia energética de una fuente de iluminación es la relación que existe entre el flujo luminoso (lúmenes) y la potencia eléctrica requerida para su funcionamiento (Watts) [14].

En la Figura 4 se muestra la evolución del máximo flujo luminoso producido por las principales fuentes de iluminación, así como lo esperado para las lámparas LED.

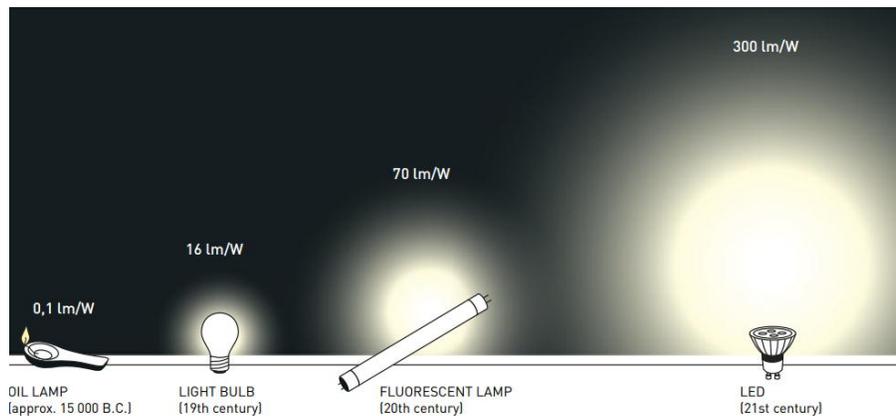


Figura 4. Máximo flujo luminoso de las principales fuentes de Iluminación [11].

Conforme al desarrollo de tecnología se ha logrado aumentar sustancialmente la eficacia energética de las fuentes de iluminación de estado sólido, esto gracias a la innovación de nuevos y mejores materiales semiconductores y fósforos. Actualmente se encuentran lámparas y luminarias que superan en tres veces la eficacia de productos del 2005 [14].

A partir de contemplar todo lo anterior y prediciendo la tendencia sobre iluminación a base de LEDs, muchas corporaciones dedicaron mayor esfuerzo para obtener cada vez mayores eficiencias, realizando mayor investigación sobre éste tipo de iluminación. Una de las tantas comparaciones que se pueden realizar es entre dos fabricantes de diodos emisores de luz (LED) como lo es Nichia y Osram. A continuación se analizan las patentes en los campos de componentes LED y del fósforo para ambas compañías [15]. En la Figura 5 se muestra el recuento de patentes aplicadas y concedidas de componentes requeridos en iluminación LED para Nichia y Osram en el periodo de 1988 a 2008.

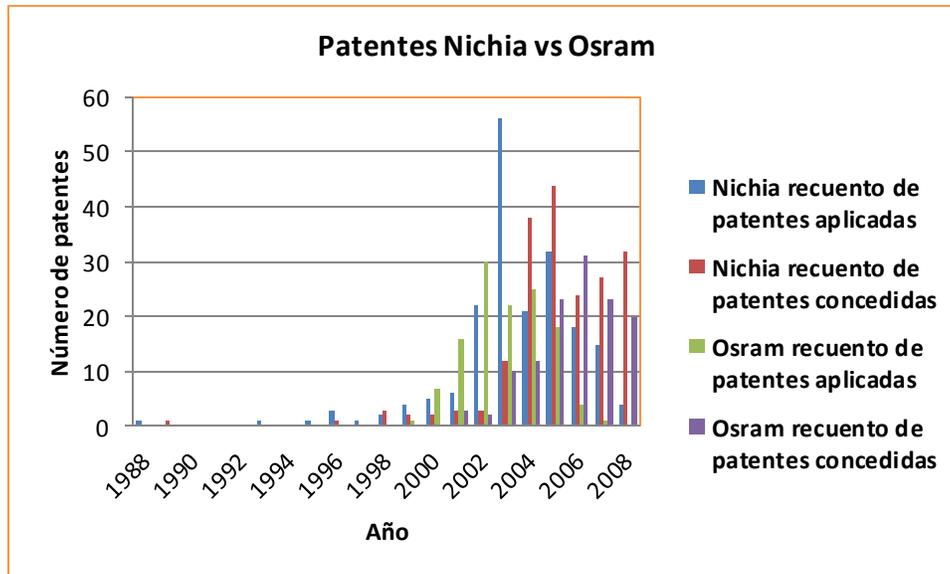


Figura 5. Recuento de patentes de Nichia y Osram en componentes LED [15].

Mientras que en la Figura 6 se muestra las patentes aplicadas y concedidas para Nichia y Osram en cuanto a la tecnología en fósforo requerido en iluminación LED, en el periodo de 1988 a 2008 [15].

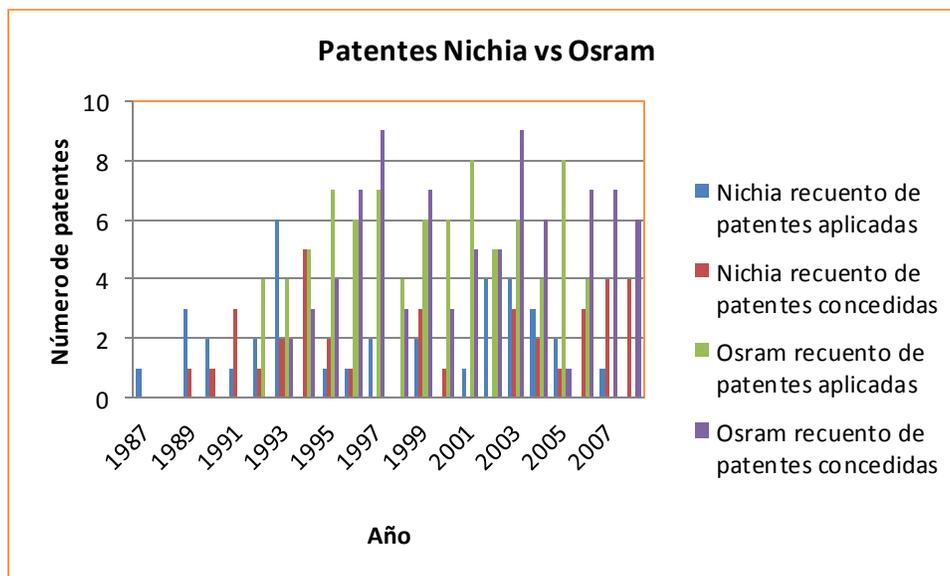


Figura 6. Recuento de patentes de Nichia y Osram en tecnología de fósforos.

Conforme a lo mostrado en las figuras de patentes se observa que para el 2008 Nichia tenía ventajas en el campo de los componentes LED, mientras que Osram tenía

ventajas en el campo del fósforo. Conforme a estos datos las 2 corporaciones al percatarse que sus capacidades tecnológicas eran complementarias, deciden pasar de la competición a la cooperación acordando licencias cruzadas entre si [15].

Las fuentes de Iluminación tradicionales como incandescentes, fluorescentes, etc. cada vez son mayormente desplazadas por tecnología de Iluminación LED, dado el alcance que tiene éste tipo de iluminación. Para el desarrollo de este tipo de tecnología se llevan a cabo toma de decisiones muy importantes. Tal es el caso de la compañía General Electric que público (a principios de este año) que: dejará de producir sus lámparas fluorescentes compactas (CFLs) para el mercado de los Estados Unidos y así concentrar sus esfuerzos en Iluminación LED [16]. Las causas para que GE tomara esta decisión fue que los precios de producción de LED han disminuido drásticamente además de que las regulaciones Estadounidenses son cada vez más exigentes principalmente en la cuestión de la eficacia luminosa(lm/w).

Pero se debe de subrayar que la decisión se tomó sólo para el mercado de Estados Unidos, es decir que seguirá teniendo presencia en otros países, en donde las regulaciones no sean exigentes y/o en donde exista demanda de tecnologías ineficientes de iluminación.

Así mismo General Electric planea que para el 2020 los LEDs se utilizarán en más del 50 por ciento en los estados Unidos, ya que actualmente los LEDs solo representan el 15 por ciento de los 1,7 mil millones de bulbos vendidos [16]

Otro dato interesante es el publicado en LED MAGAZINE, donde Philips en conjunto con la ciudad de Dubái (bajo el patrocinio del primer ministro de los Emiratos Árabes Unidos y Gobernante de Dubái [18]) anunciaron una nueva familia de lámparas de retroiluminación LED con una eficacia de 200 lm/w que serán distribuidas a finales de este año [17]. Lo sorprendente de este anuncio es que esencialmente están diciendo que duplicaran los logros de eficacia luminosa de las lámparas LED actuales ya que Philips en su última lámpara obtuvo un logro de 101 lm/W [18].

Aunque es evidente que la mejora de la eficacia luminosa de Estado Sólido va en aumento, se contemplan mejoras del 50% por década. Entonces la pregunta radica en cómo y cuál sería el costo de estas lámparas para lograr dicha eficacia, aunque tal vez tratándose de una ciudad con una fuerte economía el costo no sería un problema.

Sin embargo se han publicado LEDs con eficacias mayores a 200 lm/W, pero esta eficacia fue demostrada sólo en laboratorio, lo que indica que se tuvieron controlados todos los parámetros que afectan en la eficacia, lo que conlleva que fuera de laboratorio se torna difícil la obtención de estos datos, dicha eficacia fue publicada por compañías como: Samsung, Seúl Semiconductor y Everlight Electronics.

Sobre las lámparas de Dubái, Maury Wright (editor en jefe de LEDs Magazine, ingeniero electrónico y periodista de tecnología específicamente en iluminación LED [19]) comentó que es probable se necesiten LEDs con eficacias de 250 lm/W para ensamblar una lámpara con una eficacia neta de 200 lm/W. Ésta es la razón por la que se sospecha que las lámparas de Dubai utilizarán un número mayor de LEDs que las típicas lámparas de retroiluminación que se encuentran en el mercado, y funcionaran con corrientes bajas, resultando en una correspondiente caída de temperatura y por lo tanto mayor eficacia [17].

Todo esto solo es una especulación ya que el portavoz de Philips se negó a revelar cómo fueron capaces de alcanzar los 200lm/W en un proyecto desarrollado durante 9 meses. Solo comentaron que un "avance tecnológico LED" implicaba "una óptima estructura óptica, diseño de electrónica de alta eficiencia y un control de proceso de fabricación apretado" además que su iniciativa tiene el propósito de una reducción de 30% de energía para el 2030 [18]. .

Todos estos datos presentados solo son algunos parámetros de los tantos que existen a considerar antes de la elección de una fuente de iluminación, y esto dependerá en gran medida la aplicación en específico que se requiere. Es por eso que el presente trabajo muestra un enfoque del desempeño de forma general en fuentes de iluminación de estado sólido, contemplando diferentes tipos de LEDs, así como sus ventajas y

desventajas para la elección-diseño y fabricación de fuentes de Iluminación de estado sólido.

Los principales objetivos contemplados para dicho trabajo fueron: analizar y caracterizar diferentes fuentes de iluminación comerciales, esto con el fin de deducir las principales diferencias que existen entre ellos y a partir de esto decidir ¿Cuáles son las que mejor se adecuan para un diseño de fuente de iluminación? Posteriormente conociendo que las fuentes de iluminación LED son las más versátiles y que contemplan eficacias por encima de sus contrapartes, se eligen LEDs para diseñar un arreglo con el fin de obtener una fuente de iluminación, pero a partir de aquí existe otra cuestión que tomar en cuenta, y es: ¿Cómo elegir qué tipo de LED es el más conveniente de entre los diferentes LEDs que se adquirieron?

Es decir, si se requiere iluminar un espacio de 4 m^2 con alrededor de 200 luxes, lo cual se logra aproximadamente con una lámpara omnidireccional Osram LED de 9W ($\cong 800 \text{ lm}$) o con una incandescente de 60W ($\cong 800 \text{ lm}$). De las muchas posibilidades para conformar una lámpara LED de 800 lm o de 9W de potencia, ¿Cuál configuración de lámpara LED es la más conveniente para lograr este flujo luminoso o esta potencia?, ¿Será más conveniente tener un arreglo de 2 LEDs de 5W?, o ¿Será mejor un arreglo de un LED de 5W más un LED de 3W y uno de 1W?, ó ¿Un arreglo de 9 LEDs de 1W cada uno?, ó ¿será mejor una lámpara con 18 LEDs de medio Watt? El presente trabajo investigación, demuestra y da solución a estas cuestiones, proporcionando el ¿Qué? y ¿Por qué? de la elección de algunas fuentes de iluminación de estado sólido para construir una lámpara de LEDs.

Referencias.

- [1] “Discover lighting an introduction to lighting basics”, via @ies, <http://www.ies.org/lighting/history>, Accesado 10-11-2016.
- [2] R. J. A. W. Lever “Whales and Whaling in the Western Pacif”, South Pacific Bulletin, April, 33-36, 1964.
- [3] David L. Meeker “Essential Rendering All About The Animal By-Products Industry”, Kirby Lithographic Company, September, 17-19, 2006.
- [4] E. Fred Schubert and Jong Kyu Kim “Solid State Light Sources Getting Smart”, Science, May, 1274-1278, 2005.
- [5] “Fuentes luminosas”, via @edutecne, <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>, Accesado 15-11-2016.
- [6] “Incandescent Lighting”, via @energy, <http://energy.gov/energysaver/incandescent-lighting>, Accesado el 15-11-2016.
- [7] “The greatest development in lighting since the 1879 incandescent”, via @edisontechcenter, <http://www.edisontechcenter.org/Fluorescent.html>, Accesado 15-11-2016.
- [8] “Fluorescent lighting“, via @energy, <http://energy.gov/energysaver/fluorescent-lighting>, Accesado 14-11-2016.
- [9] “Programas de FIDE llegan a más sonorenses”, via @ahorrateunaluz, <http://www.ahorrateunaluz.org.mx/MicroSitio/Noticias.aspx>, Accesado 17-11-2016.
- [10] Arpad Bergh and George Craford “The Promise and Challenge of Solid State Lighting”, Physics Today, December, 42-47, 2001.
- [11] The Royal Swendish Academy of Sciences “Bleu LEDs – Filling the wolrd with new light” Nobel Prize, 1-5, 2014.

[12] U.S. Department of Energy “LED Color Characteristics”, U.S. Department of Energy, January 2012.

[13] Jeff Y. Tsao, “Solid State Lighting Lamps, Chips and Materials for Tomorrow”, IEE Circuits & Devices Magazine, Mayo/Junio, 28-37, 2004.

[14] U.S. Department of Energy “Energy Efficiency of LEDs”, U.S. Department of Energy, March 2013.

[15] Yu-Shan Chen and Bi-Yu Chen “Utilizing patent analysis to explore the cooperative competition relationship of the two LED companies: Nichia and Osram”, ELSEIVER, June 294 – 302, 2010.

[16] “Say Goodbye, Say Hello: GE Stops Making CFLs, Says Go, Go, Go To LEDs”, via @gereports, <http://www.gereports.com/say-goodbye-say-hello-ge-stops-making-cfls-says-go-go-go-to-leds/>, Accesado 20-11-2016.

[17] Maury Wright “What will the 200-lm/W LED lamp cost?”, LEDs Magazine, November/December, pag. 3, 2016.

[18] Mark Halper “Philips turbocharges the LED bulb, claiming huge efficiency breakthrough with Dubai”, via @ledsmagazine, <http://www.ledsmagazine.com/articles/2016/10/philips-turbocharges-the-led-bulb-claiming-huge-efficiency-breakthrough-with-dubai.html>, Accesado 20-11-2016.

[19] “Maury Wright”, via @ledsmagazine, <http://www.ledsmagazine.com/speakers/u-z/maury-wright.html>, Accesado 20-11-2016.

CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE DESEMPEÑO

Color [1].

El color puede ser observado como perteneciente a un objeto o fuente de luz y es percibido instantáneamente y esto se debe gracias a la interacción ente el objeto, fuente de luz, la luz incidente sobre el objeto, el entorno, la dirección de observación, características del observador y la adaptación del observador. Partiendo de esto se puede definir al color como la característica de la luz por la cual el observador puede diferenciar manchas del mismo tamaño, forma y estructura de entre un grupo. Esto también se reduce en términos de potencia radiante del espectro visible que para fines prácticos se contempla de 380 nm a 770 nm [2] (ver Figura 1.1).

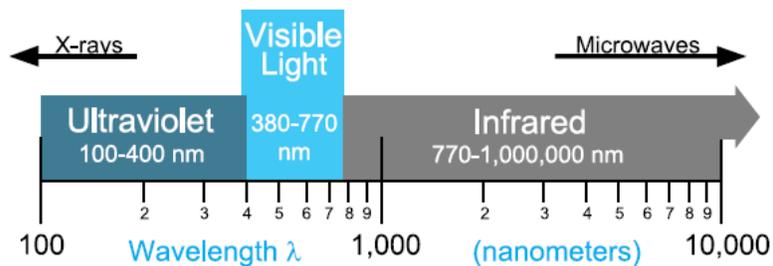


Figura 1.1. Espectro electromagnético [2].

Para el caso de necesitar definir el color de un objeto, éste se entiende como la luz reflejada o transmitida por el objeto cuando está iluminado por una fuente de luz estándar. Para esto se debe de contemplar un observador estándar definido por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en condiciones de observación normalizadas.

Sensibilidad del ojo humano [3].

En la visión humana el ojo es el receptor de luz (definiendo a la luz como el campo electromagnético dentro del espectro visible) proveniente de alguna fuente de

iluminación. A continuación se resumen algunas características relacionadas con las cantidades fotométricas y la sensibilidad del ojo. En la Figura 1.2 se observa una representación de los receptores de luz para la visión humana, donde se percibe que el globo ocular está cubierto por la retina siendo esta la parte del ojo más sensible a la luz, mientras que la fovea es la región central del ojo donde la densidad de la población de conos de la retina es más alta, siendo los conos quienes proporcionan de la alta agudeza de la visión central.

En la parte b) de la Figura 1.2 se muestra la estructura celular de la retina que incluye las células de los bastones sensibles a la luz y las células de cono.

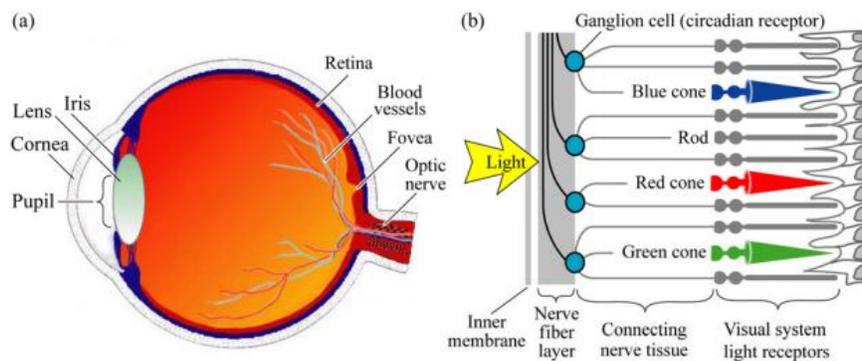


Figura 1.2. a) Sección transversal de ojo humano. b) Diagrama de la retina incluyendo los receptores de luz conos y bastones.

Las células de los bastones son los fotorreceptores más abundantes y más sensibles que las células de los conos, sin embargo no son sensibles al color ya que son los responsables de la adaptación a la oscuridad. En el sistema de visión se encuentran tres tipos de conos, los conos sensibles al rojo, al verde y al azul, gracias a éstos se pueden distinguir los colores.

Mientras que para el caso de visión, existen tres regímenes diferentes referidos al nivel de luminancia del entorno y son: la visión fotópica, la visión escotópica y la visión mesópica las cuáles se muestran en la Figura 1.3 en conjunto con los receptores para cada régimen [3].

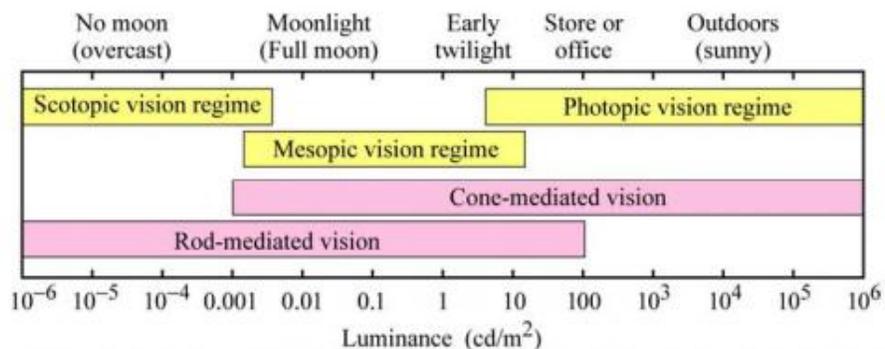


Figura 1.3. Rangos aproximados de régimen de visión y de receptor.

La visión fotópica hace referencia a la visión del ser humano en condiciones de niveles altos de iluminación, siendo las células de los conos las encargadas de percibir la luz del ambiente, el ejemplo más claro es durante condiciones de luz de día y el régimen de ésta visión se contempla con niveles de luminancia mayores a 3 cd/m².

La visión escotópica hace referencia a niveles de luminancia bajos, y aquí los receptores encargados son las células de los bastones ya que éstas tienen una mayor sensibilidad en comparación a los conos, aunque con éste tipo de visión el sentido del color se pierde. Para este caso el régimen se contempla con niveles de luminancia menores a .003 cd/m² y el ejemplo más claro es durante una noche sin luna.

La visión mesópica relaciona los dos tipos de visión mencionados ya que ésta relaciona niveles de luminancia mayores a .003 cd/m² y menores a 3 cd/m² es decir se encuentra entre los dos tipos de visión anteriores.

En la Figura 1.4 se observan las curvas de sensibilidad tanto para las células de los bastones como para los tres tipos de conos (rojo-verde-azul), en donde se puede entender que para la visión nocturna (visión escotópica) el rango espectral es más débil en longitudes de onda cercanas al rojo y más fuerte para longitudes cercanas al azul, esto comparado contra la visión fotópica o diurna.

Por lo tanto para la iluminación nocturna con tonalidades azules se necesitan menor luminosidad para proporcionar la misma sensación de luz en la vista, por lo que se deduce

que podría ser más conveniente iluminar durante la noche con una mayor componente azul y esto permitiría contemplar ahorros de energía al no requerir mayor iluminación, considerando que se permanezca dentro del régimen de visión escotópica - mesotópica y en donde la reproducción de color no sea indispensable. Sin embargo ésta deducción se cuestiona más adelante en otro apartado.

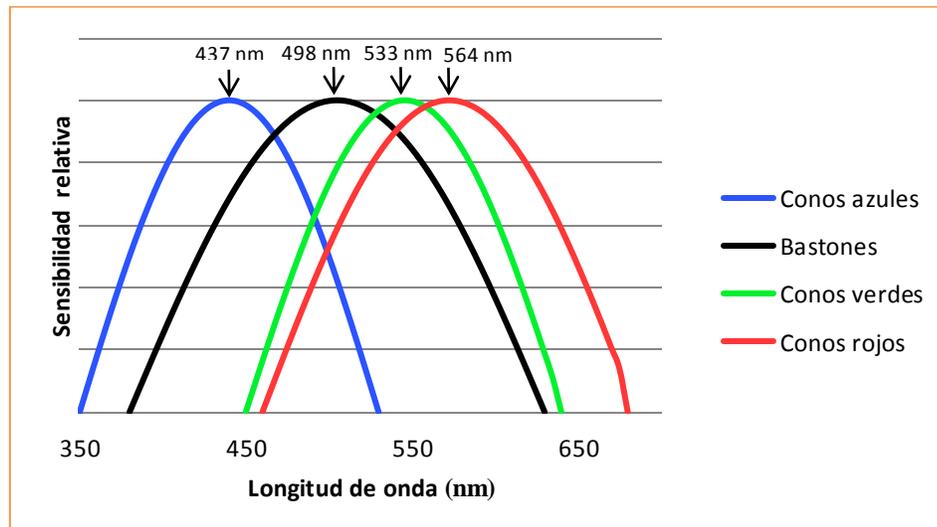


Figura 1.4. Espectros normalizados de sensibilidad de receptores del ojo humano.

Conforme a esto se puede deducir con que longitud de onda es más conveniente iluminar para así tener mayor eficacia partiendo de conocer el tipo de visión encargada de la percepción y bajo qué límites de luminancia para permanecer en ciertos regímenes.

Flujo Radiante y Luminoso [4].

El flujo radiante indica la cantidad de potencia de la radiación luminosa (Figura 1.5). Esta cantidad es una medida de la potencia óptica de una fuente de iluminación de la tasa de flujo de energía radiante, en Joules por Segundo. Un hecho es que la energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda, por lo tanto la luz UV es más energética que la radiación visible e infrarroja.

El flujo es la unidad básica de potencia óptica, expresada en watts o lúmenes. Una esfera integradora es utilizada para medir el flujo luminoso emitido por una fuente en todas direcciones. La luz en haz colimado estrecho se puede medir directamente con un receptor plano, esto considerando que el haz de luz cubra el receptor.

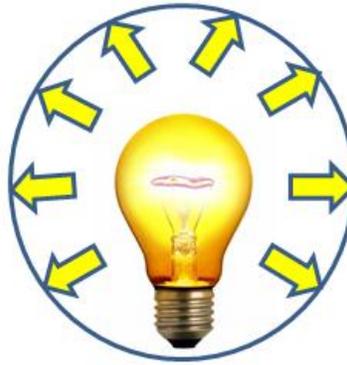


Figura 1.5. Flujo luminoso y radiante.

El flujo luminoso es una medida de la radiación de luz visible, este flujo es expresado en lúmenes, la cual es una unidad que relaciona el flujo radiante con la radiación receptiva del ojo humano, en la Figura 1.6 se muestra la curva receptiva del ojo humano en la cual se observa que la máxima percepción conforme a la estandarización de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) es de 683 lm/W a una longitud de 555 nm, es decir que a longitudes cercanas al verde el ojo es más sensible [3].

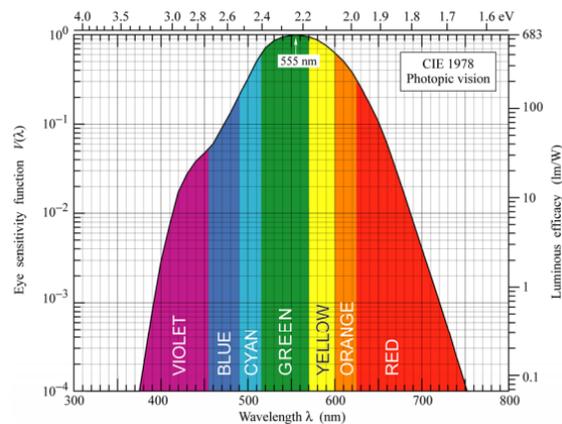


Figura 1.6. Función de sensibilidad del ojo (ordenada izquierda) y eficacia luminosa (ordenada derecha) [3].

Existen unidades de conversión entre flujo radiante y flujo luminoso, en la Tabla 1.1 se observan algunas unidades de conversión.

Tabla 1.1. Unidades de conversión (flujo radiante - flujo luminoso).

Flujo Radiante	Flujo Luminoso
1 Watt = 683 lm a 555nm	1 lm = 1.464x10 ⁻³ Watts a 555 nm
1 Joule = 1 Watt * s	1 lm*s = 1.464x10 ⁻³ Joules a 555 nm

Temperatura de Color Correlacionada (CCT) [4].

La temperatura de color hablando en términos de iluminación se refiere al color de una fuente completamente radiante (cuerpo negro) a una temperatura particular y de fuentes de luz que coinciden con ese cuerpo. La temperatura de color correlacionada es la temperatura de un cuerpo negro cuyo color es parecido al de la fuente de luz.

El cuerpo negro es un objeto que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, es decir ninguna radiación pasa a través de él y ninguna radiación es reflejada, la radiación emitida por un cuerpo negro se llama “Radiación de cuerpo negro”.

En la figura 1.7 a) se muestra la curva de cuerpo negro en diagrama CIE, mientras que en la imagen b) se observan las diferentes temperaturas de color para diferentes fuentes de iluminación

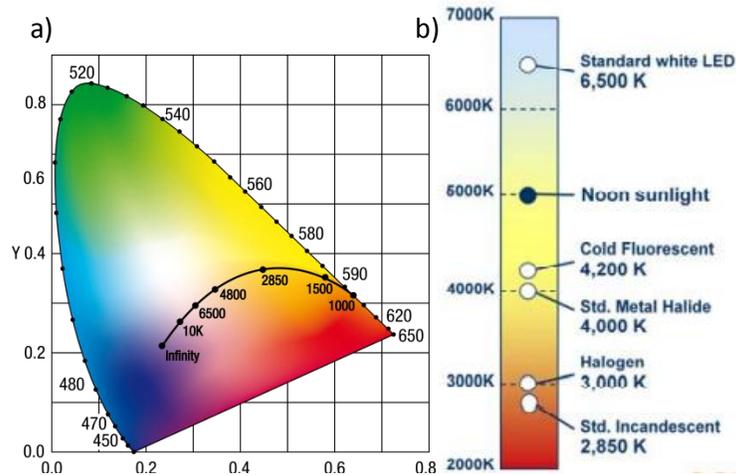


Figura 1.7. a) Curva de cuerpo negro, b) Temperatura de color de fuentes de iluminación.

Existen dos propiedades fundamentales características de las fuentes de iluminación: Temperatura de Color Correlacionada (CCT) que en definición básica es la apariencia de color de una fuente de iluminación “caliente” para valores bajos de CCT y “frío” para valores altos de CCT e Índice de Reproducción de Color (CRI) que se menciona a continuación.

Índice de Reproducción de color (CRI) [4].

El Índice de Reproducción de Color (CRI) hace referencia a la capacidad de una fuente de luz, con su CCT particular, para hacer que los colores de los objetos sean iguales a una fuente de luz de referencia de la misma CCT. Es importante recordar que el sistema de visión encargado de detectar los colores es la visión fotópica con valores por arriba de 3cd/m^2 , entonces para poder detectar los colores se necesitan luminancias por encima de dicho valor.

Existen algunos métodos para poder medir y especificar la propiedad de representación de color, esto se hace con la ayuda de un fuente de luz estándar o de referencia proyectada en los objetos de prueba, posteriormente se someten a una comparación con los mismos objetos pero ahora iluminados por la fuente de prueba.

En la Figura 1.8 se observa el espectro de radiación de un iluminante estándar siendo un iluminante teórico utilizado como referencia para cálculos colorimétricos, en el que se tiene la misma potencia en todas las longitudes de onda del espectro luminoso visible. En todo momento se debe tener presente que una fuente de luz es un emisor existente de radiación lumínica, mientras que un iluminante puede ser una fuente de luz potencial, es decir todas las fuentes de luz se pueden especificar como iluminantes, sin embargo un iluminante no siempre se puede ver realizado físicamente como una fuente de luz.

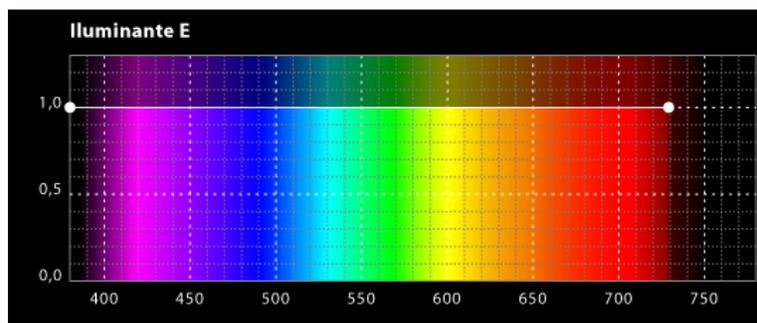


Figura 1.8. Espectro de radiación de Iluminantes Estándar.

Mientras que para fines prácticos el Iluminante artificial más utilizado como referencia es el espectro de emisión de una bombilla incandescente de filamento de tungsteno, en la Figura 1.9 se observa dicho espectro de radiación correspondiente con la temperatura de color de un cuerpo negro a 2,856 K.

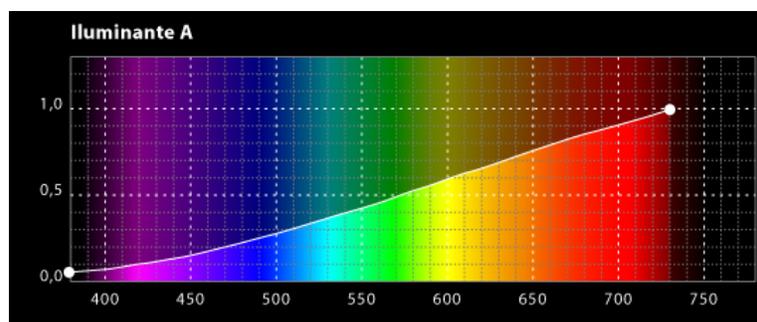


Figura 1.9. Espectro de radiación de Iluminante A.

Ahora bien las propiedades de representación de color no se pueden evaluar por inspección visual ya que esto no arrojaría algún dato preciso. Sin embargo existen equipos de medición en el que también se pueden realizar mediciones colorimétricas y así conocer el Índice de Reproducción de Color de las fuentes de iluminación de prueba, tal es el caso de la esfera integradora que fue el equipo que se utilizó para caracterizar las fuentes de iluminación (ver Figura 1.10).



Figura 1. 10. Esfera integradora

La función de la esfera integradora es: integrar espacialmente el flujo radiante dentro de un recinto de superficies difusas, además que para éste caso el equipo dispone de algunas ventajas más como mostrar también características colorimétricas de las fuentes de iluminación.

Eficacia luminosa de LEDs [5].

La eficacia luminosa de una fuente de luz se puede definir como la relación que existe entre el flujo total (lúmenes) y la potencia eléctrica total (Watts) [6]. Para este caso se encuentra un límite teórico para la eficacia y es de 683 lúmenes/watt a una longitud de 555nm.

Para conocer la eficacia luminosa de lámparas LED existen matices que no se deben de pasar por alto: como que los paquetes de LED o nodos individuales tienen su propia eficacia y que ésta es muy diferente a la eficacia de una lámpara LED integrada. La

diferencia de eficacia entre una unidad y un conjunto de LEDs puede provenir de pérdidas del conductor, térmicas y ópticas [6]. También se deben de conocer los procedimientos y condiciones para la medición de productos LEDs.

La eficacia de una fuente de luz blanca proveniente de un LED de configuración de chip azul y fósforo amarillo, puede estar directamente relacionada con la Temperatura de Color Correlacionada (CCT), esto debido a que; a temperatura de color altas se tiene mayor presencia de la emisión del chip azul, lo que indica que casi no existe absorción-emisión del fósforo amarillo, y ya que el fósforo no es 100% eficiente indica a su vez que tampoco hay pérdidas por absorción del fósforo, por lo que se puede encontrar un mayor flujo luminoso en fuentes de luz LED frías.

Eficiencia en fuentes de Iluminación de Estado Sólido (LEDs) [6].

La eficiencia a diferencia de la eficacia la cual contempla la curva de percepción del ojo humano, la eficiencia es caracterizada por la potencia radiométrica, es decir, la eficiencia en fuentes de iluminación es la relación directa de la potencia óptica emitida entre la potencia eléctrica necesaria para dicha emisión, es decir:

$$\eta = \frac{P_{\text{óptica emitida}} (W)}{P_{\text{eléctrica inyectada}} (W)}$$

En esta definición debe de quedar claro que se hace mención al dispositivo o al LED como un todo, ya que podría existir confusión entre la eficiencia de LED y la del fósforo que suelen contener los LEDs. Sin embargo un fósforo más eficiente da como resultado un LED más eficiente.

Para la medición de la potencia óptica emitida a grandes rasgos se suelen utilizar medidores de potencia óptica o también conocidos como radiómetros, estos suelen ocuparse para fuentes de luz direccionales, en donde el haz de luz es colimado y se hace

incidir en el área del fotodetector y donde el área transversal del spot debe de ser menor o igual al área del fotodetector.

“Flicker” en fuentes de Iluminación [4].

El parpadeo mejor conocido como “flicker” (en inglés), se puede entender como las fluctuaciones luminosas provenientes de los dispositivos de iluminación. Las fuentes de Iluminación de corriente alterna (AC) tienden a parpadear constantemente. Sin embargo, lámparas como las halógenas no representan problema alguno para el ser humano, puesto que la liberación de calor a través del filamento es lenta. Es decir antes de la desactivación total del filamento, este vuelve a energizarse a través de la línea de AC. Este fenómeno es más representativo en Fuentes de Iluminación de Estado Sólido (LEDs), ya que a diferencia de otras fuentes de iluminación la unión P-N y el fosforo de dichos LEDs presenta tiempos de respuestas en el orden de nanosegundos a picosegundos. Esto como consecuencia permite la desactivación total de los LEDs, que a su vez es mostrado como fluctuaciones de luminiscencia.

Cuando el estímulo de parpadeo es repetitivo e incrementa su frecuencia entonces alcanza un punto en donde éste parpadeo es imperceptible para ojo humano, esto hace referencia, que no por no poderlo ver, indique que no exista. La frecuencia en la que deja de ser perceptible el parpadeo se define como Frecuencia de Fusión Crítica (CFF), ésta frecuencia depende de varios factores, como la duración del estímulo, la forma, la ubicación de la retina, la profundidad de modulación y la adaptación lumínica.

Ahora bien existe una frecuencia fundamental que es la frecuencia de suministro de eléctrico, siendo de 60 Hz para América del Norte, por lo que se encuentra una frecuencia fundamental de oscilación que será el doble a la frecuencia de alimentación eléctrica que para éste caso será de 120 Hz aunque se pueden encontrar componentes a 60 Hz. Los 120 Hz son representados por las mitades positiva y negativa del ciclo de corriente alterna.

Para condiciones de visión fotópicas (mayor a 3 cd/m^2) el sistema visual es más sensible a frecuencias encontradas entre 10 a 30 Hz, por lo que a razón de menor luminancia de adaptación menor será la sensibilidad absoluta de parpadeo.

La sensibilidad al parpadeo por parte de la fovea puede captar velocidades de parpadeo de 60 Hz a luminancias moderadas, pero insensible a modulaciones de frecuencias bajas. Mientras que la retina periférica posee la sensibilidad al parpadeo alrededor de 15 Hz, pero es muy sensible a pequeñas amplitudes de parpadeo. Todo esto quiere decir que el parpadeo se detecta principalmente en el campo periférico desapareciendo esta sensibilidad cuando se ve directamente a la fuente de iluminación.

Pero en que afecta el “flicker” al ser humano. El parpadeo de la luz está presente en casi todas las fuentes de luz aunque en la mayoría no se tenga esa percepción del efecto. Además de ser molesto y distractor existen numerosos estudios que indican los posibles efectos del parpadeo en algunos casos se generaliza por las frecuencias con que se encuentra éste fenómeno [7].

Para frecuencias de entre 3 a 70 Hz existen riesgos de ataques epilépticos, mientras que para frecuencias de hasta 165 Hz se contemplan riesgos de: dolor de cabeza, malestar, alteraciones de la visión, entre otras. Siendo así que se ha demostrado que se pueden llegar a percibir parpadeos con frecuencias de hasta 200 Hz, pero como para todos los casos en gran medida depende de la sensibilidad de cada persona, ya que no todos se ven afectados de la misma forma [8].

Los malestares de parpadeo se pueden ver más o menos afectados dependiendo de las características de la fuente de luz, como ya se mencionó, se deriva principalmente de la frecuencia, pero también de la intensidad de luz, en donde a mayor intensidad mayor efecto, mientras que el color de luz influye siendo los tonos rojos y azules los que afectan más y para la modulación existirá un mayor efecto si la diferencia entre el valor máximo y mínimo es mayor [9].

Todas estas afecciones por “flicker” llevaron al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) a publicar las primeras prácticas recomendadas sobre éste fenómeno en el documento IEEE Std. 1789-2015. La IEEE-SA es una organización que realiza consensos para la regulación de nuevas tecnologías, contando con la opinión de más de 160 países que promueven innovación y protegen la salud y seguridad pública [10].

El documento fue titulado: “Prácticas Recomendadas para la Modulación Actual de los LEDs de Alto Brillo para la Mitigación de los Riesgos a la Salud de los Espectadores”, en donde se aborda lo referente al parpadeo en LEDs.

El parpadeo en LEDs se puede caracterizar por su forma, su frecuencia periódica, su amplitud de modulación y su valor medio durante un ciclo. Además que para determinar los niveles de riesgo se deben de contemplar características poblacionales de los usuarios, tiempo de exposición, tipo de tareas realizadas en el espacio iluminado y la sensibilidad de riesgo. Y ya que todas estas características afectan la respuesta biológica del espectador, dicho documento provee de una guía para ayudar a fabricantes sobre el diseño de controladores de LEDs con el fin de minimizar posibles efectos sobre la salud.

Algunas recomendaciones encontradas en el documento publicado por el IEEE son las referidas a las afecciones por frecuencias, en donde indica que para prevenir convulsiones en frecuencias menores a los 90 Hz el porcentaje de “flicker ” deberá ser debajo del 5%, manteniendo una tolerancia de 20 Hz ya que la luz no desencadena ataques a frecuencias mayores a 70 Hz.

Otra de las características que provee dicho documento, es conforme a las expresiones matemáticas que deben de usarse para mitigar efectos biológicos, de bajo y alto riesgo causados por el parpadeo, en las cuales se establecen el máximo parpadeo que pueden presentar las fuentes de iluminación [9]. Dichas expresiones se muestran a continuación:

Para frecuencias inferiores a 90 Hz

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.025$$

Para frecuencias entre 90 Hz y 1250 Hz

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.08$$

Las frecuencias que se encuentran por arriba de 1250 Hz no cuentan con restricciones en cuanto a porcentaje de “flicker”, siendo ésta la frecuencia mínima permitida para la Modulación por Ancho de Pulso (PWM) básico.

Existen otros valores para encontrar el porcentaje máximo de parpadeo, éstas son para limitar algunos otros efectos biológicos de mayor riesgo relacionados con el “flicker”, esto dependerá como ya se mencionó de diferentes las características poblacionales.

Para frecuencias inferiores a 90 Hz

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.01$$

Para frecuencias entre 90 Hz y 3000 Hz

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.0333$$

Encontrando de la misma forma que para frecuencias superiores a 3000 Hz no se tienen restricciones en el valor máximo de parpadeo, siendo la frecuencia mínima de PWM para éstas condiciones.

Con este documento se proporcionan las especificaciones que deben de tener los dispositivos para mitigar los efectos biológicos del parpadeo en fuentes de iluminación alentando a los fabricantes a probar y reportar el “flicker” en la hoja de datos de sus dispositivos, de ésta manera se contempla eliminar las afecciones por parpadeo para Iluminación de Estado Sólido, como lo fue para las lámparas fluorescentes por el surgimiento de balastros electrónicos de alta frecuencia alrededor de 1990 [11].

Ahora bien las especificaciones propuestas por el IEEE para mitigar el parpadeo fueron cuestionadas ampliamente y calificadas como estrictas por parte de la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (*Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos*). Sin embargo para el Departamento de Energía de EE.UU. DOE la propuesta es

una práctica muy necesitada [12]. Es de esperar que dicha propuesta de norma se incorpore en breve a la normativa europea ISO y un poco después se incorpore al REBT [13].

La NEMA es una asociación estadounidense contemplando un aproximado de 350 miembros, de los cuáles sus compañías fabrican diversos productos incluyendo equipo de distribución y transmisión de energía, sistemas de iluminación, automatización en sistemas de control y sistemas médicos de diagnóstico por imágenes [14].

La principal razón por la que la NEMA cuestiona dicha propuesta es porque es muy estricta para muchas aplicaciones, lo que podría indicar añadir costos innecesarios a la electrónica del LED y que incluso las lámparas incandescentes no se encuentran dentro de las regiones de bajo riesgo y sin efecto como se muestra en la Figura 1.11 [15]. En la cual se observan los límites propuestos por el IEEE en regiones verdes y naranjas sombreadas y descritas en el artículo “Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety” [16] y con rangos de parpadeo representativos de productos comunes y existentes los cuales se obtuvieron bajo un informe por parte del Departamento de Energía de los Estados Unidos en parpadeo.

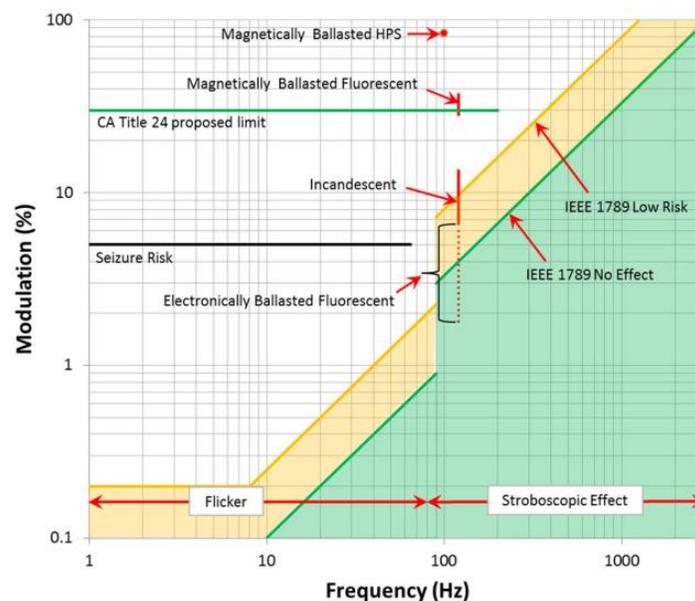


Figura 1.11. Profundidad de riesgo por flicker.

El incremento de costo radica en que el principal determinante de la presencia de parpadeo es el controlador del LED o mejor conocido como “driver”, pero la fabricación de controladores que minimicen el “flicker” son a menudo costosos, además que supondrían dispositivos de mayor tamaño para dar cabida a los componentes electrónicos en donde además se encuentran algunos inconvenientes ya que existen dispositivos con restricciones en tamaño. Por ésta razón es muy probable encontrar muy representativo el fenómeno de “flicker” en productos LEDs de menor costo.

El parpadeo se origina por varios factores, de entre estos destaca el valor de los condensadores utilizados en el controlador del LED, ya que éste valor está directamente relacionado con el fenómeno de parpadeo, ya que de aquí depende el rizo resultante de la rectificación de CA, es decir el valor de rizo se atenúa a razón de aumentar el valor capacitivo del condensador [13].

Conforme a lo mencionado se puede pensar que la solución simplemente se encuentra en incrementar el valor de dicho(s) capacitor(s), sin embargo aparte de encontrarse con el problema de dispositivos de tamaños reducidos, existe otro fenómeno que se originaría al incrementar los valores de capacitancia como lo es: el pico de corriente de arranque [13]. Como se sabe en el momento de encendido del LED, es decir en el tiempo cero, los condensadores necesitan cargarse, esto depende directamente de los componentes y del capacitor que en general ocurre durante los primeros 20 milisegundos (ms).

Los capacitores con mayor valor capacitivo tienden a tener un mayor pico de arranque, es decir como ejemplo se puede citar que si se sustituyen 40 tubos fluorescentes de algún espacio controlados por un solo interruptor, por 40 tubos LED se puede tener la siguiente situación: Si un tubo fluorescente consume 7 Ampers de pico de corriente, entonces si se tienen 40 tubos, 40×7 es igual 280 Ampers que debe de soportar el interruptor. Sin embargo si un tubo LED tiene un pico de corriente de 40 Ampers, el interruptor debería soportar un pico de corriente de 1600 Ampers que es el

resultado de 40 tubos por 40 Ampers, es lógico deducir que se necesita dividir el circuito para realizar 4 o 6 circuitos independientes con un interruptor para cada uno.

Derivado de esto se encuentra otro gasto en la división del circuito, en cableado, interruptores, mano de obra, etc. Aunque se puede pensar que es más factible sustituir el valor del interruptor por uno de mayor valor, entonces para esto también se tendría que cambiar las protecciones como fusibles a unos de mayor valor, sin embargo con éste cambio la instalación quedaría fuera de norma.

Una posible salida a ésta problemática sobre el valor de capacitores podría ser mediante circuitos “inteligentes” esperando poder conseguir cargar los condensadores en el momento óptimo de uno o dos ciclos de corriente de entrada y después de estar cargados encender el LED, con esto el pico de arranque disminuiría notablemente a valores razonables. Existen algunos controladores para LED que ya poseen ésta tecnología con el cuál se pueden obtener parpadeos de alrededor del 6%, mientras algunos otros fabricantes anuncian productos “flicker-free” que en realidad hacen referencia a que sus productos no cuentan con el parpadeo inicial del fluorescente electromagnético, pero esto no tiene nada que ver con la nueva norma del IEEE [13].

Consecuencias de uso de luz artificial [17].

Existen un sin número de consecuencias por la utilización de luz artificial, algunas ya fueron mencionadas en apartados anteriores, sin embargo no se ha mencionado algunos datos importantes por tiempos de exposición prolongados a iluminación artificial.

El ser humano al necesitar de iluminación artificial para realizar sus tareas, se expone a éste tipo de iluminación sin embargo los tiempos de exposición suelen ser prolongados y en muchas ocasiones innecesarios. Las longitudes de onda azules que son beneficiosas durante las horas diurnas ya que son responsables de aumentar la atención,

tiempos de reacción, estado de ánimo, han demostrado ser el tipo de luz más dañina por la noche.

La exposición a luz azul no siempre indica percibir dicha componente, ya que ésta longitud de onda se puede encontrar mezclada con otros colores, tal es el caso de LEDs blancos y dado el auge de tecnología podemos encontrar luz azul en casi todo tipo iluminación y retroiluminación, principalmente donde se vean involucradas las lámparas fluorescentes y los LEDs que son las fuentes con mayor presencia de luz azul.

Las fuentes de iluminación artificiales más eficientes son las que contemplan mayores riesgos a la salud. La exposición bajo este tipo de iluminación afecta los ritmos circadianos, ya que estos responden a estímulos de luz y de oscuridad, y son los encargados de funciones fisiológicas coincidentes con los estados de ánimo, sueño y vigilia.

Los ritmos circadianos de las personas son ligeramente diferentes, pero el ciclo promedio es de veinticuatro horas con quince minutos, esto llega a variar dependiendo de cada persona. El estudio realizado por el Dr. Charles Czeisler de la Escuela de Medicina de Harvard en 1981 demuestra que la luz del día mantiene sincronizado el reloj biológico de una persona con el ambiente.

Existen estudios que demuestran que la exposición prolongada a luz artificial durante la noche, puede llegar a provocar enfermedades del corazón, obesidad, diabetes y algunos tipos de cáncer (mama, próstata) entre otros. La exposición a este tipo de iluminación disminuye la secreción de melatonina siendo una hormona que influye en los ritmos circadianos, existen versiones preliminares sobre estudios en donde los niveles bajos de melatonina pueden explicar la asociación con el cáncer.

Ahora bien los problemas mencionados hacen referencia a cualquier tipo de iluminación artificial, pero para el caso en particular de luz con componentes azules ésta logra suprimir la secreción de melatonina con mayor fuerza. Para éste caso se realizó una

prueba de comparación entre luz azul y luz verde con intensidades similares, notando que para el caso del azul éste suprimió la melatonina al doble que la suprimida por el verde.

Para explicar la diabetes y obesidad producidas por luz artificial, existe un estudio en Harvard donde algunos investigadores realizaron pruebas con personas sometiéndolas a un horario que cambia gradualmente con el fin de modificar el ritmo circadiano de los individuos, arrojando como resultado que los niveles de azúcar de los individuos aumentaron, mientras que la hormona encargada de la saciedad alimenticia disminuyó.

Mientras que los problemas cardiovasculares los atribuyen a personas que no duermen lo suficiente, en donde hace referencia que la iluminación de noche supera por mucho a la iluminación natural de noche (alrededor de 8 lux), por lo que las personas presentan ciclos de sueño cortos.

Conforme a los efectos adversos que tiene la luz azul para la salud existen preocupaciones entre las medidas ambientales y la salud personal, ya que en la búsqueda de iluminación eficiente se encuentran mayores componentes azules en la iluminación, tal es el caso de LEDs y CFLs.

Se contemplan algunas opciones para reducir el riesgo de afecciones provenientes de la exposición de luz artificial donde se menciona utilizar luces rojas oscuras para iluminación nocturna, ya que éste tipo de luz posee menor potencia para alterar el ritmo circadiano y suprimir la melatonina.

Así también se sugiere evitar la exposición a pantallas brillantes de dos a tres horas antes de acostarse, para el caso necesario de necesitar este tipo de iluminación se recomienda utilizar gafas que filtren longitudes de onda corta (azul).

Por último una exposición prolongada la luz de día aumentara la capacidad de dormir por la noche, así como mantener un buen estado de ánimo y un estado de alerta favorable.

Referencias.

- [1] “Luz,Color,Visión”, vía @edutecne, <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap02.pdf>, Accesado 25-11-2016.
- [2] Alex Ryer “Light Measurement Handbook”, Ed. International Light, 1-63 p. 1998.
- [3] “Human eye sensitivity and photometric quantities”, vía @ecse, <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf>, Accesado 30-11-2016
- [4] Illuminating Engineering Society of North America “The IESNA Lighting Handbook”, Ed. Illuminating Engineering Society, Ninth Edition, 1035 p, 2000.
- [5] Alexander Wilm “Understand the factors and adaptations that impact LED efficiency”, LED Magazine, 57-59 p, Junio, 2016.
- [6] U.S. Department of Energy “Energy Efficiency of LEDs”, Energy Efficiency and Renewable Energy, March 2013.
- [7] Jonathan McHugh, PE, McHugh Energy & Mike McGaraghan “Quantifying Flicker: Fourier Filtering of Light”, IES Conference, 2016.
- [8] “La Iluminación LED y sus efectos en la salud”, via @smart-lighting, <http://smart-lighting.es/la-iluminacion-led-y-sus-efectos-en-la-salud/>, Accesado 5-12-2016.
- [9] LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update
- [10] “La IEEE publica la primera norma para regulación del flicker en iluminación LED”, via @iluminet, <http://www.iluminet.com/ieee-flicker-led/>, Accesado 10-12-2016.

[11] “Del escritorio de Jim Brodrick: Sobre las nuevas recomendaciones para el flicker del LED”, via @iluminet, <http://www.iluminet.com/jim-brodrick-flicker-led/>, Accesado 10-12-2016.

[12] “Nueva norma de IEEE sobre niveles de parpadeo aceptables en LED cuestionada por NEMA”, via @smart-lighting, <http://smart-lighting.es/nueva-norma-de-ieee-sobre-niveles-de-parpadeo-aceptables-en-led-cuestionada-por-nema/>, Accesado 10-12-2016.

[13] “Ya se ha publicado la primera normativa para regular el máximo de parpadeo (Flicker) permisible en iluminación LED... de momento en EEUU.”, via @eco-tubo, <http://www.eco-tubo.es/wp-content/uploads/2015/08/IEEE-STD-1789-2015.pdf>, Accesado 16-12-2016.

[14] “NEMA”, via @nema, <http://www.nema.org/About/pages/default.aspx>, Accesado 15-12-2016.

[15] NEMA “Temporal Light Artifacts (Flicker and Stroboscopic Effects)”, NEMA Lighting Systems Division Position Paper, 2 p. June 2015.

[16] Brad Lehman, Arnold J. Wilkins, “Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety,” IEEE Power Electronics Magazine, 18-26 p. September 2014.

[17] “Blue light has a dark side”, via @health.harvard, <http://www.health.harvard.edu/staying-healthy/blue-light-has-a-dark-side>, Accesado 20-12-2016.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y NORMATIVIDAD

Factor de Potencia [1].

Se sabe que la potencia eléctrica de Corriente Directa (CD), se encuentra como el producto de la tensión por la corriente, sin embargo cuando se trata de sistemas de Corriente Alterna (AC), esta definición se torna más complicada, ya que la potencia, la corriente y el voltaje son cantidades complejas. Para estos casos se considera la potencia aparente S , dada por la siguiente expresión

$$S = I * V$$

es decir, es el complejo conjugado de la corriente por el voltaje. Para un fácil entendimiento sobre éste punto, no se consideraran cantidades complejas ni representación de fasores, ya que es mejor contemplar a la potencia, corriente y voltaje como cantidades que varían en el tiempo.

Ahora bien la forma de interpretar que la potencia es igual al producto de la corriente y voltaje, es cuando éstas últimas varían respecto al tiempo, tomando ésta como una declaración de condiciones instantáneas, cabe mencionar que dicha representación es sin considerar cantidades complejas ni fasores ya que siempre es cierto que la potencia instantánea es igual al producto del voltaje y corriente instantáneos. Dicha afirmación se puede interpretar matemáticamente con cada variable en función del tiempo.

$$P(t) = I(t).V(t)$$

En donde el tiempo (t) es el mismo para todas las variables.

Para el caso de sistemas de potencia, los datos de la potencia instantánea no son muy requeridos, ya que por lo general se necesita saber la potencia transmitida o consumida en valores de tiempo mayores a $1/60$ de segundo, es por eso que es más importante obtener valores de potencia promediados durante ciclos completos de voltaje de corriente alterna.

Existen diferentes casos para el análisis de potencia en función del tiempo, el caso más simple es considerando una carga puramente resistiva que como ejemplo puede ser la carga de una lámpara incandescente, para éste caso el voltaje y corriente se encontrarán en fase. Por lo tanto la potencia media puede obtenerse del producto de los valores RMS (Root Mean Square) del voltaje y corriente. Esto es sin olvidar que es para el caso puramente resistivo por lo que se obtiene la siguiente expresión matemática y su representación gráfica se observa en la Figura 2.1.

$$P_{(promedio)} = I_{RMS} \cdot V_{RMS}$$

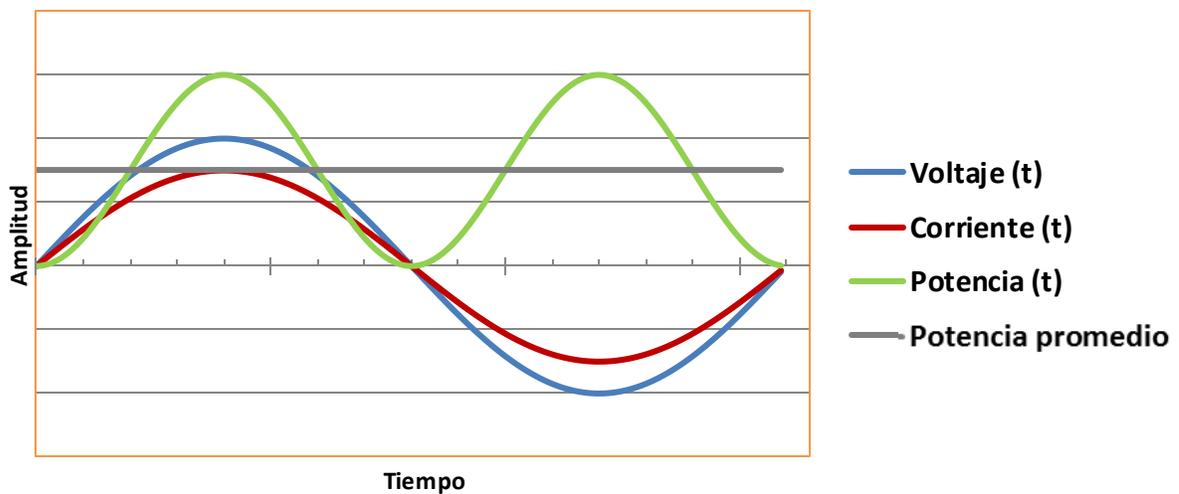


Figura 2.1. Representación de la potencia para carga puramente resistiva.

Ahora bien se puede encontrar otro caso de carga eléctrica, y es cuando se tiene una carga con reactancia, para éste caso el tiempo relativo del voltaje y corriente son desplazados uno respecto al otro, entonces se tiene que los máximos no son coincidentes entre ellos, de igual forma los cruces por cero no coinciden.

Al ser desplazadas las curvas de voltaje y corriente da como resultado que entre éstas existan diferencias tan significativas como el de signos o polaridad, ya que una onda se puede encontrar en la parte positiva y otra en la negativa, afectando así la potencia instantánea resultante de la carga, y debido a esto se pueden encontrar potencias

instantáneas con representación negativa, por lo tanto la potencia media es menor que para el caso resistivo.

Dicha representación se muestra en la Figura 2.2, ahora bien el signo negativo de la potencia instantánea se puede interpretar como si la potencia fluyera “hacia atrás” por medio de la línea de transmisión o fuera de la carga y así retornar hasta la fuente de suministro de la corriente eléctrica, la energía que es desplazada hacia adelante o hacia atrás es proveniente de los campos magnéticos de las cargas.

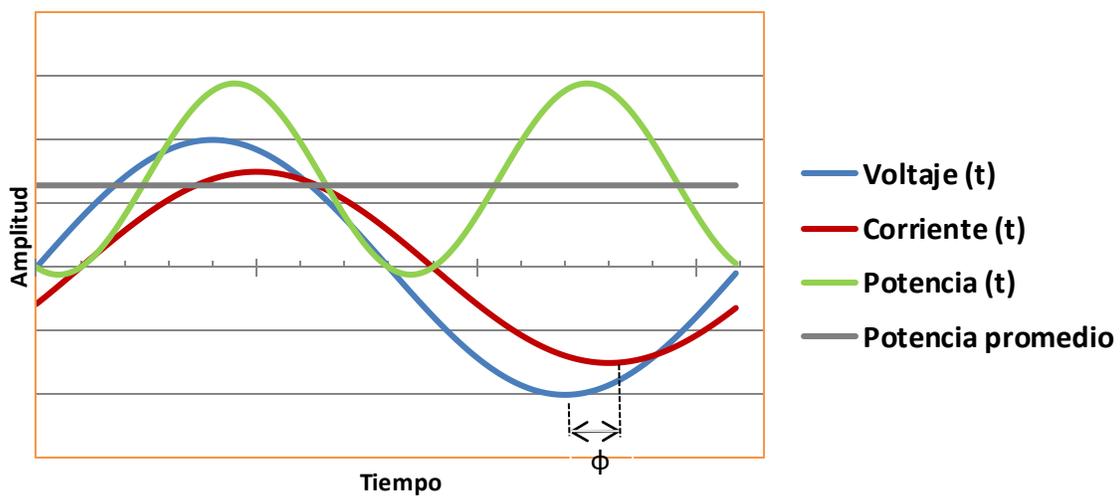


Figura 2.2. Representación de la potencia para carga con reactancia. Con retraso de corriente respecto a voltaje por el ángulo de fase ϕ .

La potencia media está directamente relacionada con la cantidad de cambio de fase entre tensión y corriente, entonces para obtener dicha potencia proveniente de un desfaseamiento del voltaje y corriente se da conforme a la siguiente expresión matemática.

$$P_{(promedio)} = I_{RMS} V_{RMS} \cos\phi$$

En donde $\cos\phi$ es llamado factor de potencia (f.p), pero si la potencia media está relacionada directamente con los valores máximos de corriente y voltaje entonces la ecuación anterior también se puede representar como:

$$P_{(promedio)} = \frac{1}{2} I_{max} V_{max} \cos \phi$$

La ecuación anterior se puede utilizar para cualquier tipo de carga, ya que para el caso puramente resistivo, es decir donde no existe desfase, el ángulo ϕ sería igual a cero, entonces $\cos 0 = 1$, por lo que el resultado de ésta ecuación no se vería afectado y sería idéntico al valor de la ecuación con representación de los valores RMS.

Ahora para el caso donde se tenga una carga puramente reactiva el valor de ϕ sería de 90 grados, es decir el valor del factor de potencia sería de cero, representando así una potencia media igual a cero, indicando que la potencia sólo oscila de ida y de vuelta.

La potencia promedio también se le denomina como potencia real, ya que es la potencia que realmente es transmitida o consumida por la carga, mientras que el producto de la corriente y voltaje sin importar el desfase de los mismos se le denomina potencia aparente, la cual anteriormente ya fue mencionada en cantidades complejas, pero para evitar adentrarse en ecuaciones complejas y representación de fasores, la potencia aparente (representada por la letra "S") se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$S = I_{RMS} V_{RMS}$$

Aunque aparentemente la potencia real, activa o potencia media y la potencia aparente tengan las mismas unidades de representación, éstas se expresan de diferente forma para diferenciarse una de otra, para la potencia aparente la unidad de medida son los voltios-amperios representados por las siglas VA, mientras que para la potencia real son los vatios, representados por la letra W proveniente del inglés Watts.

Típicamente los equipos con alta demanda de energía se denotan en kVA o MVA, esto debido a que refiriéndose a la capacidad del equipo, es de mayor utilidad conocer la potencia aparente, debido a que la energía aparente es una manera apropiada de indicar la corriente, ya que el voltaje de una carga es generalmente constante, además que la

energía aparente no depende del factor de potencia. Es decir la potencia aparente representa un mejor valor de corriente que la representada por la potencia real.

Por último se encuentra la potencia reactiva, siendo ésta la componente de la energía que oscila hacia adelante y hacia atrás a través de las líneas de suministro, cierta energía no se pudo disipar y es proveniente del intercambio entre los campos eléctricos y magnéticos, la potencia reactiva es representada por la letra “Q” y su magnitud está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = I_{RMS}V_{RMS}\sin\phi$$

Ahora bien si se tiene un caso puramente resistivo donde no existe desfase, entonces $\phi = 0$ y se aplica la ecuación anterior, se tiene que $\sin\phi = 0$, indicando entonces que no existe potencia reactiva, dicha potencia se expresa en VAR para denotar voltios-amperios-reactivos, o también se puede encontrar como Var o VAR.

La relación entre la potencia real, aparente y reactiva se puede representar mediante el triángulo de potencias, en la Figura 2.3 se observa dicho triángulo y la dependencia existente entre las potencias representadas por vectores y el factor de potencia.

Por ejemplo se observa el vector de la potencia aparente en la cual la proyección del mismo sobre el eje real, tiene una magnitud “P” correspondiente a la potencia real, mientras que la proyección al eje imaginario tiene una magnitud “Q” que corresponde a la potencia reactiva, es decir “S” es la suma de vectores de “P” y “Q”. El ángulo de inclinación ϕ indica la diferencia de fase entre voltaje y corriente.

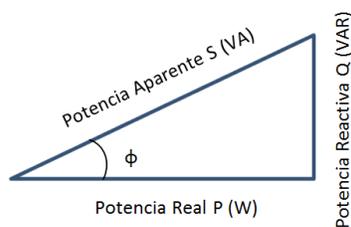


Figura 2.3. Triángulo de potencias.

Por el contrario un factor menor de 1 indica que se necesita de un mayor de consumo de energía para producir un trabajo útil. El bajo factor de potencia es originado por cargas inductivas, que son necesarias para el correcto funcionamiento de algunos equipos, sin embargo existen algunas alternativas para compensar el consumo reactivo.

Cabe mencionar que se necesita realizar un estudio completo de calidad de la energía para identificar la forma más óptima de corrección de factor de potencia. Las principales maneras de compensar son mediante arreglos de bancos de capacitores siendo cargas lineales, y/o mediante filtros de armónicos que son no lineales, además los arreglos se pueden combinar para obtener el mejor desempeño para cada aplicación. Sin embargo estos arreglos son para equipos en donde no se puede modificar su estructura o control, ya que para el caso en específico de driver para LEDs, se pueden diseñar circuitos “inteligentes” para compensar el factor de potencia.

Existen diversos beneficios al tener un factor de potencia bueno como:

- Disminución de pérdidas en los conductores
- Reducción de las pérdidas de las caídas de tensión
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores y líneas
- Incremento de la vida útil de las instalaciones eléctricas
- Reducción del costo de facturación de energía eléctrica
- Menor consumo de energía
- Incremento de vida útil de transformadores

En general un mal factor de potencia en la instalación eléctrica puede reducir el tiempo de vida útil de los aparatos eléctricos que estén conectados a la red, ya que como se observó existe un desfase del voltaje y corriente, este desfase afecta los equipos al suministrar primero el voltaje o corriente al equipo y no suministrándolos ambos al mismo tiempo. Ya que como ejemplo se pueden citar que existen equipos eléctricos-electrónicos los cuales operan bajo esquemas de fuentes por caída de tensión, y para el caso de atraso de voltaje estos tipos de fuentes se ven afectados por tensiones elevadas durante el tiempo de desfase.

Ahora haciendo referencia en particular a productos de iluminación, existen regulaciones (que se verán más adelante) donde se pretende tener productos con factores de potencia altos y que dichas exigencias dependerán de la potencia consumida por los mismos productos

Sin embargo no sólo se le da un enfoque al producto, ya que también se controlan los niveles de factor de potencia en un conjunto, es decir en toda la instalación eléctrica del consumidor, ya que existen penalizaciones y/o bonificaciones por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por factores de potencia por debajo de .9 y mayores a .9 como se muestra en la Tabla 2.1, es importante mencionar que estas regulaciones se presentan principalmente en empresas o industrias donde el consumo de energía es alto.

Tabla 2.1. Bonificaciones y/o penalizaciones por factor de potencia [2].

Concepto	f.p	Fórmula	% Máximo aplicable
Bonificación	> .9	$\frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{90}{F.P} \right) \right] * 100$	2.5
Penalización	< .9	$\frac{3}{5} \left[\left(\frac{90}{F.P} \right) - 1 \right] * 100$	120

Regulaciones y/o recomendaciones para el uso y exposición a fuentes de iluminación LED [3,4,5].

En muchas ciudades y/o naciones existen normas o reglamentos para establecer estándares en los requerimientos de las fuentes de iluminación LED, esto con el objetivo de minimizar los costos sin perjudicar la calidad de iluminación.

Un LED es un dispositivo electrónico semiconductor que emite un flujo luminoso al ser alimentado de corriente, que puede formar dispositivos en conjunto, para así crear diferentes fuentes de iluminación de estado sólido. Antes de abordar sobre la normatividad, se debe de tener claro a qué tipo de dispositivo se hará referencia. En la

Tabla 2.2 se enlistan los diferentes dispositivos de iluminación basados en tecnología de iluminación de estado sólido (LEDs), así como una breve descripción de los mismos.

Tabla 2.2. Dispositivos de iluminación LED [3].

Dispositivo	Descripción	Imagen
<p><i>Módulos de LEDs</i></p>	<p>Son unidades integradas en conjunto por más de un LED, y que pueden o no contener componentes de tipo óptico, mecánico, eléctrico y/o electrónico, además dichos módulos pueden incluir o no un controlador LED.</p>	 <p>Módulo con controlador</p>
		 <p>Módulo sin controlador</p>
<p><i>Lámpara de LEDs</i></p>	<p>Son fuentes de iluminación LED, integradas por un módulo LED y controlador integrado, con un flujo luminoso direccional u omnidireccional, que cuentan con base para ser alimentadas directamente a la red de energía eléctrica. Generalmente se usan para iluminar espacios pequeños.</p>	 <p>Lámpara con flujo direccional</p>
		 <p>Lámpara con flujo omnidireccional</p>
<p><i>Luminarios de LEDs</i></p>	<p>Son equipos de iluminación LED, integrados por uno o varios módulos LED, con controlador incluido, un disipador de calor y con un</p>	 <p>Luminario uso interior</p>

	<p>componente óptico para la distribución de iluminación requerida. Generalmente se usan para iluminar espacios grandes.</p>	 <p>Luminario uso exterior</p>
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ahora bien las normas son un conjunto de lineamientos técnicos, que para éste caso deben de cumplir los dispositivos basados en LEDs, ya sea de forma independiente o en conjunto, dichas regulaciones pueden tener como objetivo el mantener la seguridad del dispositivo, así como regular los requerimientos mínimos de eficiencia energética o del desempeño del producto.

Para el caso de México, existen dos tipos de Normas, primeramente se encuentran las NOM (Normas Oficiales Mexicanas), que son regulaciones técnicas de carácter obligatorio expedidas por la autoridad competente, esto conforme a ley Federal de Metrología y Normalización, en la cual se establecen las reglas, variantes, características o prescripciones aplicables al producto y/o proceso de prueba, esto haciendo referencia a los parámetros con que cuentan las fuentes de iluminación.

Mientras que por otro lado se encuentran las NMX (Normas Mexicanas), que son restricciones de carácter voluntario, las cuales sólo expresan recomendaciones de los parámetros o procedimientos para certificación de productos.

Ambas normas mexicanas son documentos técnicos, los cuales especifican las características que deben de cumplir los procesos o productos, para así poder definir un índice o grado de calidad fomentando la competitividad de mejores productos.

En la Tabla 2.3 se mencionan las principales normas que regulan le eficiencia energética, el desempeño y seguridad, de productos de iluminación basados en tecnología LED, dichas regulaciones son las establecidas en México y Estados Unidos.

Tabla 2.3. Principales regulaciones obligatorias de iluminación LED [3].

País	Norma	Descripción
México	<i>NOM-030-ENER-2012</i> Norma de eficiencia energética (SENER)	Regulaciones técnicas para lámparas LED integradas para iluminación general. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas, radiométricas y fotométricas.
	<i>NOM-031-ENER-2012</i> Norma de eficiencia energética (SENER)	Regulaciones técnicas para luminarias basadas en LEDs, destinadas a vialidades y áreas exteriores públicas. Con funcionalidad de cumplir con características radiométricas y fotométricas.
Estados Unidos	<i>UL-870-2009</i> Norma de seguridad (UL)	Regulaciones técnicas para LEDs, lámparas LED y luminarias LED para uso interior, exterior y de alumbrado público. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas y mecánicas.
	<i>ANSI C78.377-2008</i> Norma de desempeño (ANSI)	Regulaciones técnicas para LEDs, lámparas LED y luminarias LED para uso interior, exterior y de alumbrado público. Con funcionalidad de cumplir con características de cromaticidad.
	<i>ANSI C136-37-2011</i> Norma de desempeño (ANSI)	Regulaciones técnicas para luminarias LED, para uso exterior y de alumbrado público. Con funcionalidad de cumplir con características de desempeño fotométrico y radiométrico.
	<i>NEMA SSL3-2010</i> Norma de desempeño (NEMA)	Regulaciones técnicas para LEDs de color blanco de alta potencia para iluminación general. Con funcionalidad de cumplir con características de rangos de binning (variaciones de: color vs temperatura).

Ahora bien para restricciones no regulatorias, las principales especificaciones de aplicación voluntaria para sistemas de iluminación LED en México y Estados Unidos, se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Principales regulaciones no obligatorias entorno a iluminación LED [3].

País	Regulación	Descripción
México	<i>ESP-4139-2014</i> Regulación de eficiencia energética (FIDE)	Regulaciones técnicas para luminarias LED, para uso de vialidades y áreas peatonales. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas, fotométricas, radiométricas, de calidad, seguridad y eficiencia energética.
	<i>ESP-4171-2014</i> Regulación de eficiencia energética (FIDE)	Regulaciones técnicas para lámparas LED y luminarias LED, de uso interior con flujo direccional y omnidireccional. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas, fotométricas, radiométricas, de calidad, seguridad y eficiencia energética.
Estados Unidos	<i>SSL-V 1.3-2012</i> Regulación de eficiencia energética (EnergyStar)	Regulaciones técnicas para productos de estado sólido para uso interior y exterior. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas, radiométricas y de eficiencia energética.
	<i>SSL-V1.4-2014</i> Regulación de eficiencia energética (EnergyStar)	Regulaciones técnicas para lámparas LED con flujo direccional y omnidireccional. Con funcionalidad de cumplir con características eléctricas, radiométricas y de eficiencia energética.
	<i>IES LM 79-08</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas de parámetros eléctricos y fotométricos para luminarias de iluminación de estado sólido y LEDs. Con funcionalidad de determinar el flujo luminoso, la distribución de la intensidad luminosa, consumo, la eficacia luminosa calculada y de características cromáticas.
	<i>IES LM 80-08</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas de parámetros de flujo luminoso para LEDs y módulos LED. Con funcionalidad de determinar con el flujo luminoso mantenido en las fuentes de iluminación LED.
	<i>IES LM 82-12</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas de parámetros eléctricos y fotométricos para lámparas LED y módulos LED. Con funcionalidad de determinar las características eléctricas y fotométricas en función de parámetros térmicos.
	<i>IES LM 84-14</i>	Regulaciones técnicas de parámetros de mantenimiento de color y

Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	flujo luminoso para módulos LED, lámparas LED y luminarias LED. Con funcionalidad de determinar las características fotométricas y mantenimiento de flujo luminoso y color.
<i>IES LM 85-14</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas de parámetros fotométricos de LEDs de alta potencia. Con funcionalidad de determinar las características fotométricas y eléctricas.
<i>IES LM 86-15</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas de parámetros de mantenimiento de color y flujo luminoso de fósforo remoto, para módulos de LEDs. Con funcionalidad de determinar las características fotométricas y radiométricas.
<i>IES TM 28-14</i> Regulación del método aprobado de desempeño (IES)	Regulaciones técnicas para la estimación del flujo luminoso mantenido a largo tiempo, para lámparas y luminarias LED. Con funcionalidad de determinar la proyección del flujo luminoso mantenido a largo tiempo.

Para el caso exclusivo de México se constituyó en 1990 el fideicomiso FIDE por iniciativa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en apoyo al Programa de Ahorro de Energía Eléctrica; para coadyuvar en las acciones de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica [6].

Las normas antes citadas son exclusivamente para valorar o estandarizar las características de eficiencia energética y/o desempeño de las fuentes de iluminación. Sin embargo existe una norma mexicana (NOM 025-STPS-2008 [7]) la cuál es importante mencionar ya que rige los lineamientos básicos para los niveles de iluminación en los sitios de trabajo, ya que como se sabe pueden existir efectos biológicos a causa de la exposición a fuentes de iluminación artificial. Dicha norma busca principalmente controlar una correcta iluminación dependiendo del área y tarea a realizar en los centros de trabajo, esto con el objetivo de mejorar el desempeño de las funciones del empleado, debido a que una apropiada iluminación, hace al espacio de trabajo un lugar productivo, seguro y saludable.

Conforme a la norma oficial mexicana que establece las especificaciones para lámparas LED integradas para iluminación en general, así como los métodos de prueba aplicables para comprobar las mismas (NOM-030-ENER-2012)[8], y cuyo objetivo es el propiciar al uso eficiente y ahorro de energía, a continuación se muestran una serie de especificaciones correspondientes a lámparas LED. Por lo que en la Tabla 2.5 se muestra la eficacia luminosa mínima que puede presentar una lámpara LED.

Tabla 2.5. Eficacia luminosa mínima para lámpara LED omnidireccional, según NOM-030-ENER-2012.

Intervalo de flujo luminoso total nominal (lm)	Eficacia luminosa mínima (lm/W)
0 a 325	50
325 a 450	50
450 a 800	55
800 a 1100	55
1100 a 1600	55
Mayor que 1600	55

Para el caso del flujo luminoso total nominal, que presentan todas las lámparas LED integradas omnidireccionales, este no debe ser menor al 90 %, del valor nominal marcado en el producto.

Mientras que para la característica de la Temperatura de Color Correlacionada (CCT), en la Tabla 2.6, se muestran los parámetros de tolerancia con las que puede contar una lámpara LED omnidireccional. Además que los datos de dicha tabla son los mismos parámetros contemplados para una CCT mantenida, esto después de un período de prueba del 25 % de vida útil, con una duración máxima de 6 000 h.

Tabla 2.6. Tolerancia de CCT.

CCT nominal (°K)	Tolerancia del rango de la CCT (°K)
2 700	2 580 - 2 870
3 000	2 870 - 3 220
3 500	3 220 - 3 710
4 000	3 710 - 4 260
5 000	4 260 - 5 311
6 500	6 020 - 7 040

Para el flujo luminoso total mínimo que debe mostrar la lámpara LED, se deben de contemplar los datos mostrados en la Tabla 2.7, esto conforme al período de prueba del 25 % de vida útil, con duración máxima de 6 000 h.

Tabla 2.7. Flujo luminoso total mínimo mantenido.

Vida útil nominal (h)	Flujo luminoso total mínimo mantenido (%)
< 15,000	83.2
15,000 a 20,000	86.7
20,000 a 25,000	89.9
25,000 a 30,000	91.8
30,000 a 35,000	93.1
35,000 a 40,000	94.1
40,000 a 45,000	94.8
45,000 a 50,000	95.4
≥ 50,000	95.8

Respecto a la calidad de iluminación todas las lámparas LED omnidireccionales deberán de tener un Índice de Reproducción de Color (CRI) mínimo de 77. En cuanto al factor de potencia (FP), todas las lámparas con una potencia eléctrica mayor de 5 W, deberán de presentar un FP mayor a 0.7, mientras que para las que consumen una potencia menor a 5 W no es necesario indicar el FP.

Ahora bien para el caso de programas gubernamentales no regulatorios, los Estados Unidos, tienen a el programa EnergyStar, el cual es una iniciativa que fomenta el uso de tecnologías eficientes, y que trabaja en conjunto con el Departamento de Energía de los EE.UU. (DOE), siendo además administrada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) [9]. Conforme a esta regulación de carácter voluntario, a continuación se muestran las principales características que deben de cumplir las fuentes de iluminación basadas en tecnología LED. Cumpliendo esta regulación se puede obtener el sello EnergyStar, conforme al documento de regulación publicado por el mismo programa [10].

En la Tabla 2.8 se muestran los valores que deberán de cumplir los tipos de lámpara en función de la potencia nominal y la eficacia inicial que pueden presentar

Tabla 2.8. Requerimientos de la regulación Energy Star (U.S.A.) potencia vs eficacia.

Tipo de lámpara	Potencia nominal de lámpara (Watts)	Eficacia mínima inicial (lm/W)
<i>Omnidireccional</i>	< 15	55
	≥ 15	65
<i>Direccional</i>	< 20	40
	≥ 20	50
<i>Decorativa</i>	<15	45
	15 ≤ W < 25	50
	≥ 25	60

Para el caso de la Temperatura de Color Correlacionada (CCT), las Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL), así como las de Iluminación de Estado Sólido (SSL) deberán de representar valores de temperatura de color nominales conforme a la Tabla 2.9.

Tabla 2. 9. Requerimientos Energy Star para valores nominales de la CCT.

Lámpara	CFL	SSL
Valores nominales de la CCT		<ul style="list-style-type: none"> • 2700 K • 3000 K • 3500 K • 4000 / 4100 K • 5000 K • 6500 K

Mientras que para el Índice de Reproducción de Color (CRI), las diferentes lámparas deberán de cumplir con los valores presentados en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Requerimientos Energy Star sobre el CRI.

Tipo de lámpara	CRI	Requerimientos ENERGY STAR
<i>Fluorescente Compacta (CFL)</i>	≥80	El promedio de las unidades ensayadas para la obtención del sello Energy Star, deben de cumplir con el requisito de ≥ 80 de CRI , y no más del 30% de unidades pueden presentar un índice menor a 77 y ninguna unidad debajo del 75 de CRI
<i>Estado Sólido</i>	≥80	

Para garantizar la permanencia de color de las fuentes de Iluminación de Estado Sólido, debido a que se pueden dar cambios de cromaticidad, a causa del propio desgaste del dispositivo, se contemplan los requerimientos de la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Requerimientos Energy Star sobre cromaticidad.

Tipo de lámpara	Requerimientos ENERGY STAR
<i>Estado Sólido</i>	La cromaticidad que presenta la lámpara en cualquier punto de medición a partir de las 0 hasta las 6000 horas de uso, podrá contemplar una variación total de cromaticidad de 0.007 en el Diagrama CIE 1976 u'v', dicha relación la pueden presentar el 90% o más de las lámparas.

Ahora para certificar que no exista un alto porcentaje de variación de flujo luminoso debido al tiempo de trabajo, se contemplan los requerimientos de la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Requerimientos Energy Star flujo luminoso vs vida útil.

Tipo de lámpara	Requerimientos ENERGY STAR																		
<p><i>Fluorescente Compacta (CFL)</i></p>	<p>Después de las 1000 horas de uso de la lámpara deberá presentar un flujo luminoso mayor o igual al 90 % del flujo inicial, y un flujo mayor del 80 % al 40% de la vida nominal de la lámpara.</p> <p>Dichos requerimientos lo puede presentar el 90% o más de las lámparas analizadas, además que ninguna pueden presentar un flujo menor del 90 % pasando las 1000 horas de uso y no más de 30 % de lámparas podrán presentar un flujo inferior al 70% al 40% de vida útil.</p>																		
<p><i>Estado Sólido</i></p>	<p>La lámpara después de la prueba de 6000 horas, debe presentar un porcentaje de flujo luminoso de cero horas. Conforme a esto se analiza el porcentaje mínimo de permanencia de flujo luminoso de las lámparas, conforme a la tabla siguiente.</p> <p>Dicha permanencia o constancia de flujo luminoso la debe de presentar el 90% o más de las lámparas a caracterizar</p> <table border="1" data-bbox="456 890 1377 1339"> <thead> <tr> <th data-bbox="461 890 899 936">Máximo tiempo de vida obtenido (hrs)</th> <th data-bbox="904 890 1372 936">Mínimo porcentaje de constancia de flujo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="461 942 899 989">15 000</td> <td data-bbox="904 942 1372 989">86.7 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 995 899 1041">20 000</td> <td data-bbox="904 995 1372 1041">89.9 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1047 899 1094">25 000</td> <td data-bbox="904 1047 1372 1094">91.8 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1100 899 1146">30 000</td> <td data-bbox="904 1100 1372 1146">93.1 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1152 899 1199">35 000</td> <td data-bbox="904 1152 1372 1199">94.1 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1205 899 1251">40 000</td> <td data-bbox="904 1205 1372 1251">94.8 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1257 899 1304">45 000</td> <td data-bbox="904 1257 1372 1304">95.4 %</td> </tr> <tr> <td data-bbox="461 1310 899 1339">50 000</td> <td data-bbox="904 1310 1372 1339">95.8%</td> </tr> </tbody> </table>	Máximo tiempo de vida obtenido (hrs)	Mínimo porcentaje de constancia de flujo	15 000	86.7 %	20 000	89.9 %	25 000	91.8 %	30 000	93.1 %	35 000	94.1 %	40 000	94.8 %	45 000	95.4 %	50 000	95.8%
Máximo tiempo de vida obtenido (hrs)	Mínimo porcentaje de constancia de flujo																		
15 000	86.7 %																		
20 000	89.9 %																		
25 000	91.8 %																		
30 000	93.1 %																		
35 000	94.1 %																		
40 000	94.8 %																		
45 000	95.4 %																		
50 000	95.8%																		

Sin importar el modelo, todas las lámparas con un consumo mayor o igual a 5 watts, según los requerimientos de Energy Star, se deben de cumplir con los valores de factor de potencia presentados en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Requerimientos Energy Star F.P.

Tipo de lámpara	Factor de potencia mínimo
Fluorescente Compacta (CFL)	0.5
Estado Sólido	0.7

Para el caso en el que las lámparas se operen en corriente alterna, las frecuencias de operación de las fuentes de iluminación conforme a los requerimientos mínimos que debe de presentar cada tipo de lámpara se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Requerimientos Energy Star sobre frecuencia de luz de salida.

Tipo de lámpara	Frecuencia de salida de la luz proveniente de la lámpara
Fluorescente Compacta (CFL)	se debe de encontrar dentro de 20 a 33kHz, o con frecuencias superiores a los 40kHz.
Estado Sólido	debe de ser igual o mayor a 120 Hz.

En la Tabla 2.15 se describen las restricciones que deben de cumplir las lámparas, para regular el tiempo de estabilización del flujo luminoso y con esto obtener el sello de Energy Star. La tabla muestra el tiempo que puede tardar la lámpara para estabilizar la luz de salida, es decir inmediatamente después de suministrar la corriente eléctrica.

Tabla 2.15. Requerimientos Energy Star tiempo de estabilización.

Tipo de lámpara	Máximo tiempo requerido para estabilizar la luz de salida
Lámparas fluorescentes cubiertas	≥ 120 seg (para alcanzarel 80%del flujo luminoso estable).
Todas las demás lámparas fluorescentes	≤ 60 seg (para alcanzarel 80%del flujo luminoso estable).
Todos los demás modelos de lámparas	≤ 1 seg.

Ahora bien para vigilar y/o acreditar el cumplimiento de las normas de carácter obligatorio y/o voluntario, existen entidades privadas o gubernamentales acreditadas por la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) y aprobadas por la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), algunas de estas entidades encargadas de la certificación se mencionan a continuación [11].

ANCE (Asociación Nacional de Normalización y Certificación) [12]. La ANCE es una institución privada para brindar apoyo en materia de certificaciones del sector eléctrico, la

cual para el área de iluminación puede realizar pruebas de seguridad eléctrica y prueba de eficiencia energética para certificación de:

- Lámparas fluorescentes compactas autobalastadas
- Lámparas de uso general
- Lámparas con diodos emisores de luz (LED)
- Luminarias con LEDs, destinadas a vialidades y áreas exteriores públicas
- Luminarias LED

UL de México [13]. La UL es un organismo de acreditación que con respecto a iluminación contempla principalmente la certificación de productos conforme a las normas:

- NOM-032-ENER-2013
- NOM-001-SCFI-1993
- NOM-016-SCFI-1993
- NOM-019-SCFI-1998
- NOM-058-SCFI-1999
- NOM-003-SCFI-2000

Además también contempla certificación de restricciones no regulatorias (NMX) como:

- NMX-J-508-ANCE-2010
- NMX-J-515-ANCE-2008

NYCE (Normalización y Certificación Electrónica) [14]. Es un organismo en el desarrollo de estándares y evaluación de conformidad conforme a normas nacionales

(NOM, NMX) e internacionales (ISO, IEC), y que respecto a iluminación certifica la acreditación de las normas:

- NOM-058-SCFI
- NOM-064-SCFI-2000
- NMX-J-024

Así también NYCE certifica la aprobación de estándares no regulatorios (NMX) como:

- NMX-I-201-NYCE
- NMX-I-202-NYCE
- NMX-I-203-NYCE
- NMX-I-204-NYCE
- NOM-017-ENER/SCFI
- NOM-028-ENER
- NOM-030-ENER
- NOM-031-ENER

Intertek [15]. Intertek es una empresa de inspección de pruebas de productos y certificaciones, que cuenta contando con una amplia gama en servicios de certificación para pruebas de rendimiento en productos de iluminación, con las cuáles se pueden obtener los estándares y certificaciones de:

- Energy Star
- California Energy Commission (CEC)
- Department of Energy (DOE)
- DesinLights Consortium (DLC)
- Energy-related Products (ErP) Directive
- National Resources Canada (NrCan)

- LED Lighting Facts

Es importante mencionar que para México no existen regulaciones o normatividades que sean competitivas con el resto del mundo, ya que como se observó se encuentra una mayor cantidad de normas obligatorias y/o recomendaciones por parte de Estados Unidos, que de México. Además de que se necesita de una mayor normatividad Mexicana, también es indispensable abarcar todos los parámetros que conlleva un producto de iluminación y los efectos o consecuencias que se pueden encontrar por la exposición a este tipo de iluminación. Aunque se sabe que el abarcar todas las características de iluminación no es nada fácil, es una tarea que se debe de realizar en México por esto, también debería de existir una Norma Oficial Mexicana que mitigara el uso de fuentes de iluminación, que pudieran ocasionar perturbaciones al medio ambiente, así como también daños biológicos tanto al ser humano como a los demás seres vivos.

Conforme a la NOM 030 y a las regulaciones propuestas por EnergyStar, se observó que llegan a contemplar algunos parámetros semejantes. Sin embargo no se indica si existe algún tipo de colaboración por ambos programas regulatorios. Además que existen productos comercializándose a nivel nacional con certificaciones extranjeras, y sin contemplar regulaciones o normatividades nacionales, por lo que también sería adecuado que el gobierno federal impusiera sanciones para aquellos fabricantes, proveedores y/o comerciantes, de los cuáles sus productos no cumplan con la normatividad propuesta, con lo que se mitigaría el uso de productos no eficientes y/o dañinos.

Referencias.

- [1] Alexandra von Meier “Electric Power Systems a conceptual introduction”, IEEE Ed Wiley Interscience a John Wiley, 2006.
- [2] “Factor de Potencia”, CFE Comisión Federal de Electricidad, via @cfe, <http://www.cfe.gob.mx/industria/ahorroenergia/lists/ahorro%20de%20energa/attachme nts/3/factordepotencia1.pdf>, Accesado 25-12-2016.
- [3] “Normas y especificaciones para los sistemas de iluminación LED” via @iluminet, <http://www.iluminet.com/normas-especificaciones-sistemas-iluminacion-led/>, Accesado 28-10-2016.
- [4] “ema, entidad mexicana de acreditación” via @ema, http://www.ema.org.mx/portal_v3/, Accesado 3-01-2017.
- [5] “CONUEE Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía”, via @gob, <https://www.gob.mx/conuee>, Accesado 3-01-2017.
- [6] “FIDE” via @fide, <http://www.fide.org.mx/>, Accesado 3-01-2017.
- [7] “Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008”, via @dof, http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5076393&fecha=30/12/2008, Accesado 20-09-2016.
- [8] Secretaria de Energía “Norma Oficial Mexicana NOM-030-ENER-2012”, Diario Oficial, 28-56 p. Junio 2012.
- [9] Illuminating Engineering Society of North America “The IESNA Lighting Handbook”, Ed. Illuminating Engineering Society, Ninth Edition, 1035 p, 2000.
- [10] Energy Star “Energy Star Program Requirements for Lamps (Ligh Bulbs)”, Energy Star, 25 p. August 2014.

[11] “¿Quién certifica el cumplimiento de las Normas Oficiales de los productos de iluminación”, via @iluminet, <http://www.iluminet.com/certificacion-nom-conuee-ema-iluminacion/>, Accesado 10-10-2016.

[12] “ANCE”, via @ance, <http://www.ance.org.mx/>, Accesado 15-01-2017.

[13] “UL de México”, via @ul, <http://www.ul.com/>, Accesado 15-01-2017.

[14] “NYCE, Normalización y Certificación Electrónica S.C”, via @nyce, <https://www.nyce.org.mx/>, Accesado 15-01-2017.

[15] “Intertek”, via @intertek, <http://www.intertek.com/>, Accesado 15-01-2017.

ESTUDIO COMPARATIVO

Nuestro estudio comparativo comenzó analizando las opciones de estudio. Para las aproximaciones en primera instancia se analizaron a qué tipos de fuentes de iluminación se debería de enfocar el estudio. Existen diversos grupos o áreas de iluminación que se pueden agrupar en:

- iluminación exterior
- iluminación interior
- iluminación portátil
- iluminación automotriz

El grupo de iluminación en donde se centró esta tesis es en iluminación interior, ya que es donde existe una mayor demanda en iluminación LED, además que es el tipo de iluminación en donde el usuario tiene un mayor tiempo de exposición. Posterior a ésta elección se determinó sobre qué temperatura de color trabajar, ya que principalmente se encuentran fuentes de iluminación LED en blanco frío y blanco cálido.

Se eligió el blanco frío por tener mayor representación en el mercado, además de ser fuentes de iluminación que presentan una mayor eficacia lumínica que las de temperatura cálida, esto refiriéndose a fuentes de iluminación basada en LEDs. La mayor eficacia lumínica que presenta el blanco frío puede ser una razón de su mayor demanda.

Ahora bien, teniendo claramente limitado los parámetros anteriores, sólo falta especificar en qué rango de potencias trabajar, ya que existen fuentes de iluminación con diferentes potencias eléctricas. Debido a esto, en esta tesis se decide limitar el estudio para fuentes de iluminación menores a 10 Watts, ya que aproximadamente una lámpara LED de 9 W representa a un foco fluorescente de 15 W y un incandescente de 60 W, que provee alrededor de 800 lm, los cuales se pueden utilizar para iluminación interior en general, en espacios que van de 4m² a 8m² [1], siendo el tamaño promedio encontrado en el hogar u oficina.

En resumen, según las especificaciones anteriores, el estudio se realizó sobre fuentes de Iluminación de Estado Sólido (SSL Solid State Lighting), para iluminación interior, con temperaturas de color blanco frío, y con potencias eléctricas menores a 10 W.

Después de esta elección se realizó la compra de diferentes lámparas basadas en LEDs, utilizadas en iluminación interior de casa habitación, de la cual se abarcaron diferentes marcas comerciales como: Philips, Osram, Sanelec, Smartlight, etc.

Con dicha compra se procedió a analizar qué tipos de LEDs tienen dichas lámparas, ya que eso conduce a responder una de las preguntas principales de éste trabajo, el responder que tipo de LED es el más conveniente para un dispositivo de iluminación, además de analizar qué tipo de LEDs son los más adecuados, también se examinaron los diferentes diseños de drivers y diseño en general.

Es así como se adquirió una lámpara de luz blanca marca Smartlight de 7 W, la cual se muestra en la Figura 3.1, donde además se muestra el arreglo y tipo de LEDs que la conforman.

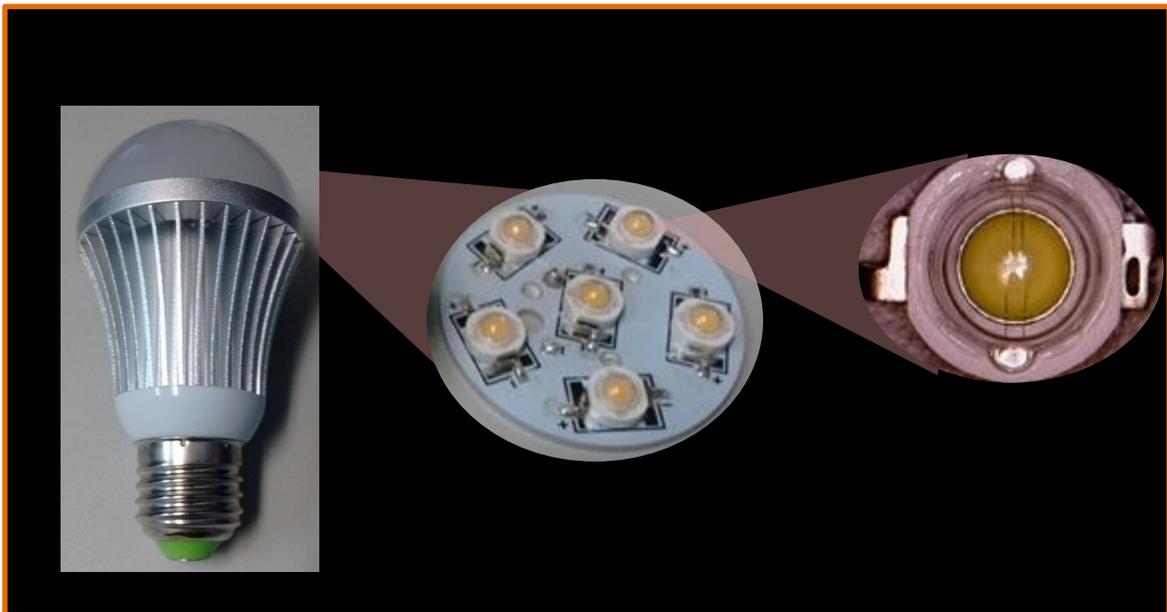


Figura 3.1. Lámpara Smartlight 7 W.

Los LEDs del arreglo en la Figura 3.1 se encuentran conectados en serie, dicho arreglo se compone de seis LEDs de potencia, cada LED es de 1 W con las dimensiones que se muestran en la Figura 3.2.

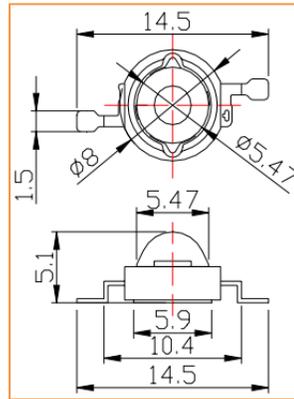


Figura 3. 2.Esquema de cada LED en la Fig. 3.1. Las dimensiones son en mm [2].

Mientras que para el caso de la marca Sanelec se muestra una lámpara de 9 W en la Figura 3.3, la cual se compone de un arreglo de 23 LEDs de montaje superficial (SMD, Surface Mount Device), los cuales son comercializados bajo el modelo 5730.

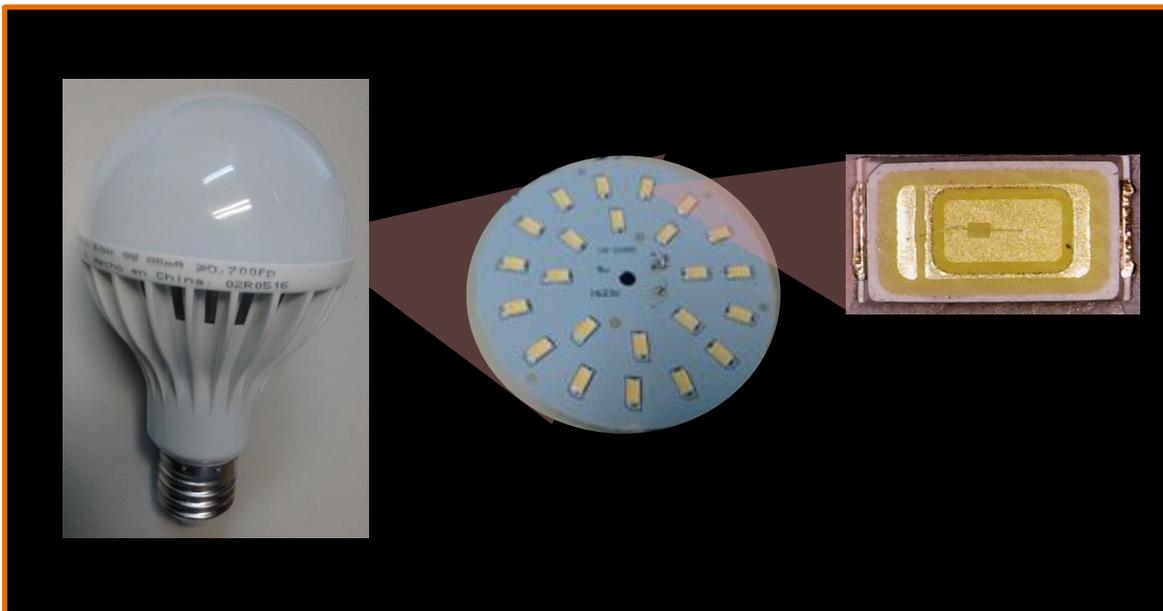


Figura 3.3. Lámpara Sanelec 9 W.

De igual forma lo LEDs encontrados en la lámpara Sanelec se encuentran conectados en serie, las dimensiones del LED SMD 5730 se muestran en la Figura 3.4.

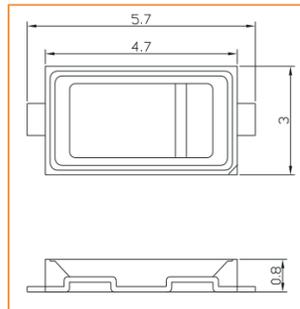


Figura 3.4. Esquema de cada LED SMD 5730 en la Fig. 3.3. Las dimensiones son en mm [3].

Otra de las lámparas adquiridas fue una de la marca NEOLUX producida por OSRAM, la lámpara de 9 W cuenta con un arreglo de 18 LEDs SMD como se muestra en la Figura 3.5.

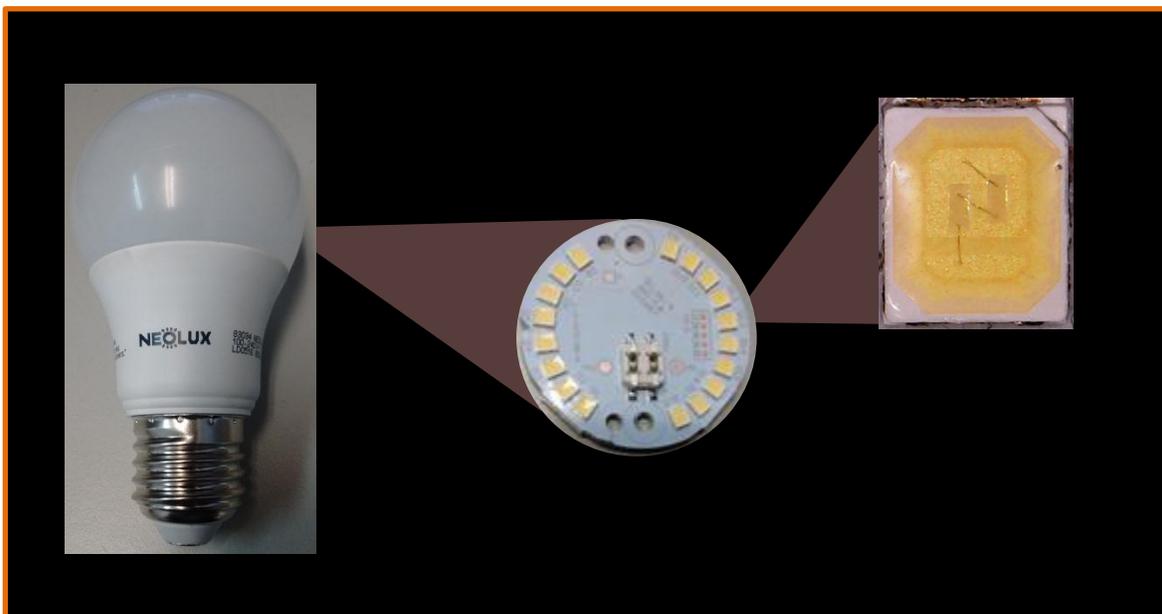


Figura 3.5. Lámpara Neolux 9 W.

Al igual que para los casos anteriores los LEDs del arreglo están conectados en serie, sin embargo cabe destacar que en la imagen del LED se puede observar y deducir que el LED cuenta con doble chip como se muestra en la Figura 3.6.

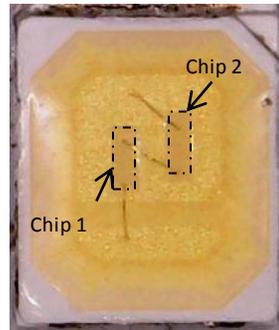


Figura 3.6. LED SMD de lámpara Neolux, con doble chip.

Además que los LEDs del arreglo de la lámpara Neolux se encuentran conectados en serie, se observa que en la imagen anterior los chips también se encuentran conectados en serie entre sí, es decir existe un total de 36 chips conectados en serie.

Las dimensiones del LED SMD 2835 Neolux se observan en la Figura 3.7.

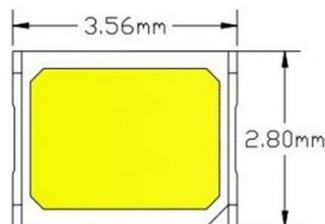


Figura 3.7. Dimensiones (mm) LED 2835 Neolux.

Por último la otra lámpara adquirida fue de la marca Philips de 9 W, para éste caso la lámpara no tiene una temperatura fría como las anteriores siendo de color blanco cálido, es por eso que el color del fósforo que recubre el LED no es amarillo como los anteriores, sin embargo se vuelve a encontrar un arreglo de LEDs SMD.

EL arreglo de LEDs consta de tan solo 8 LEDs SMD 2828, además también se percibe que cada LED consta de doble chip (ver Figura 3.8) similar a la lámpara Neolux, lo que hace un arreglo de 16 chips conectados en serie. Es importante subrayar que las lámparas que

cuentan con doble chip (Neolux, Philips) son marcas muy reconocidas y con gran desempeño en el área de iluminación.

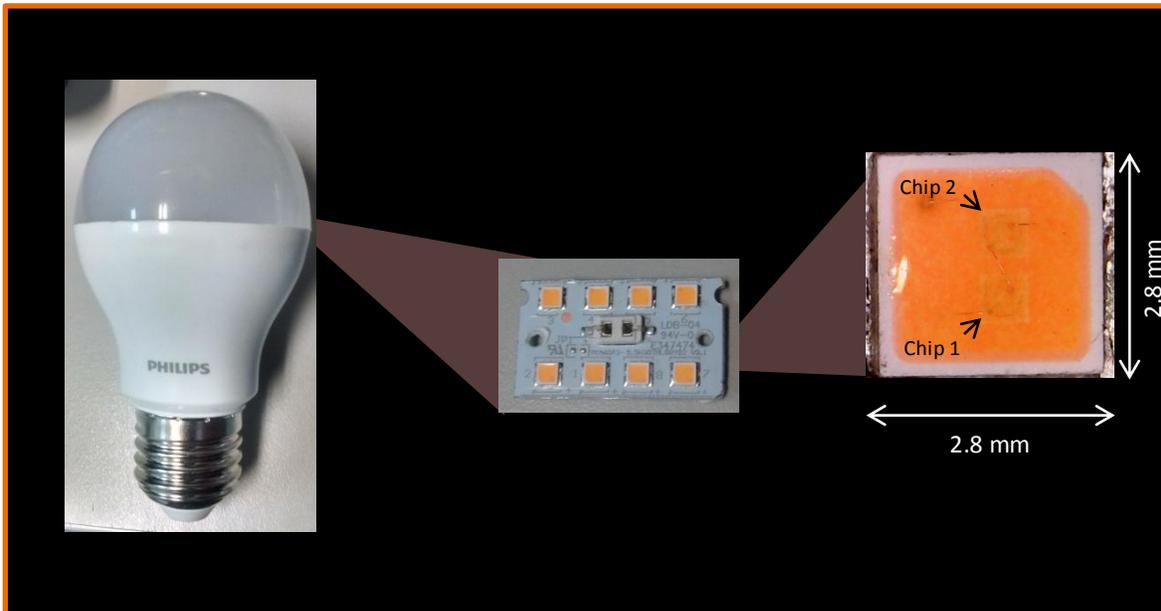


Figura 3.8. Lámpara Philips 9 W, de luz blanca no fría.

Conforme a los arreglos y tipos de LEDs observados en las lámparas, se distingue que los LEDs SMD están más presentes en las fuentes de iluminación de interiores, debido a esto se optó por la compra de diferentes tipos de LEDs para caracterizarlos y así poder deducir el por qué los LEDs SMD son más presenciales en este tipo de iluminación.

Para caracterizar los diodos emisores de luz fuentes es necesario de un equipo de medición, en donde se puedan obtener los parámetros de flujo luminoso, Índice de Reproducción de Color y la Temperatura de Color, para esto fue preciso el uso de la esfera integradora.

La esfera integradora como anteriormente se comentó, cuenta con superficies blancas difusas, con mínimos niveles de absorción en el espectro visible, sin embargo las muestras (LEDs) a caracterizar necesitan de disipadores de calor, o simplemente van montadas sobre placas que sirven como soporte y facilitan la manipulación de las mismas.

Entonces conforme a esto, existen diferentes materiales que se encontrarán dentro de la esfera y dichos componentes podrían afectar la medición, ya que pudiera existir reabsorción, por lo tanto se necesitan cubrir los componentes que puedan interferir con la medición, por lo que se necesita de algún material que se asemeje a la superficie interna de la esfera.

Para solucionar esto, se planteó cubrir los materiales con un tipo de pintura, ya que ésta puede cubrir fácilmente los componentes mencionados, para conocer que pintura se adecua a esta necesidad, en el siguiente apartado se realiza el correspondiente estudio de pinturas para recubrimiento.

Estudio de Pinturas Blancas

Para realizar las mediciones de LEDs dentro de la esfera integradora, se requiere que todo el dispositivo a medir no absorba luz. Ya que si la muestra que sujeta al LED absorbe luz, entonces la medición del flujo luminoso emitido será diferente al valor real. Así las monturas deberán de pintarse de blanco, por esta razón se efectuó una serie de mediciones de la reflectancia óptica de diversas pinturas blanco mate.

Primeramente se adquirieron tres pinturas en aerosol blanco mate de diferentes marcas, esto con el fin de caracterizar cada una y saber cuál es la más óptima. La pintura se usa como recubrimiento de las placas y/o de los disipadores de calor, en los cuales se montaron los LEDs que fueron caracterizados en la esfera integradora.

Las muestras de pintura a medir se prepararon con tres barras de acrílico, las cuales se cubrieron con cada tipo de pintura, para así manipular las muestras y medir la reflectancia de cada pintura. En la Figura 3.9 se muestran las tres barras de acrílico antes (a) y después de pintarse con cada pintura (b) y en (c) se muestran las tres marcas de pintura usadas.



Figura 3.9. (a) Barras de acrílico de prueba. (b) Barras de acrílico pintadas de blanco mate de tres distintos tipos. (c) Pinturas de prueba.

Después de tener las muestras pintadas se prosiguió a medir los espectros de reflectancia para cada muestra. Para esto se utilizó un espectrofotómetro en el espectro del campo visible, en la Figura 3.10 se observan las gráficas de reflectancia para cada pintura.

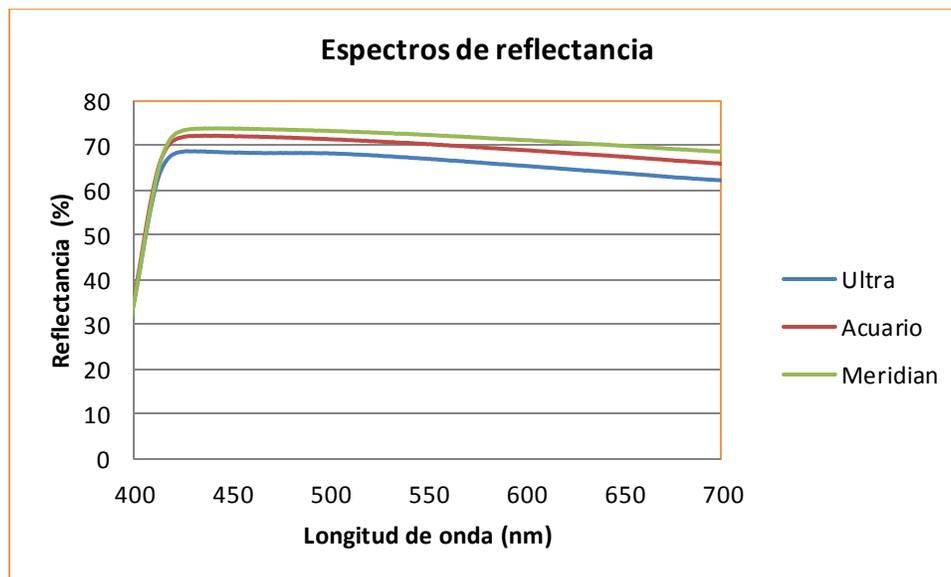


Figura 3.10. Medición de reflectancia espectral de las tres pinturas blanco mate de prueba.

Conforme a las gráficas de espectro de reflectancia, se concluyó que la pintura blanco mate de la marca Meridian es la más óptima para cubrir los materiales que puedan interferir en las mediciones. Principalmente se usó la pintura para cubrir los disipadores de calor, sin embargo también es importante conocer qué tipo de disipador es el más

adecuado para una fuente de iluminación LED, por lo que esta problemática se aborda a continuación.

Estudio de disipadores de calor

Al desamblar las diferentes lámparas con el fin de identificar la variación de tipos de LEDs, también se observó que existe una gran diferenciación entre los disipadores de calor. El disipador de calor es una estructura metálica (por lo general de aluminio) normalmente estriada, con surcos o aletas, que sirve para liberar o extraer el calor de los componentes en donde se encuentra montado [4]. Su funcionamiento está basado en la segunda ley de la termodinámica, transfiere el calor de la parte caliente que se desea disipar al aire, éste proceso se facilita aumentando la superficie de contacto con el aire permitiendo una eliminación más rápida del calor excedente.

La variación de los disipadores encontrada fue tanto de diseño como de tamaño, el área de los disipadores varió entre uno y otro a pesar que las potencias de las lámparas eran “iguales”. Y como ya se mencionó, el área es proporcional al calor a disipar, lo que nos da un indicador de qué tipo de lámpara necesita disipar mayor calor.

En la Figura 3.11 se observa el disipador de calor de la lámpara Smartlight. Es importante recordar que la potencia eléctrica de ésta lámpara es de 7 W, lo que la hace la lámpara analizada de menor potencia. Sin embargo para éste caso, es la lámpara que cuenta con el disipador de mayor área, teniendo un diseño con aletas que permite una mayor disipación, además que el disipador forma parte de la carcasa de la lámpara, lo que permite tener un contacto directo con el aire del ambiente.

Como primera hipótesis se consideró que ésta lámpara necesitaba disipar mayor calor al estar compuesta de LEDs de potencia, claro ésta que se debía de continuar con el estudio para así poder confirmar ésta hipótesis.



Figura 3.11. Disipador de calor de lámpara Smartlight de 7 W.

Para el caso de la lámpara Sanelec se encontró con un disipador de calor de menor área respecto a la lámpara anterior, además que el disipador se encontraba en el interior de la carcasa de la lámpara, teniendo solo ventilas para acceso del aire. En la Figura 3.12 se observa la lámpara (a) y los accesos de ventilación (b). En (c) se muestra el disipador de calor.

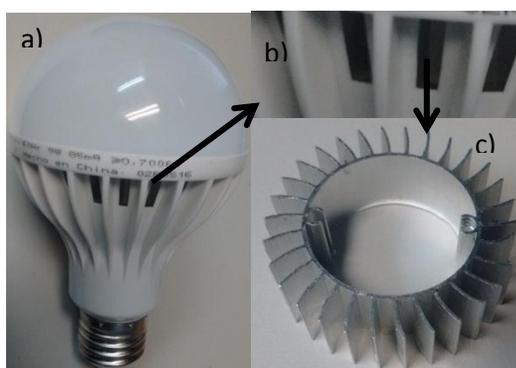


Figura 3.12. (a) Lámpara Sanelec de 9 W. (b) Ventilación. (c) Disipador de calor.

Para el caso de la lámpara Neolux de Osram (Figura 3.13), se encuentra con un disipador que no tiene contacto directo con el aire del ambiente, ya que se ubica en la parte interior de la carcasa de la lámpara, estando completamente cubierto y en contacto con la misma.

El enfriamiento se da por transferencia de calor, del disipador a la cubierta de la lámpara y de la cubierta al aire del ambiente, es posible que este diseño sin surcos ni aletas es para darle una buena imagen al producto y además porque requiera menor cantidad de calor a disipar.

El disipador encontrado en ésta lámpara fue el que tiene una menor área de contacto con el aire con las otras lámparas. En la Figura 3.13 (a) se observa la lámpara Neolux, en (b) se muestra una imagen superior y en (c) una lateral del disipador de calor.

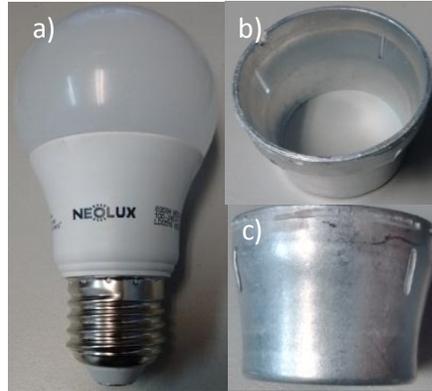


Figura 3.13. a). Lámpara Neolux de 9 W. b)-c). Disipador de calor.

Por último para el caso de la lámpara Philips se encontró con un disipador muy similar al de la lámpara Neolux, ya que de la misma forma no se encontraba en contacto directo con el aire del ambiente y se encontraba en contacto directo con la carcasa de la lámpara por la parte interior de la misma.

Sin embargo el tamaño era mayor al de la lámpara Neolux, además de contar con otro disipador pero en forma de cubierta, en el cual se monta el arreglo de LEDs. En la Figura 3.14 (a) Se muestra la lámpara Philips, mientras que en (b) se observa la cubierta donde va montada la placa de LEDs, en (c)-(d) se percibe una imagen lateral y superior respectivamente del disipador de calor.



Figura 3.14. (a) Lámpara Philips de 9 W. (b) Disipador cubierta. (c)-(d) Imagen lateral y superior de disipador.

Cabe mencionar que todos los LEDs de las diferentes lámparas van montados sobre placas de aluminio que a su vez van colocadas sobre los disipadores, todo esto para que exista una mayor transferencia de calor entre los LEDs y los disipadores, ya que la disipación de calor se puede realizar en cuatro etapas [5]:

- El calor generado por el funcionamiento de LED se origina en la unión semiconductor del chip.
- El calor de chip es transferido a la placa de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB).
- El calor de la PCB se conduce al disipador de calor.
- El disipador de calor libera la el calor al ambiente.

Para tener un mejor entendimiento de la comparativa de los disipadores, en la Tabla 3.1 se muestran los disipadores y las potencias a disipar para cada lámpara, así como el número de chips y una aproximación del área del circuito PCB donde van montados los LEDs.

Tabla 3.1. Características de disipación.

Lámpara	Potencia	# de LEDs	# de chips	Área de circuito (cm ²)	Peso disipador (gr)
<i>Sanalec</i>	9 W	23	23	43	6.69
<i>Neolux</i>	9 W	18	36	11.64	7.94
<i>Philips</i>	9 W	8	16	4.54	23.70
<i>Smartlight</i>	7 W	6	6	13.85	61.42

Conforme a la tabla anterior se puede observar que entre mayor sea el número de LEDs por potencia de la lámpara, menor será la cantidad de calor a disipar, aunque también la placa donde van colocados los LEDs será de mayor tamaño, sin embargo el área puede verse reducida al contemplar LEDs con doble chip como los mostrados.

Conforme a lo anterior se deduce que para el caso de disipadores, cuando se requiere cierto flujo luminoso es más sencillo utilizar un arreglo de LEDs de menor potencia que LEDs de mayor potencia, ya que para LEDs de mayor potencia se necesitará de una mayor disipación de calor, lo que requiere un disipador de calor más complejo y/o de mayor tamaño.

Pero, ¿Qué tan importante es la disipación de calor en dispositivos de iluminación LED? Ya que se dice que la luz de un LED es “luz fría”, esto no haciendo referencia la temperatura de color, sino a que un LED no emite calor (radiación infrarroja) como en el caso de las lámparas incandescentes, incluso una lámpara LED puede tocarse mientras se encuentra en uso, sin temor a quemarse.

Sin embargo esto no indica que el chip LED no emita calor. Emite menor cantidad de calor y lo hace de manera diferente al de una lámpara incandescente o fluorescente. El calor generado es proyectado en dirección contraria al de la luz, es decir que el calor se traslada a la base del chip, es por eso que algunas partes de un dispositivo de iluminación LED pueden llegar alcanzar alta temperatura [5].

El calor generado por el LED proviene del llamado “efecto Joule” al paso de la corriente eléctrica, además los LEDs al funcionar con corriente continua necesitan de un driver que convierta de corriente alterna a continua y así poder utilizarlo en tomas de corriente domiciliaria. Durante este proceso de conversión, la corriente de salida del driver se vierte en el contacto eléctrico del chip LED, concretamente en el punto de unión T (T Junction, T_j) en la parte trasera del chip [5].

Ahora bien, la temperatura del punto de unión (T_j) es uno de los parámetros para deducir la eficacia lumínica de un LED, ya que para un funcionamiento adecuado del LED es de suma importancia disipar el calor generado, ya que la temperatura de la región activa del LED afecta la eficiencia cuántica y con ello el desempeño del LED.

Para verificar los problemas que atrae una mala disipación de calor, se realizó una comparativa del desempeño de un LED caracterizándolo a diferentes temperaturas, pero ya que la esfera integradora utilizada no contaba con un sensor de temperatura en su interior, se diseñó un circuito que realizara ésta función, ya que era imprescindible monitorear la temperatura del LED.

En la Figura 3.15 se muestra el circuito realizado que cuenta con un microcontrolador el cuál interpreta los datos del sensor de temperatura Im35, y envía los datos vía bluetooth a un ordenador, con el cuál se monitorea la temperatura del LED que se encuentra dentro de la esfera integradora para medir el flujo luminoso del LED.

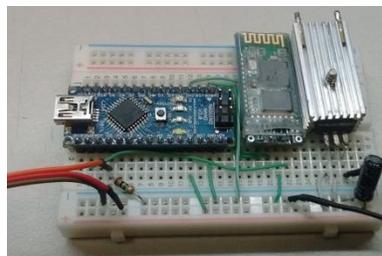


Figura 3.15. Dispositivo de monitoreo de temperatura.

Para reducir la absorción de luz dentro de la esfera por parte del dispositivo de monitoreo de temperatura, éste se recubrió con cinta teflón. Aun así la absorción que

represento la colocación del dispositivo dentro de la esfera fue despreciable, esto debido a que para este análisis no fue importante el valor exacto del flujo luminoso de la fuente, sino la variación del flujo respecto a la temperatura, la cual se obtuvo al mantener constante la absorción del dispositivo en las mediciones.

Posteriormente se montó un LED COB (Chip On Board) de 5 W sobre un disipador con una potencia de disipación menor a 5 W, esto con la finalidad de permitir el calentamiento del LED. La temperatura a la que se encontraba el LED era mostraba en un ordenador, gracias a esto se podían capturar las características de desempeño ópticas del LED al mismo tiempo que se conocía la temperatura en la que se encontraba. En la Tabla 3.2 se muestran los datos registrados a tres diferentes temperaturas.

Tabla 3.2. Características de LED a diferentes temperaturas.

	LED a 30 °C	LED a 50°C	LED a 75°C
Flujo luminoso (lm)	358.91	356.8	340.31
CCT	6634	6915	7073
CRI	72.77	74.77	75.96
Voltaje	16.36	16.34	16.2
Corriente	.308	.412	.43
Potencia eléctrica	5.03	6.73	6.96
Eficacia luminosa(lm/w)	64.87	52.99	48.85

En base a los datos se encontró como resultado que a mayor temperatura se obtiene menor eficacia luminosa, disminuyendo el flujo luminoso, así también se registró que el LED consume una mayor potencia eléctrica, lo que significa que la correcta elección de disipador no solo dará mayor desempeño óptico, sino también un ahorro en el consumo eléctrico.

Ahora bien, el fósforo comúnmente utilizado para conversión de luz azul-blanca, en fuentes de Iluminación de Estado Sólido, es el YAG:Ce. Sin embargo la conductividad térmica de este material se ve modificada por el incremento de temperatura, ya que entre mayor temperatura adquiera el fósforo, su capacidad de disipación del mismo disminuye. La Tabla 3.3 muestra los valores de conductividad térmica para dos temperaturas donde

se indica que, el incremento de temperatura no sólo afecta al chip sino que también afecta las características del fósforo.

El fósforo generalmente se hace polvo, el cual se mezcla con algún material transparente, por lo que el incremento de temperatura no sólo degradará al fosforo, sino también a dicho material transparente en el que se encuentre. Se puede encontrar Fósforo en Vidrio (PiG, Phosphor in Glass), Fósforo en Silicon (PiS, Phosphor in Silicon) y Fósforo en Vidrio Cerámico (Phosphor in Ceramic Glass) [6].

Tabla 3.3. Conductividad Térmica de YAG:Ce [7].

Fósforo YAG:Ce		Conductividad térmica [W.m-1 K-1]	
		Temperatura = 25°C	Temperatura = 100°C
Coordenada CIE (x,y)	(0.418, 0.554)	11.5	7.5
	(0.434, 0.543)	8.2	5.7

Continuando con los datos experimentales obtenidos a diferentes temperaturas, se sabe que el cambio obtenido en el CRI y en la CCT, involucra que las curvas de emisión fueron afectadas por el incremento de temperatura. En la Figura 3.16 se observan los espectros de emisión LED para cada temperatura. Se observa que el espectro de la luz emitida por el LED a mayor temperatura ligeramente se recorre al rojo, mientras que la emisión se recorre al azul a menor temperatura, lo que explica las variaciones de CCT y CRI.

Las mediciones se realizaron sin dejar tiempos de operación innecesarios, ya que fueron registrados inmediatamente después de alcanzar la temperatura deseada, indicando que el chip presenta una pronta disminución del flujo luminoso con la temperatura, que puede ser debida a que éste es más sensible al incremento de temperatura, en comparación del fósforo.

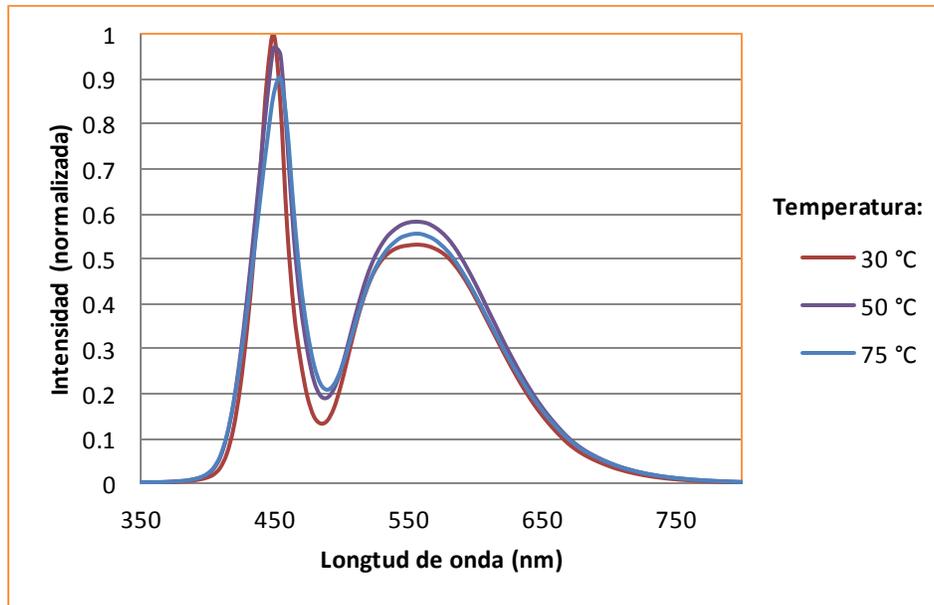


Figura 3.16. Espectros de emisión de LED, a diferentes temperaturas.

Conforme a lo encontrado, se reconoce la importancia de una correcta disipación de calor en LEDs, principalmente los utilizados en fuentes de Iluminación de Estado Sólido (SSL), ya que el calor disminuye el desempeño del LED. Éste calor se concentra principalmente en la carcasa de la lámpara tal y como se observa en la Figura 3.17, donde se muestra una imagen térmica que se tomó con una cámara infrarroja en el laboratorio de ingeniería de desarrollo del CIO, en la cual se muestra una lámpara Philips disipando el calor de un LED de 10 W.

En la misma imagen se percibe como la temperatura se centra en dirección contraria a la emisión de luz, siendo además la parte de la carcasa de la lámpara en donde se encuentra el disipador. Mientras que para el caso del difusor, que se encuentra en dirección de la luz, éste no muestra cambios notables de temperatura, además que es la parte de donde usualmente se sujeta la lámpara para su colocación, es por eso que se dice que los LEDs generan “luz fría” al no emitir calor con la misma dirección de la luz.

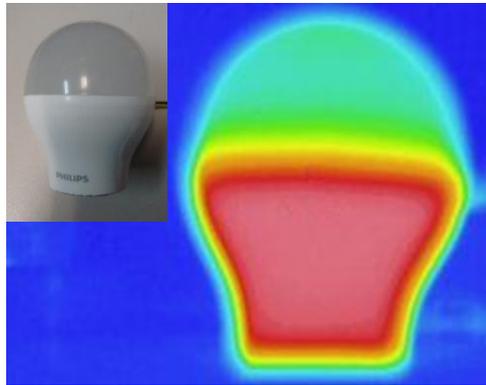


Figura 3.17. Imagen térmica de lámpara LED de 10W en operación.

La gran cantidad de calor hace necesario que prácticamente todas las lámparas de LEDs de más de 5W necesiten de un disipador de calor, esto conforme a lo mostrado en la Figura 3.18, en donde se observan imágenes térmicas de lámparas LEDs de diferentes potencias.

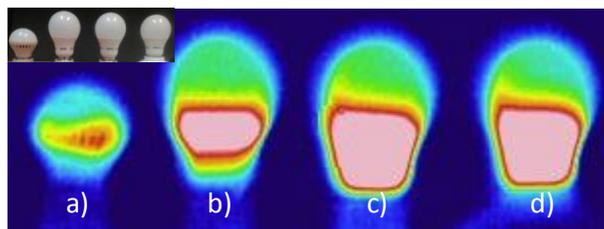


Figura 3.18. (a) Lámpara LED 3 W. (b) Lámpara LED 5 W. (c) Lámpara LED 8 W. (d) Lámpara LED 9 W.

Ahora bien la radiación térmica encontrada en lámparas basadas en LEDs es menor que sus contrapartes, ya que en promedio una lámpara LED convierte de entre un 70 y 80 % de la energía consumida en luz, y de un 20 a 30 % en calor. Mientras que para el caso de una lámpara fluorescente convierte un 20 % de la energía consumida en luz, el 40% en calor y el 40% restante en radiación infrarroja (IR). Para el caso de la incandescente convierte un 10 % en luz, el 20% en calor y la energía restante en infrarroja (IR) [8].

Para observar esto en la Figura 3.19 se muestra una comparativa de las tres principales fuentes de iluminación, todas por el mismo fabricante, en la que se percibe una imagen de la disipación térmica de cada lámpara en funcionamiento, además se

distingue en donde se tiene mayor presencia de temperatura. Para el caso de la incandescente, se observa que el calor que emite es tanto, que se llega a transmitir a la base o soporte donde se conecta la lámpara, sin embargo el incremento de temperatura en la lámpara LED se ve acumulada en el disipador encontrado en la carcasa de la misma.

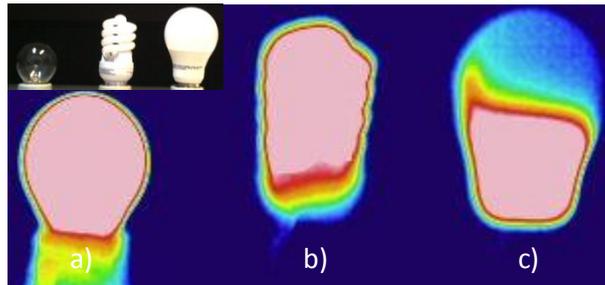


Figura 3.19. (a) Lámpara Incandescente. (b) Lámpara Fluorescente. (c) Lámpara LED.

Conforme a que los disipadores más comunes encontrados en las fuentes de Iluminación de Estado Sólido (LEDs) son los fabricados en aluminio, se propuso determinar qué tipo de disipador de calor es el más eficiente para enfriar los LEDs en operación, esto debido a que principalmente se pueden encontrar dos tipos de disipadores de aluminio, siendo los que tiene un acabado o recubrimiento de anodizado y los que no.

El anodizado es un tratamiento que forma una capa de óxido en la superficie del material, brindando protección contra la corrosión y desgaste mecánico, además de convertir la superficie en aislante eléctrico [9], sin embargo se desconoce si este recubrimiento pueda afectar en la capacidad de disipación del material.

Para deducir ésta cuestión, primeramente se adquirieron dos disipadores anodizados idénticos, posteriormente a uno de ellos se le removió el recubrimiento del anodizado mediante un baño de sosa caustica. En la Figura 3.20 se muestran ambos disipadores.

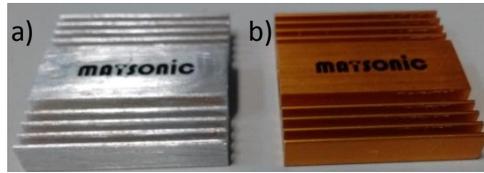


Figura 3.20. (a)Disipador sin anodizado. (b) Disipador con anodizado.

Después de tener el par de disipadores con y sin recubrimiento, el procedimiento para efectuar la comparación fue el siguiente: (a) Se coloca un LED de 5 W sobre el disipador con anodizado, para garantizar el contacto y correcta disipación, entre el LED y el disipador, se coloca una capa de pasta térmica como junta de contacto; (b) se registra la temperatura ambiente a 25.2°; (c) después se enciende el LED, dejándolo en operación durante 1 min; (d) transcurrido el minuto se apaga el LED e inmediatamente registra la temperatura alcanzada; (e) por último se cronometra el tiempo que le lleva al disipador disminuir a la temperatura de 30° C.

Para el caso del disipador sin anodizado, se realiza el mismo procedimiento inmediatamente después de terminar con el primer disipador, se registra la temperatura del ambiente y del disipador a utilizar, esto para garantizar que no exista variación de temperaturas al inicio de la prueba.

En la Tabla 3.4 se muestran los datos registrados de la comparación, en donde se puede concluir que: el disipador sin anodizado es el más apto para disipar el calor del LED, ya que se enfrío más rápido que su contraparte. Debido a que el material sin anodizado tiene una mayor capacidad de disipación, esto permitió un menor incremento de temperatura durante el funcionamiento del LED, en comparación con el disipador con anodizado.

Tabla 3.4. Comparación de desempeño de disipación térmica de un disipador con y sin anodizado.

Disipador	Temperatura Inicial	Tiempo de operación de LED	Temperatura alcanzada	Temperatura final	Tiempo de enfriamiento
<i>Con Anodizado</i>	27.2 °C	1 min	51.2	30 °C	7.52 min
<i>Sin anodizado</i>	27.2 °C	1 min	43.3	30 °C	7.11 min

Conforme a los resultados obtenidos de la comparación, se puede deducir una razón del porque los disipadores encontrados en las lámparas LED no cuentan con algún tipo de recubrimiento, ya que este recubrimiento disminuiría la potencia de disipación, por lo que también se debe de considerar que el recubrir el disipador con la pintura analizada podría afectar en la potencia de disipación del material.

Estudio comparativo teórico de desempeño

Para obtener un enfoque teórico de los parámetros que se deben de obtener sobre las mediciones de los diferentes LEDs, se planteó realizar un estudio teórico comparativo sobre: costo, flujo luminoso y eficacia luminosa de más de 140 LEDs diferentes de 8 distintos fabricantes, todos los datos fueron recopilados del catálogo de uno de los principales proveedores en el mercado (Digikey).

Primeramente los LEDs fueron delimitados considerando que cumplieran con las siguientes características:

- Corriente menor a 1 Amper
- Blanco Frío

- Disponibilidad de venta por unidad
- Se encuentren en producción (que no estén rezagados)

Los datos obtenidos de los fabricantes para el estudio fueron: flujo luminoso, costo, voltaje y corriente de prueba, a partir de esto se realizó el análisis de eficacia luminosa.

Los fabricantes de los LEDs comparados fueron:

- Lumileds.
- Bivar Inc.
- Bridge lux
- Citizen
- Cree Inc.
- Marktech Optoelectronics
- Osram
- Seoul

En la Figura 3.21 se muestra una gráfica de Costo (USD) versus Eficacia luminosa de cada uno de los LEDs, en donde se observa que existe una mayor representación de LEDs con eficacias de entre 100 y 160 lm/w y con costos menores a 20 dólares, cabe mencionar que los datos presentados son por unidad.

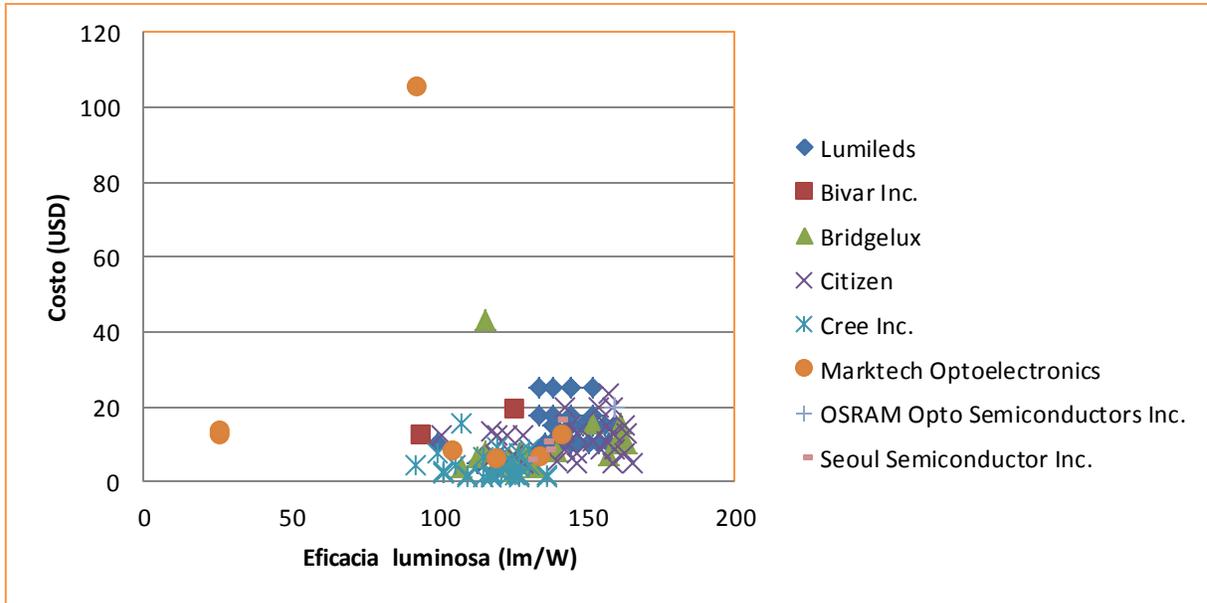


Figura 3.21. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs Digikey.

Conforme a la mayor representación de LEDs en una zona, se realiza un acercamiento el cual se muestra en la Figura 3.12, y en donde se puede observar que el fabricante CITIZEN (en el momento del registro de LEDs), cuenta con los LEDs de mayor eficacia luminosa (lm/w) por el costo que representa cada uno.

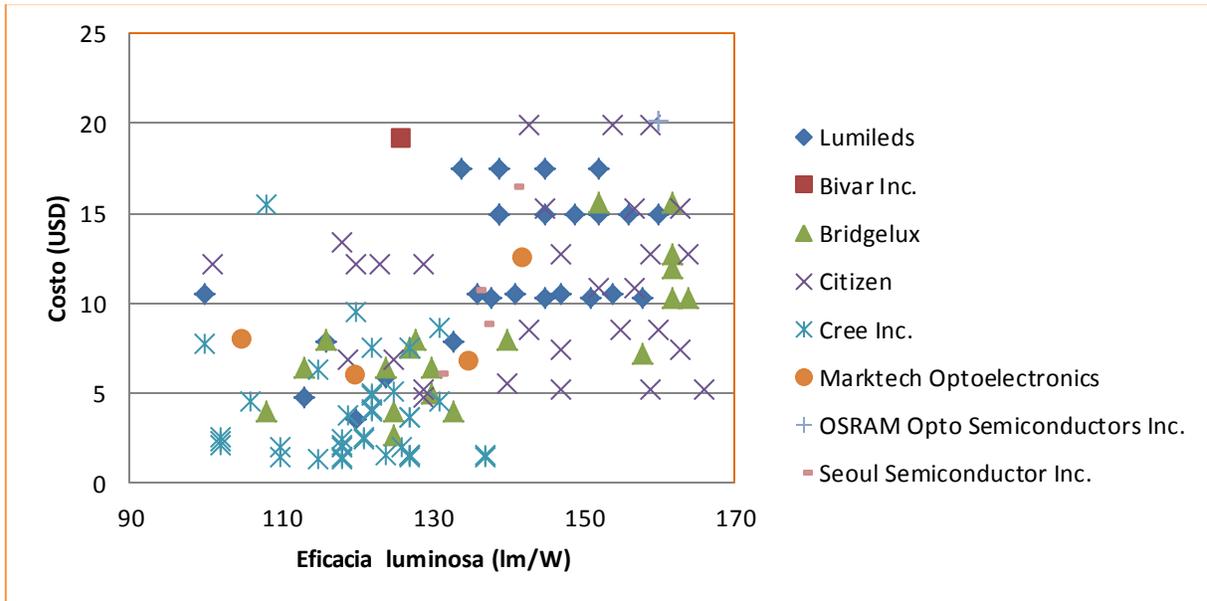


Figura 3.22. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs Digikey (acercamiento).

Sin embargo también se observa que se puede realizar un arreglo de un par de LEDs Cree, con los cuáles la relación eficacia luminosa-costo sería mayor al de un sólo LED del fabricante Citizen.

Para esto se realiza una comparativa de la eficacia luminosa-costo versus el flujo luminoso que representa cada LED, todos estos datos recabados se muestran en la Figura 3.23, en donde además se puede observar que los más de 140 LEDs siguen una curva de tendencia definida, con comportamiento decreciente. Este comportamiento indica que los LEDs que emiten mayor cantidad de luz, en general son menos eficientes y de mayor costo.

También se puede concluir que cuesta más producir un mayor flujo luminoso con un solo dispositivo que producirlo en un arreglo de dispositivos de menor potencia, al decir “cuesta” se hace referencia al mismo costo de compra como al costo de mantenimiento, ya que representan mayor costo en dólares, como un mayor costo de mantenimiento al necesitar de mayor potencia eléctrica para su funcionamiento.

Sin embargo ésta deducción se ratificara y fundamentará más adelante mediante mediciones experimentales hechas en el laboratorio.

Los LEDs que representan de mejor manera el comportamiento mencionado son los de la marca CREE, que además tienen una mayor eficacia luminosa costo. En el contexto de costo-beneficio, son los más adecuados para fabricar un arreglo de LEDs en un dispositivo de iluminación, todo esto conforme a los datos obtenidos por el proveedor.

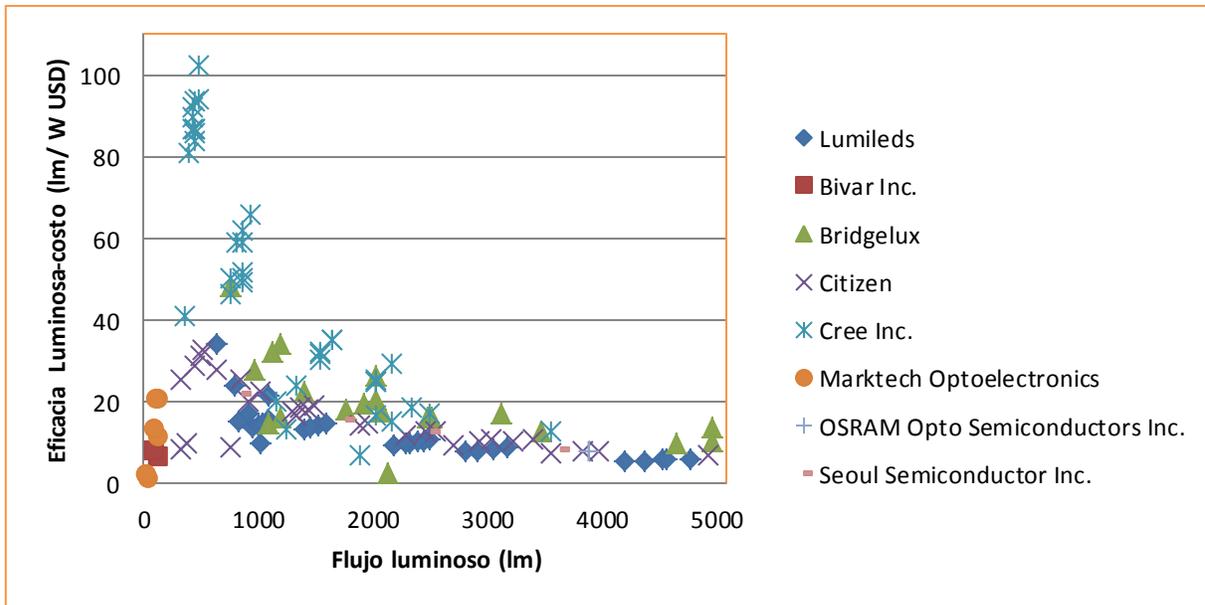


Figura 3.23. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs flujo luminoso total (lm) de LEDs del distribuidor Digikey.

Conforme a este análisis se tiene una idea de los resultados experimentales que se pueden adquirir en el laboratorio, en donde ya se contempla encontrar que los LEDs de mayor potencia eléctrica a su vez podrían presentar una menor eficacia luminosa.

Estudio de desempeño experimental

Conforme a la variación de LEDs encontrada en los dispositivos de Iluminación de Estado Sólido, se adquirieron diversos tipos de LEDs, esto con el fin de caracterizarlos y conocer el desempeño que presenta cada uno, y a partir de allí determinar la viabilidad que pueden presentar como fuentes de Iluminación de Estado Sólido.

Los diodos emisores de luz adquiridos fueron aquellos que cumplieran con una temperatura de color “blanco frío”, con potencias eléctricas menores a 10 W, y que además fueran los LEDs más representativos en el mercado, convirtiéndolos en elementos de fácil acceso de compra, tanto por unidad como por lote.

Para caracterizar los diferentes dispositivos de iluminación adquiridos se utilizará un sistema espectrofotométrico con esfera integradora, así como una fuente de voltaje para “alimentar” a los mismos. Los LEDs serán montados sobre disipadores, ya que como se sabe pueden registrarse datos erróneos tanto ópticos como eléctricos, debidos a una mala disipación de calor, esto conforme a los resultados anteriores.

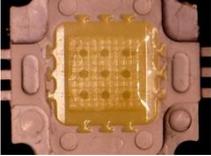
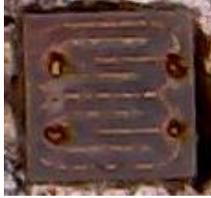
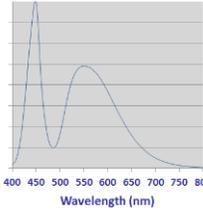
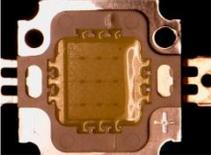
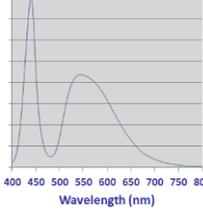
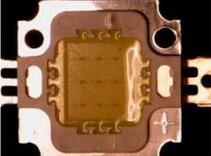
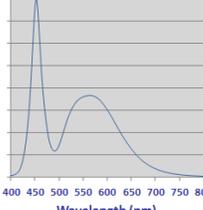
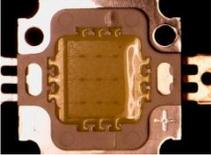
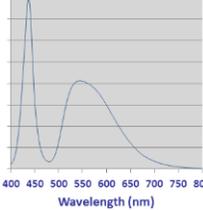
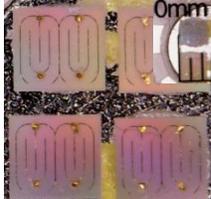
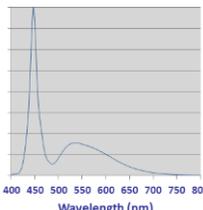
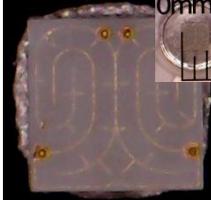
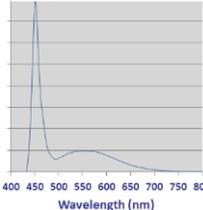
Recordando además que la ubicación de disipadores dentro de la esfera pueden ocasionar reabsorción de luz, se planteó recubrirlos de la pintura que presento una mayor reflectancia, sin embargo también se sabe que un recubrimiento aplicado al disipador, conlleva a una disminución en la capacidad de disipar, por lo que fue necesario que los LEDs se montaron sobre disipadores con una potencia de disipación mayor a la requerida, esto con el fin de garantizar que la temperatura del LED fuera la adecuada, ya que además no existen corrientes de viento dentro de la esfera por lo que también la capacidad de disipación se vería afectada.

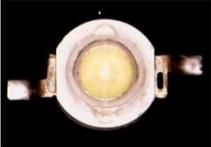
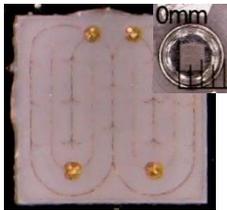
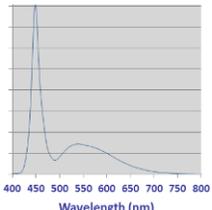
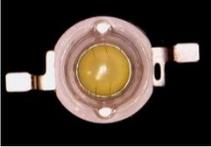
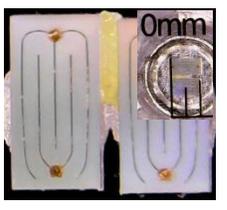
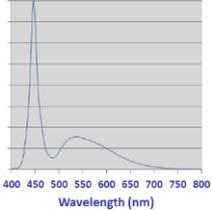
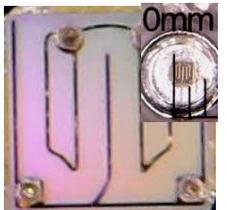
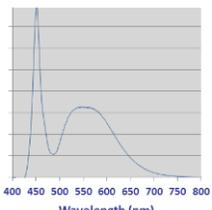
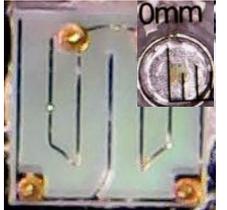
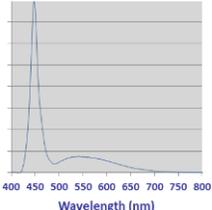
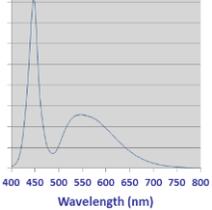
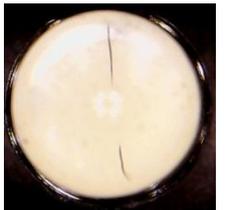
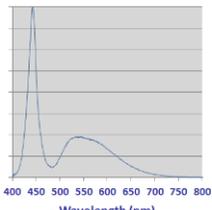
Una vez dentro de la esfera el LED a caracterizar con su correspondiente disipador, se pone en funcionamiento éste, antes de registrar los parámetros tanto ópticos como eléctricos, se da un tiempo de espera a cada LED para que éste se estabilice, el tiempo de estabilización varía para cada tipo, el indicador de la estabilización es cuando no presentan cambios los parámetros de voltaje y corriente, los cuales son datos presentados por la fuente de voltaje.

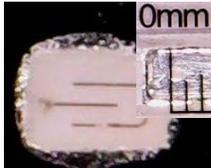
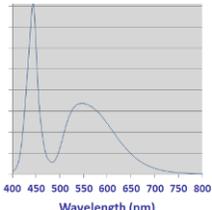
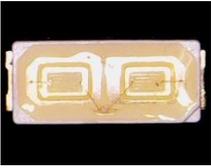
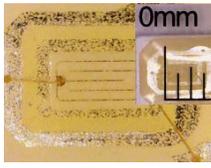
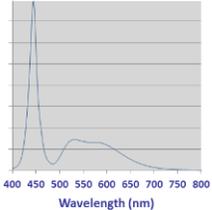
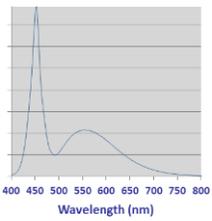
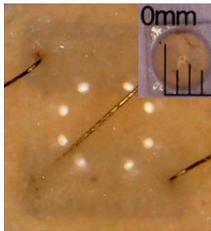
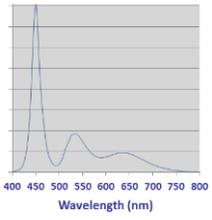
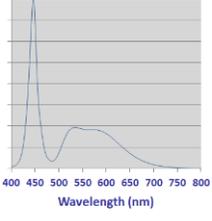
Es importante mencionar que el parámetro de alimentación controlado para cada LED, fue el voltaje, la corriente suministrada fue la que demandara el dispositivo, se realizó de esta manera debido a que el parámetro de corriente no era proporcionado por todos los proveedores.

En la Tabla 3.5 se muestran los parámetros de desempeño registrados para cada tipo de LED adquirido, en donde además se observa la imagen representativa de cada uno, su espectro de emisión correspondiente, así como el chip y en algunos casos se muestra la medida aproximada del chip, representada por una reglilla donde en la cual cada línea representa medio milímetro.

Tabla 3.5. Características de desempeño de LEDs.

	LED	# de chips	Chip	Espectro de emisión	Características	
LED 1		9			Voltaje	10.97
					Corriente	1.86
					Flujo	613.9
					CRI	71.3
					CCT	6395
					Costo	30
					Proveedor	ML
LED 2		9			Voltaje	10.99
					Corriente	.618
					Flujo	239.8
					CRI	65.56
					CCT	6241
					Costo	49
					Proveedor	Fester
LED 3		9			Voltaje	10.99
					Corriente	.563
					Flujo	217.1
					CRI	78.5
					CCT	6855
					Costo	8
					Proveedor	Aliexpress
LED 4		9			Voltaje	10.99
					Corriente	.473
					Flujo	209.5
					CRI	63.3
					CCT	5948
					Costo	11
					Proveedor	ML
LED 5		4			Voltaje	6.46
					Corriente	.365
					Flujo	191.6
					CRI	72.18
					CCT	10117
					Costo	15
					Proveedor	Aliexpress
LED 6		1			Voltaje	3.38
					Corriente	.199
					Flujo	26.1
					CRI	76.63
					CCT	20000
					Costo	10
					Proveedor	Dr

LED 7		1			Voltaje	3.39
					Corriente	.212
					Flujo	40.8
					CRI	82.09
					CCT	20000
					Costo	10
					Proveedor	ML
LED 8		2			Voltaje	3.29
					Corriente	.186
					Flujo	43.9
					CRI	78.84
					CCT	20000
					Costo	7.3
					Proveedor	Aliexpress
LED 9		1			Voltaje	3.39
					Corriente	.181
					Flujo	43.9
					CRI	74.39
					CCT	6714
					Costo	8
					Proveedor	ML
LED 10		1			Voltaje	3.28
					Corriente	.141
					Flujo	15.7
					CRI	70.25
					CCT	20000
					Costo	5.5
					Proveedor	Aliexpress
LED 11		1			Voltaje	3.31
					Corriente	.071
					Flujo	23.3
					CRI	77.17
					CCT	12017
					Costo	6
					Proveedor	ML
LED 12		1			Voltaje	3.29
					Corriente	.014
					Flujo	3.4
					CRI	72.10
					CCT	20000
					Costo	.35
					Proveedor	ML

LED 13		1			Voltaje	3.39
					Corriente	.110
					Flujo	35.2
					CRI	69.52
					CCT	7936
					Costo	.7
					Proveedor	ML
LED 14		2			Voltaje	5.98
					Corriente	.078
					Flujo	56.1
					CRI	78.02
					CCT	20000
					Costo	5
					Proveedor	ML
LED 15		1			Voltaje	3.29
					Corriente	.127
					Flujo	34.7
					CRI	84.32
					CCT	165333
					Costo	5
					Proveedor	ML
LED 16		2			Voltaje	6.01
					Corriente	.031
					Flujo	16.1
					CRI	88.64
					CCT	20000
					Costo	5
					Proveedor	ML
LED 17		2			Voltaje	3.28
					Corriente	.118
					Flujo	36
					CRI	77.29
					CCT	12978
					Costo	5
					Proveedor	ML

Conforme a los datos adquiridos para cada Diodo Emisor de Luz, se calculó la potencia de prueba, así como la eficacia luminosa y la eficacia luminosa costo, el costo fue representado en dólares (1 USD = 18.83 MXN). En la Tabla 3.6 se muestra los parámetros mencionados.

Tabla 3.6. Características calculadas de LEDs

LED	Potencia y/o identificación	Costo (USD)	Flujo (lm)	Potencia de prueba (W)	Eficacia lumínica lm/w	eficacia costo lm/w \$
1	10W	1.59	613.9	20.47	29.99	18.82
2	10W1	2.60	239.8	6.79	35.32	13.57
3	10W2	0.42	217.1	6.18	35.13	82.69
4	10W3	0.58	209.5	5.19	40.37	69.10
5	5W	0.80	191.6	2.35	81.53	102.35
6	3W	0.53	26.1	0.67	38.96	73.35
7	3W1	0.53	40.8	0.71	57.46	108.21
8	3W2	0.39	43.9	0.61	71.97	185.64
9	1W	0.42	43.9	0.61	71.97	169.39
10	1W1	0.29	15.7	0.46	34.13	116.85
11	MB	0.32	23.3	0.23	101.30	317.93
12	5mm	0.02	3.4	0.04	85.00	4573.00
13	smd 5730	0.04	35.2	0.37	95.14	2559.14
14	lg7030	0.27	56.1	0.46	121.96	459.29
15	lg2835	0.27	34.7	0.41	84.63	318.73
16	sharp	0.27	16.1	0.18	89.44	336.85
17	Samsung	0.27	36	0.38	94.74	356.78

Partiendo de los datos registrados por el sistema espectrofotométrico primeramente se realiza un comparativa entre la variación de la Temperatura de Color Correlacionada (CCT) versus Índice de Reproducción de Color (CRI), la cual se muestra en la Figura 3.24, en donde se observa que para los LEDs adquiridos, el Diodo Emisor de Luz blanca de la marca Sharp, es el que presenta el mayor CRI con una Temperatura de Color de 20000 (∞), sin embargo es significativo señalar la CCT del LED, ya que comúnmente se piensa que entre más cálida sea la temperatura de color de una fuente de iluminación, ésta tendrá un mayor CRI, sin embargo se puede demostrar que no siempre es así, ya que CRI es un indicador de que tanto se cubre el ancho de banda del visible.

Es importante mencionar que el valor máximo de temperatura de color que puede llegar a indicar el equipo de medición utilizado es de 20000 °K o también indicado como infinito (∞), esto debido a que las variaciones de temperatura son infinitas, por lo que

cada vez se tornan más difíciles de detectar, sin embargo existen otros instrumentos capaces de detectar variaciones de CCT por debajo de 100000, pero para este caso el valor de 20000 o infinito es el mayor grado de Temperatura de Color Correlacionada que puede alcanzar una fuente de Iluminación caracterizada.

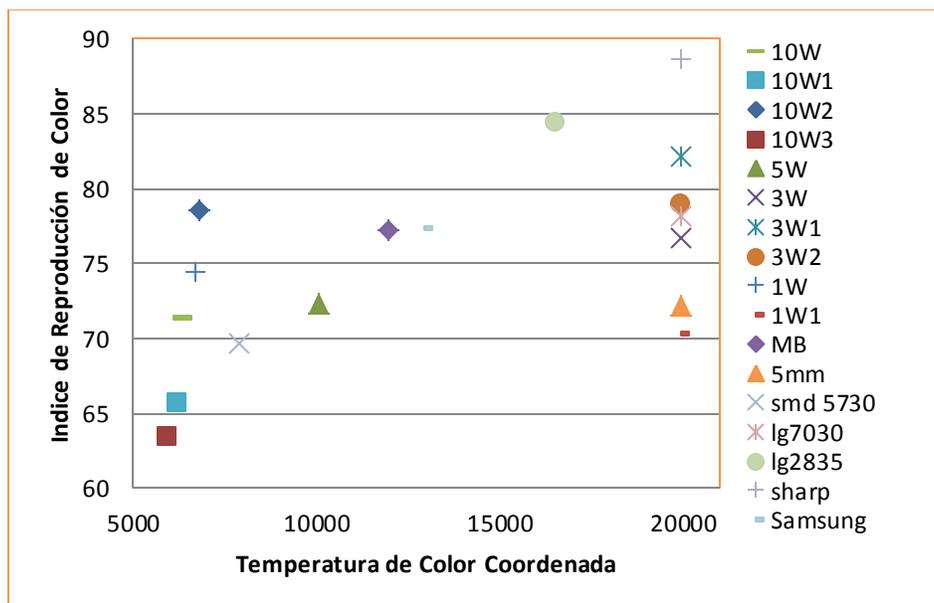


Figura 3.24. Índice de Reproducción de Color versus Temperatura de Color Correlacionada, de LEDs adquiridos.

Conforme a los datos mostrados de la figura anterior, también se observa que se puede encontrar una gran variación de valores del Índice de Reproducción de Color con temperatura de color blanco frío, ya que inicialmente se pensaba que se obtendrían valores bajos de CRI por tratarse de temperatura de color altas.

Para observar que el CRI depende de que tanto se cubra el ancho de banda del visible, más que de la temperatura de color, se realiza una comparativa en los espectros de emisión de los LEDs que presentaron el mayor y menor CRI, los cuales son mostrados en la Figura 3.25, para ambos casos los LEDs tienen una Temperatura de Color de 20000.

Además se observa que el espectro de emisión del chip, es prácticamente idéntico para ambos casos, sin embargo la variación se da en la emisión del fósforo, ya que para el

caso del LED Sharp, éste muestra dos picos de emisión por parte del fósforo, el primer pico alrededor de los 532 nm y el segundo cercano a los 635 nm.

Para el caso del LED con menor CRI se observa una sola banda de emisión del fósforo, con una amplitud máxima alrededor de los 540 nm, siendo una emisión muy representativa en LEDs que tienen como fósforo YAG:Ce.

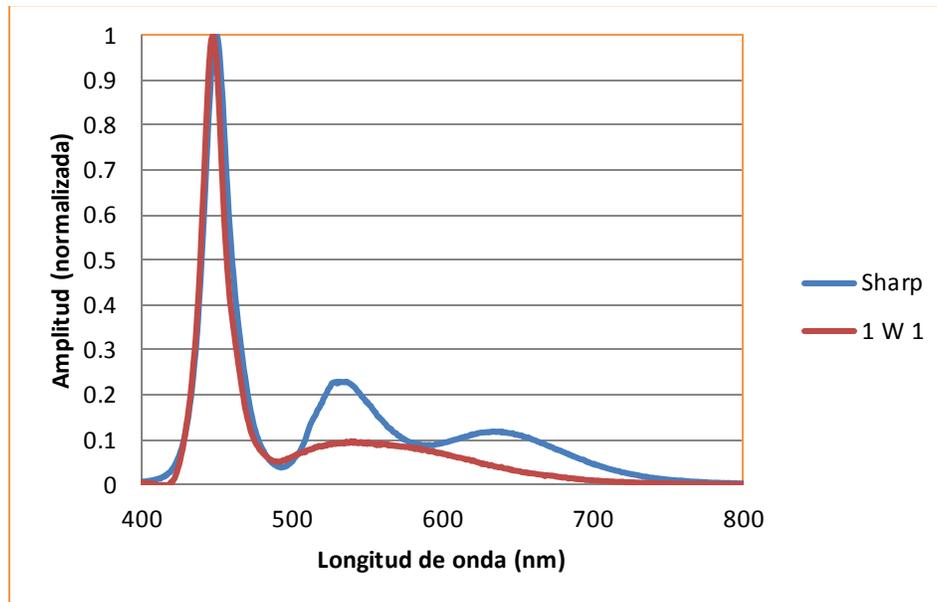


Figura 3.25. Espectros de emisión con CRI de 88.64 y 70.25 con CCT de 20000 °K.

La curva de emisión típica del fósforo YAG:Ce se muestra en la Figura 3.26, en la que se observa el pico de emisión en 547 nm, lo que la hace muy similar a la curva de emisión del LED con menor CRI de la figura anterior.

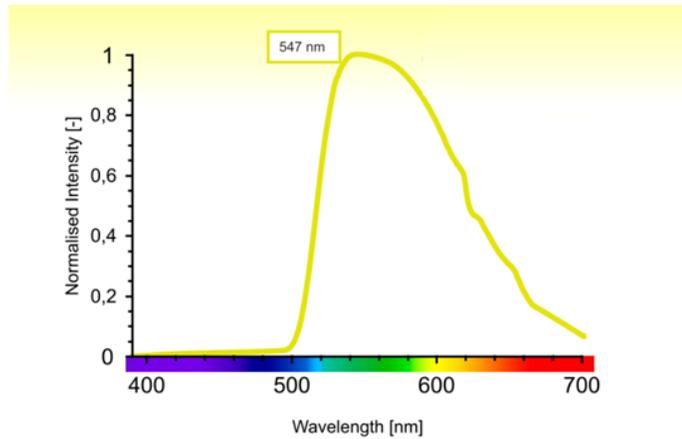


Figura 3.26. Espectro de emisión YAG:Ce [7].

Ahora bien se sabe que el tener altos Índices de Reproducción de Color puede conllevar a un mayor costo del Diodo Emisor de Luz blanca, ya que para el caso del espectro de emisión del LED Sharp se puede pensar, que el fosforo no está compuesto de sólo tipo de material.

Para tener una representación entre el Costo y el CRI se realizó una comparativa que se muestra en la Figura 3.27, donde se observa que existe un agrupamiento de LEDs entre los valores de 70 y 80 en el CRI con un costo menor a 1 dólar.

Conforme a estos datos, el LED Sharp se presenta como una buena alternativa si se pretende tener una buena reproducción de color.

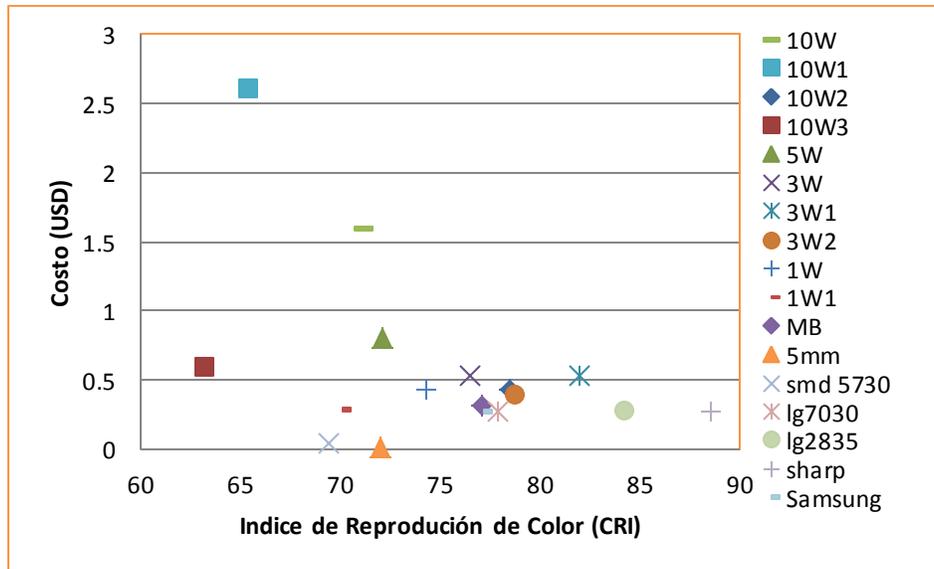


Figura 3.27. Costo USD versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.

Sin embargo realizando una comparativa entre el flujo luminoso contra el CRI, el cual se muestra en la Figura 3.28, se observa que los LEDs que presentan los mayores valores de CRI son lo que a su vez contemplan el menor flujo luminoso, es decir se observa que entre mayor CRI menor será el Flujo luminoso.

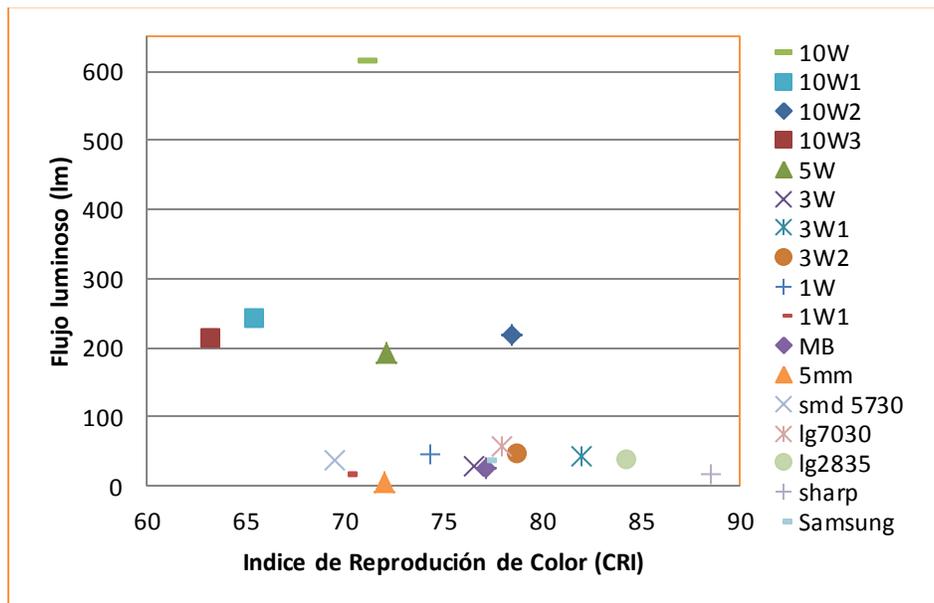


Figura 3.28. Flujo luminoso (lm) versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.

Para tener un mejor acercamiento sobre la relación Flujo luminoso, CRI, CCT se adquirió un LED SMD 5730, pero ésta vez con una temperatura de color cálida, los LEDs se observan en la Figura 3.29. Para el caso del LED con CCT fría éste ya se encuentra debidamente caracterizado, por lo que sólo se obtendrán los parámetros del LED cálido.

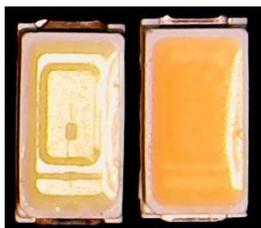


Figura 3.29. (a) LED temperatura fría. (b) LED temperatura cálida.

Los datos recabados para cada LED son mostrados en la Tabla 3.7, en donde se observa que efectivamente para LEDs de temperaturas de color cálidas, el flujo luminoso es menor que su contraparte, disminuyendo a su vez la eficacia luminosa, la cual para éste caso presenta una disminución de casi el 50%, además que presenta un mayor consumo de energía para su operación esto comparado con el LED de temperatura de color frío.

Además se reitera que el tener un CRI alto o bajo no representará a su vez la CCT, ya que como se observa el LED que tiene el mayor CRI a su vez tiene una CCT “fría” en comparación con el otro LED analizado, lo que conlleva a que la CCT y CRI no necesariamente se encuentran relacionados.

Tabla 3.7. LED “frío” versus LED “cálido”.

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	CCT	CRI	Flujo	Eficacia luminosa (lm/w)
LED “frío”	3.39	.11	.37	7936	69.52	35.2	95.13
LED “cálido”	3.36	.13	.43	3226	61.29	20.99	48.81

Mientras que para el caso de los espectros de emisión de ambos LEDs (ver Figura 3.30) se observa que el LED con temperatura de color blanco frío, posee el típico espectro de un LED de luz blanca con fósforo YAG:Ce, mientras que para el caso del LED “cálido”, el primer pico de emisión perteneciente al chip se encuentra alrededor de los 455 nm, y para la emisión del fósforo alrededor de los 580 nm, por lo que se piensa que se puede tratar de un fósforo diferente al YAG:Ce, para este caso el espectro de emisión del chip se ve notablemente atenuado, esto debido a una mayor absorción que pudiera presentar el fósforo.

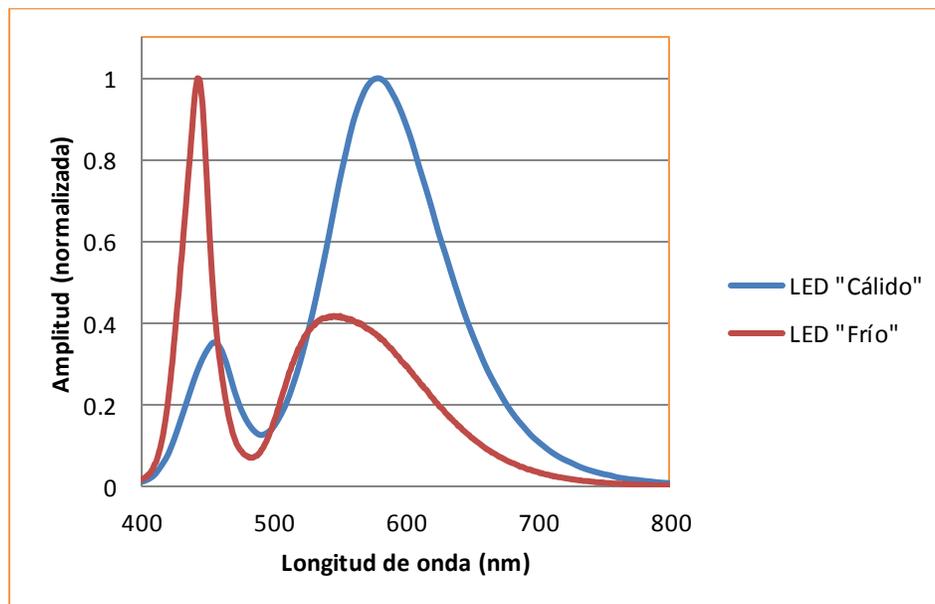


Figura 3.30. Espectros de emisión LED “frío” versus LED “cálido” (SMD 5730).

Posteriormente se continúa con el análisis entre la eficacia luminosa (lm/w) versus CRI con el fin de observar la relación entre ellos, en la Figura 3.31 se muestra la comparativa en donde se observa que el LED Sharp se presenta como la mejor alternativa con una eficacia luminosa alrededor de 90 lm/W.

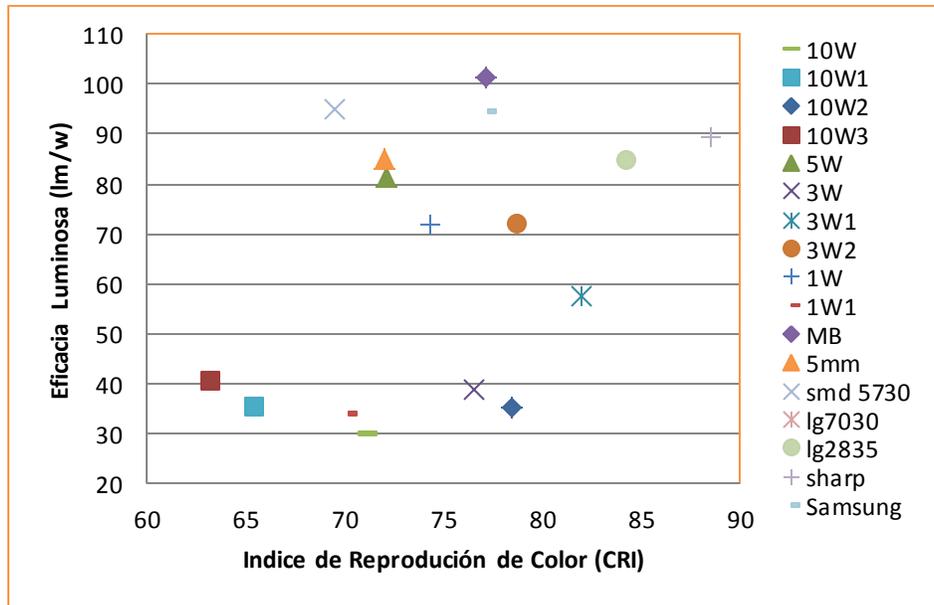


Figura 3.31. Eficacia luminosa (lm/W) versus Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs adquiridos.

Sin embargo para ratificar que el LED Sharp puede ser la mejor opción cuando se requiere tener una aceptable reproducción de color se realiza la gráfica de la Figura 3.32, en donde se relaciona el Índice de Reproducción de Color (CRI) con la Eficacia luminosa-costo (lm/W \$), observándose que el LED Sharp se queda muy lejos de ser el más conveniente para un arreglo de LEDs, es decir que se puede interpretar que entre un mayor CRI se tendrá una menor eficacia luminosa-costo.

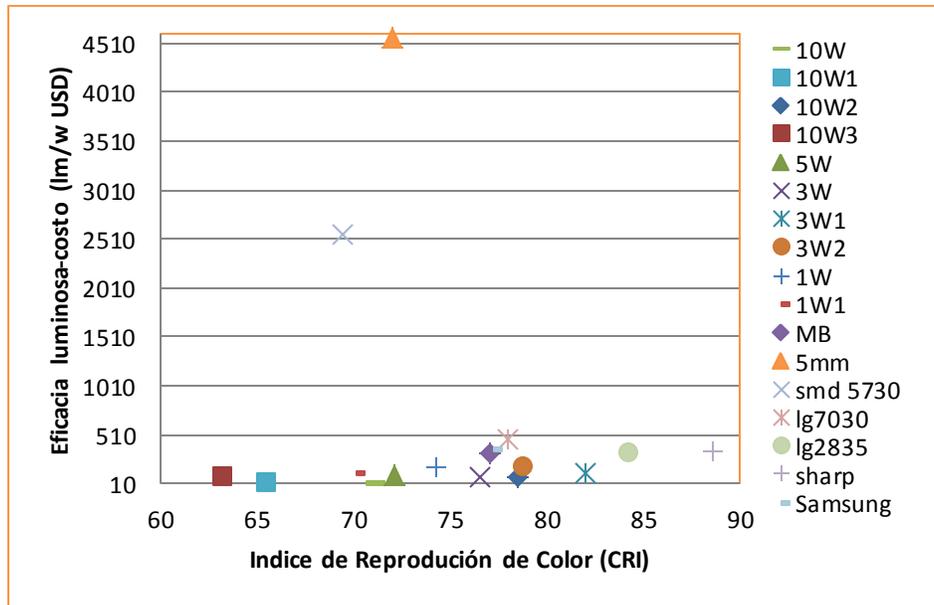


Figura 3. 32. Eficacia Luminosa-costo [$lm/(W*USD\$)$] vs Índice de Reproducción de Color (CRI), de LEDs caracterizados.

Partiendo de los resultados anteriores, se sabe que se necesita de una mayor conversión de fósforo para obtener una mejora en el Índice de Reproducción de Color, así como en fuentes de iluminación con CCT cálidas, esto se deduce principalmente del espectro de emisión y de la disminución del flujo luminoso, respectivamente.

Una mayor conversión de fósforo puede indicar muy probablemente que los dispositivos de Iluminación de Estado Sólido con CRI altos y/o con CCT cálidas, necesiten de una mayor disipación de calor, ya que los materiales de conversión al no ser totalmente eficientes, estos representaran pérdidas de energía, las cuales principalmente se presentan como liberación de calor. Es decir que entre mayor sea una conversión de energía existirá un mayor número de pérdidas de energía, que se libera principalmente en forma de calor.

Ahora bien se realizan las siguientes comparativas en donde no se considera el CRI ni CCT, con el fin de observar el comportamiento de desempeño de los diferentes LEDs adquiridos, primeramente se observa la relación Costo versus Eficacia Luminosa.

Los datos de esta comparativa son desplegados de manera gráfica en la Figura 3.33, en donde se percibe que los LEDs de menor potencia son los que tienen un menor costo y una mayor eficacia luminosa comparada con los LEDs de potencia. Además se observa que el LED que representa una mayor eficacia luminosa es él que tiene doble chip, lo que continúa demostrando que pueden ser las mejores opciones en dispositivos de Iluminación, ya que no hay que olvidar que las lámparas de iluminación que presentaron doble chip (Philips, Osram), son marcas con prestigio en el área de iluminación,

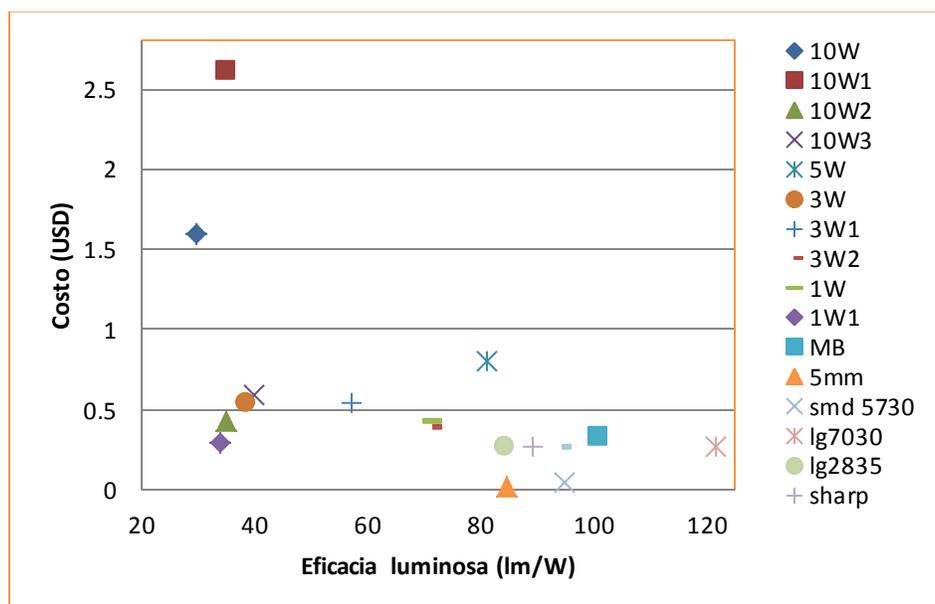


Figura 3. 33. Costo (USD) contra Eficacia Luminosa (lm/w) de LEDs caracterizados.

Sin embargo al momento de relacionar la Eficacia Luminosa-Costo versus Flujo luminoso, el dispositivo con doble chip deja de ser el más adecuado, debido al costo que representa. El LED que indica una mayor conveniencia para realizar una fuente de Iluminación conforme a la Figura 3.34 es el LED de 5mm, en donde este tipo de LED se muestra con la mejor relación Eficacia-Costo versus Flujo luminoso, sin embargo el exorbitante número de LEDs requeridos para un dispositivo de iluminación lo tornaría poco conveniente.

En segundo lugar de conveniencia para un arreglo se encuentra el LED SMD 5730, es importante recordar que este tipo de diodo emisor de luz fue encontrado en la lámpara

Sanelec con 23 LEDs, sin embargo ésta lámpara tiene la placa de circuito impreso (PCB) con la mayor área. Para el caso del LED de doble chip, éste se muestra como la tercera opción para el diseño de iluminación.

Ahora bien se necesitarían de un mayor número de muestras para poder observar a mayor detalle la tendencia que siguen los LEDs caracterizados, ya que las curvas de tendencias se tendrían que asemejar, entre la teórica y la experimental.

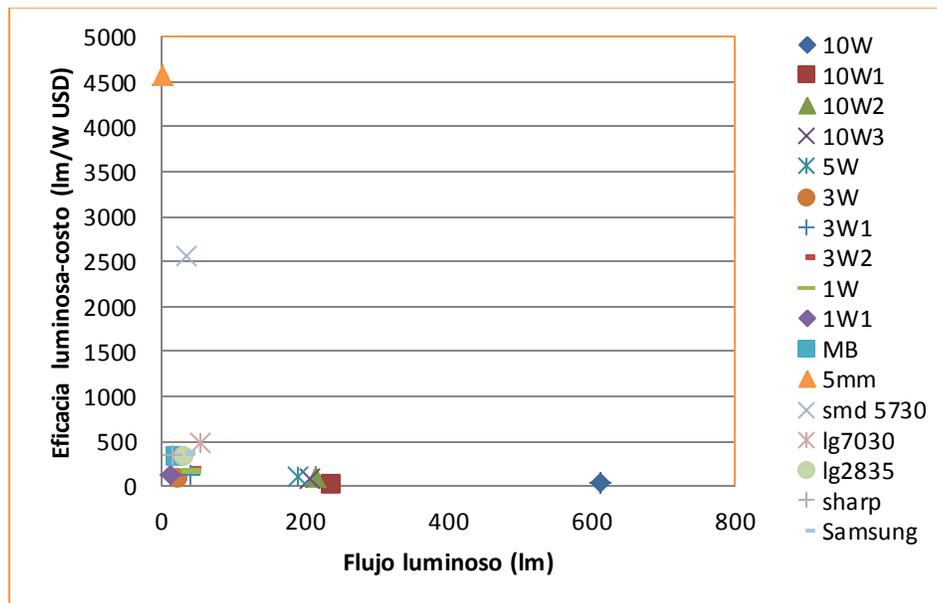


Figura 3.34. Eficacia Luminosa-costo [lm/(W*USD\$)] vs flujo luminoso total (lm) de LEDs caracterizados.

Partiendo de los LEDs adquiridos y de los datos recopilados, se realiza una comparativa sobre el desempeño de diodos emisores de luz en arreglos. Para esto primeramente se considera el flujo luminoso alcanzado por el primer LED de 10 W, en base a este flujo, se calcula el número de LEDs necesarios de cada tipo para alcanzar cierto flujo luminoso.

Sin embargo existirán cantidades de LEDs en fracción y ya que es imposible tener porciones de LEDs, los datos serán redondeados al próximo valor inmediato ya sea superior o inferior dependiendo el caso.

Es decir, se puede citar como ejemplo que: se requiere de un flujo luminoso de 50 lm, y se pretende alcanzar dicho flujo con un arreglo de LEDs, donde cada uno tiene un flujo de 13 lm, entonces:

$$\# \text{ de LEDs requeridos} = \frac{\text{Flujo luminoso requerido}}{\text{Flujo luminoso por unidad}} = \frac{50 \text{ lm}}{13 \text{ lm}} = 3.84 \text{ LEDs}$$

Sin embargo no se puede tener esa fracción de un diodo emisor de luz, por lo que las cantidades decimales se ajustan bajo el siguiente criterio:

- De entre .5 y .9 la cantidad sube al valor inmediato superior.
- De .0 a .49 la cantidad toma el valor únicamente del entero.

Entonces para el caso del ejemplo se tendría la cantidad de 4 LEDs dando un flujo luminoso total del arreglo de:

$$\text{flujo luminoso total} = \text{flujo luminoso por unidad} * \# \text{ de LEDs}$$

$$\text{Flujo luminoso total} = 13 \text{ lm} * 4 = 52 \text{ lm}$$

Por lo que se tendría un flujo luminoso total del arreglo de 52 lm, muy próximo al flujo requerido.

Considerando el criterio antes citado la primera aproximación se realiza para alcanzar un flujo luminoso de 613.9 lm, los cuales fueron obtenidos del primer LED de 10 W, en la Figura 3.35 se muestra el número de LEDs necesarios de cada tipo, para alcanzar cierto flujo. La línea vertical de color negro mostrada en la figura, indica el valor del flujo luminoso requerido (613.9 lm), lo que representa que los LEDs que más se acercan a la línea a su vez contemplaran el flujo luminoso más próximo al requerido.

Además se observa la gran diferencia que presenta el LED de 5mm, al encontrarse muy lejos del grupo de LEDs, esto debido a la gran cantidad de LEDs que se requieren para lograr el flujo de 613.9 lm.

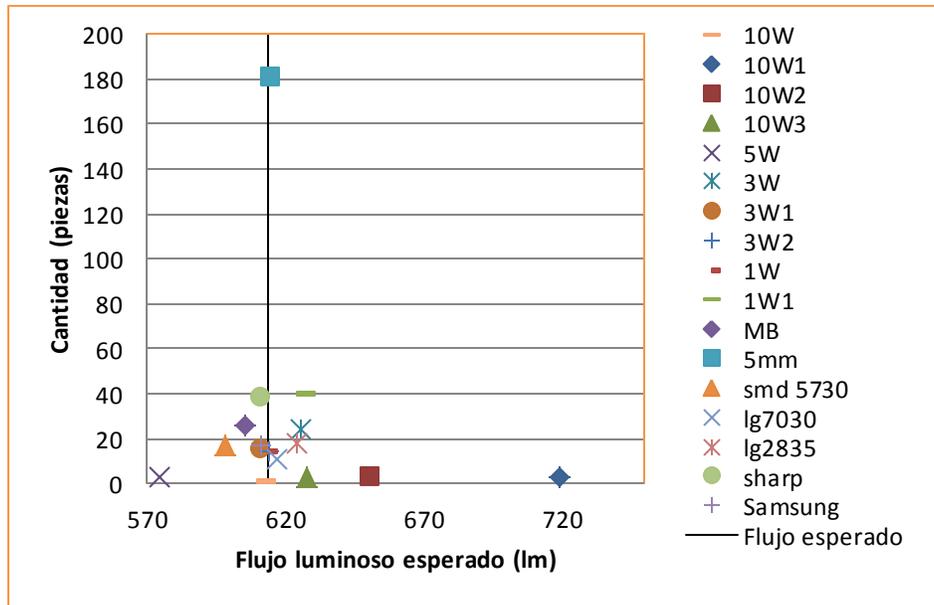


Figura 3.35. Cantidad de LEDs versus flujo luminoso para alcanzar 613.9 lm.

Conforme a los datos anteriores ahora se prosigue con la comparación de la Eficacia luminosa versus Costo, sin embargo para los siguientes análisis, los datos no son calculados en base a cada LED, sino en base al arreglo o grupo de LEDs necesarios para alcanzar dicho flujo, en la Figura 3.36 se observan los datos calculados para cada arreglo diferente, en donde se aprecia que el arreglo de aproximadamente 11 LEDs lg7030 (doble chip) representan la mayor eficacia, representando un gasto de alrededor de 3 dólares.

Sin embargo el costo del LED de 10 W que provee de ese flujo representa un costo de 1.59 dólares, ahora bien si se contemplará esencialmente el costo, entonces sería más conveniente utilizar un arreglo de 17 LEDs SMD 5730 lo que representa un costo de .63 dólares. No hay que olvidar que los costos mencionados representan exclusivamente el costo de compra de los LEDs, ya que si se consideran costos de mantenimiento los resultados posiblemente cambiarían.

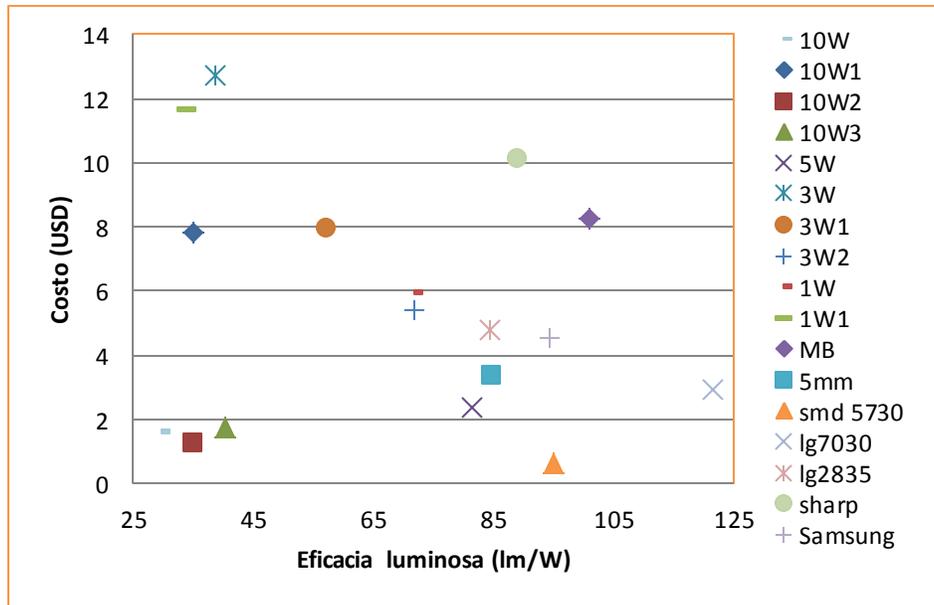


Figura 3.36. Costo versus Eficacia luminosa, para un flujo de 613.9 lm.

Conforme a la gráfica de “conveniencia” (eficacia luminosa-costo vs flujo luminoso) de la Figura 3.37, se puede observar que el arreglo de LEDs SMD 5730 sería el más apto a contemplar para realizar un diseño, ya que mantiene la relación más óptima en eficacia luminosa-costo versus flujo. Mientras que el diodo emisor de luz que se presenta como segunda opción es el que cuenta con doble chip, por lo que ambos LEDs (SMD 5730, Lg 7030) representan las mejores opciones para diseño de fuentes de Iluminación de Estado Sólido (SSL)

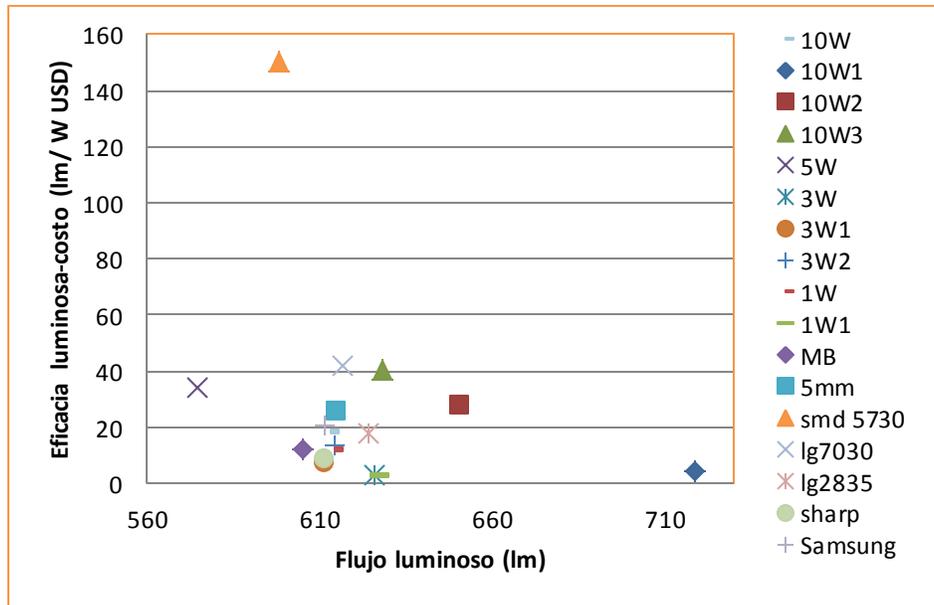


Figura 3.37. Eficacia Luminosa-costo [$\text{lm}/(\text{W} \cdot \text{USD})$] vs flujo luminoso (lm), para 613.9 lm.

Conforme a lo obtenido se realizaron las mismas aproximaciones para alcanzar el flujo de cada LED caracterizado, y deducir que es conveniente para la obtención de cada flujo luminoso, es decir: si conviene el LED que aporta ese flujo o el flujo obtenido mediante un arreglo de LEDs.

Sin embargo no se menciona a detalle ya que las aproximaciones se asemejan unas a otras, ya que los LEDs que se presentan como las mejores opciones del análisis anterior son los mismos para los otros flujos luminosos, esto sin importar si el cálculo es para obtener un mayor o menor flujo, a pesar de esto los datos son mostrados en forma de tablas al final de este documento (ver ANEXOS).

A partir de los resultados obtenidos y al no poder igualar el flujo luminoso de una lámpara comercial de 9 W con algún LED de la misma potencia, se deduce que los LEDs (adquiridos) de mayor potencia, presentan a su vez un menor flujo luminoso, obteniendo como consecuencia una disminución en la eficacia luminosa (lm/w), esto en comparación con las características que se podrían obtener mediante un arreglo de LEDs de menor potencia.

La aproximación realizada para lograr un flujo luminoso de 613.9 lm, fue en base a las características que presento el LED de mayor luminosidad, con una potencia de “10 W” dicha potencia es la proporcionada por el proveedor, sin embargo en la práctica éste LED presento una potencia superior a 20 W, aun así se consideró caracterizarlo, a pesar de esto no se logró igualar el flujo luminoso que proporcionan las lámparas comerciales con una potencia de 9 W.

Partiendo de esto se realizó el mismo tipo de comparación al anterior, pero ahora para alcanzar el flujo de 800 lm comúnmente presentado por lámparas LED de 9 W, en la Tabla 3.8 se muestran los datos obtenidos para cada LED. Para este análisis se descartan los LEDs que presentan una mayor potencia eléctrica de consumo que la que presenta la lámpara comercial.

Es importante destacar que para el caso del LED SMD 5730 se encontró que se necesitan de 23 piezas para lograr el flujo más próximo a 800 lm, siendo el mismo número de piezas y el mismo tipo de LED encontrado en la lámpara Sanelec de 9 W, por lo que se piensa que dicha lámpara se calculó conforme a una comparativa similar, además dicho LED es el que presenta una mayor relación eficacia luminosa-costo, indicándolo como la mejor opción para realizar el diseño de una fuente de iluminación de 800 lm.

Mientras que para el caso de la potencia eléctrica de consumo, el arreglo de LEDs SMD 5730 presenta un consumo de alrededor de 8.5 W, lo que indica muy posiblemente que el driver de la lámpara Sanelec de 9 W presenta el consumo de energía eléctrica faltante.

Tabla 3.8. Comparativa de arreglos para lograr un flujo de 800 lm.

Tipo	Cantidad	Flujo total (lm)	Costo USD	Potencia eléctrica (W)	Eficacia luminosa (lm/W)	Eficacia luminosa-USD (lm/W USD)
10W	1	613.9	1.593202337	20.47	29.9902296	18.82386745
10W1	3	719.4	7.80669145	20.37	35.31664212	4.523893681
10W2	4	868.4	1.699415826	24.72	35.12944984	20.67148564
10W3	4	838	2.33669676	20.76	40.36608863	17.27485111
5W	4	766.4	3.186404673	9.4	81.53191489	25.58743262
3W	31	809.1	16.46309081	20.77	38.95522388	2.366215696
3W1	20	816	10.62134891	14.2	57.46478873	5.410309859
3W2	18	790.2	6.978226235	10.98	71.96721311	10.31310976
1W	18	790.2	7.647371216	10.98	71.96721311	9.410712659
1W1	51	800.7	14.89644185	23.46	34.13043478	2.291180346
MB	34	792.2	10.83377589	7.82	101.3043478	9.350788576
5mm	235	799	4.36802974	9.4	85	19.45957447
SMD 5730	23	809.6	0.855018587	8.51	95.13513514	111.266745
lg7030	14	785.4	3.717472119	6.44	121.9565217	32.80630435
lg2835	23	798.1	6.107275624	9.43	84.63414634	13.85792153
Sharp	50	805	13.27668614	9	89.44444444	6.736955556
Samsung	22	792	5.841741901	8.36	94.73684211	16.21722488

En la Tabla 3.9, se comparan los dos LEDs que se presentan como las mejores alternativas para lograr el flujo de 800 lm, en donde se observan pros y contras, ya que el LED SMD 5730 muestra la mayor relación eficacia luminosa-costo, sin embargo el que tiene un menor consumo de energía es el LED SMD LG7030, lo que puede indicar que el mayor costo de compra que presenta el LG, se puede ver compensado en la factura de energía eléctrica.

Tabla 3.9. LED SMD 5730 vs LED LG SDM 7030 para lograr un flujo de 800lm.

	LED SMD 5730	LG 7030
Numero de LEDs	23	14
Numero de chips	23	28
Área del total de LEDs	3.93 cm ²	4.83 cm ²
Costo USD	.85	3.71
Potencia eléctrica requerida	8.51	6.44
Eficacia luminosa	95.13	121.95
Relación de conveniencia	111.26	32.8

Para el caso de la relación de conveniencia de la tabla anterior, ésta proviene de la división de la eficacia luminosa de la fuente de luz, entre el costo del producto, así se obtiene una relación de cuantos lúmenes sobre watt se pueden obtener de cierto precio, para así identificar que producto es el más conveniente en ese momento, ya que no se contemplan gastos de energía eléctrica ni vida útil del producto.

Para poder observar cómo influye el consumo de energía eléctrica de cada arreglo anterior, se realiza una comparativa del costo de operación. Para realizar los cálculos, se consideraron las tarifas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para uso doméstico con tarifa 01 de baja tensión (ver Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Tarifa de energía eléctrica CFE (MXN).

Concepto	Rango kWh	Costo por kWh
<i>Básico (tarifa 1)</i>	< 150	.793
<i>Intermedio (tarifa 2)</i>	150 > , < 280	.956
<i>Excedente (tarifa 3)</i>	> 280	2.802

Conforme a las características anteriores, se calcula el costo por consumo de energía eléctrica para ambos arreglos de LEDs (LED 5730, LG 7030), el tiempo de operación considerado fue de tres horas diarias, los datos son mostrados en la Tabla 3.11. Cabe mencionar que únicamente se contempla el consumo de los Diodos Emisores de Luz, ya que para un valor real de una lámpara LED, faltaría considerar el consumo del driver para cada arreglo.

En dicha tabla se observa que el mayor costo del LED LG 7030 (53.85 MXN), se vería recuperado en la factura de energía eléctrica en un período de:

- 30 años para tarifa 1.
- 24.8 años para tarifa 2.
- 8.5 años para tarifa 3.

El promedio del periodo es de 21 años, pasado este tiempo de consumo, el arreglo LED LG 5070 representaría una mayor conveniencia que su contraparte SMD 5730, sin embargo el tiempo promedio de duración de una lámpara LED es de 15 años, volviendo nuevamente inconveniente el diseño de una lámpara con este tipo de LED.

Es importante resaltar que se considera inconveniente para tarifas de uso doméstico, cuya facturación bimestral es menor a 250 MXN, ya que en tarifas superiores, se vuelve conveniente el diseño de lámparas con este tipo de LED (LG 7030), ya que el tiempo de recuperación de costo sería menor que el tiempo de vida útil promedio.

Tabla 3.11. Costo de operación (MXN) LED SMD 5730 vs LED LG 7030.

	Arreglo LED SMD 5730		Arreglo LED LG 7030	
	<i>Día</i>	<i>Año</i>	<i>Día</i>	<i>Año</i>
Tarifa 1	0.02024529	7.38953085	0.01532076	5.5920774
Tarifa 2	0.02440668	8.9084382	0.01846992	6.7415208
Tarifa 3	0.07153506	26.1102969	0.05413464	19.7591436

Conforme a la comparativa anterior, se realiza una similitud para conocer el costo de consumo de energía eléctrica para producir alrededor de 800 lm de las tres principales

fuentes de iluminación. En la Tabla 3.12, se muestran los costos calculados de las lámparas del mismo fabricante, en donde se observa la ventaja económica de utilizar fuentes de Iluminación de Estado Sólido.

Para este caso la diferencia de costo de compra entre una lámpara incandescente (10 MXN) y una lámpara LED (55 MXN), ambas de Osram, se ve recuperado alrededor de:

- 1 año para tarifa 1
- 10 meses para tarifa 2
- 3 meses y medio para tarifa 3

El tiempo de recuperación es en base a tres horas diarias de uso, después del periodo de recuperación, se considera el ahorro económico que contempla el uso de tecnología LED.

Tabla 3.12. Ahorro de energía eléctrica lámparas Osram.

	Incandescente		Fluorescente		LED	
	<i>Día</i>	<i>Año</i>	<i>Día</i>	<i>Año</i>	<i>Día</i>	<i>Año</i>
Tarifa 1	0.14274	52.1001	0.035685	13.025025	0.021411	7.815015
Tarifa 2	0.17208	62.8092	0.04302	15.7023	0.025812	9.42138
Tarifa 3	0.50436	184.0914	0.12609	46.02285	0.075654	27.61371

Todos los datos calculados en donde se hace referencia a consumo eléctrico, son en base a consumos de energía eléctrica de uso doméstico, con las tarifas mencionadas por aportación gubernamental, ya que a mayor consumo de kWh menor aportación gubernamental, además que se consideraron instalaciones donde no existen sanciones por un mal factor de potencia (menor a .9), ya que anteriormente se mencionó el porcentaje de costo adicional que se contempla por un mal consumo de energía eléctrica, conforme a esto en el siguiente apartado se realiza un estudio derivado del factor de potencia encontrado en las fuentes de iluminación.

Estudio de factor de potencia de diferentes configuraciones de lámparas

Anteriormente ya se mencionó lo referente al factor de potencia, conforme a esto se caracterizan las diferentes lámparas de iluminación, en primera instancia con un wattmetro, sin embargo con este instrumento no se perciben las curvas de desempeño eléctrico, para poder observar dichas curvas se utilizó el osciloscopio TELEDYNE LECROY HDO4054 .

En primera instancia se caracterizó la lámpara incandescente, por ser la fuente de iluminación que teóricamente contempla un factor igual a uno. En la Figura 3.38, se muestran las curvas de desempeño eléctrico, donde se observa que la curva de corriente asemeja a la de voltaje, al mismo tiempo que se encuentra en fase, por lo que también no existe potencia negativa, todo esto indica que su factor de potencia es óptimo, conforme a lo definido en factor de potencia.

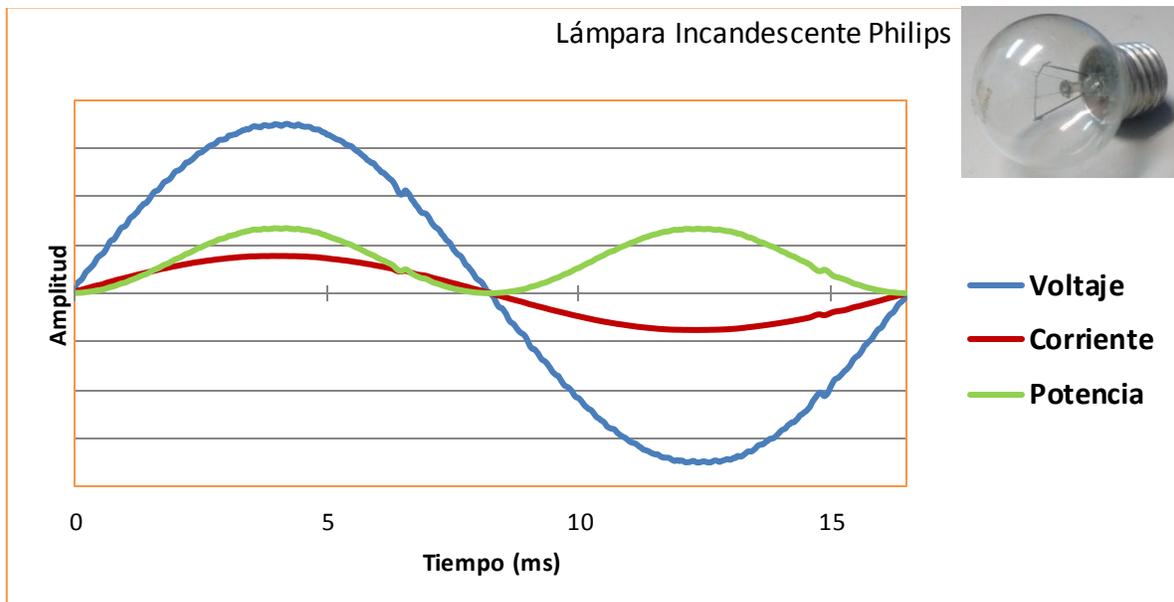


Figura 3.38. Curvas de desempeño eléctrico lámpara incandescente.

En la Tabla 3.13 se muestran los datos de operación para dicha lámpara con un wattmetro, así también los datos calculados con el osciloscopio, y en donde se puede

observar que en ambos casos los datos obtenidos se asemejan, indicando que el factor de potencia de una lámpara incandescente es prácticamente de 1, ya que la carga de la lámpara es puramente resistiva.

Tabla 3.13. Características de desempeño eléctrico lámpara incandescente.

Instrumento	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia	F.P.
<i>Osciloscopio</i>	124	.271	33.71	.99
<i>Wattmetro</i>	122.5	.304	37.9	.98

Recordando que el factor de potencia es de 1 para cargas exclusivamente resistivas, se sabe que para el caso de las lámparas LED, estas tendrán factores por debajo de 1, para esto se analizaron tres fuentes de iluminación LED de diferentes fabricantes, en primera instancia se observó el factor de potencia de una lámpara de manufacturación china, compuesta por 48 LEDs SMD 5730, es importante destacar que se vuelven a encontrar estos tipos de LEDs en una fuente de iluminación.

Las curvas de desempeño eléctrico para dicha lámpara son mostradas en la Figura 3.39, en donde se observa claramente que la curva de corriente no se asemeja a la de voltaje, además que se encuentran desfasadas, ya que el máximo del voltaje no coincide con el máximo de corriente, a pesar de esto no se encuentran potencias negativas.

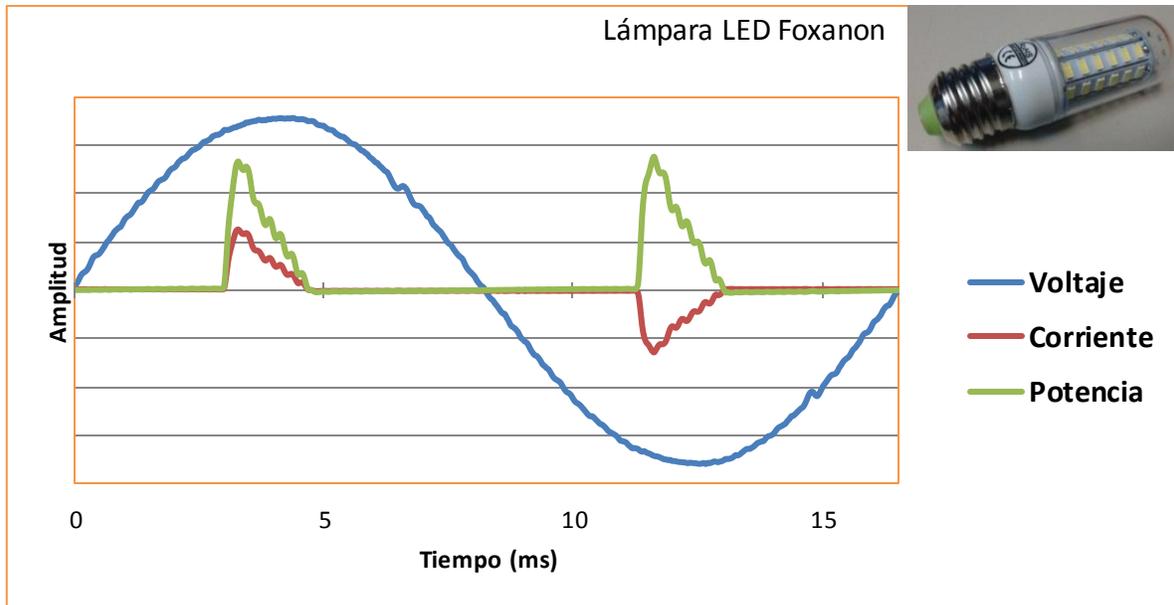


Figura 3. 39. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED Foxanon.

En la Tabla 3.14, se muestran los datos obtenidos de las mediciones con wattmetro y con osciloscopio para la lámpara LED Foxanon, en donde se observa que el factor de potencia se encuentra alrededor del .5, lo que indica que la mitad de la energía eléctrica que consume la lámpara se está desaprovechando, además dicha lámpara representa una potencia de alrededor de 3 W, con un flujo aproximado de 765 lm.

Se cree que para este caso el bajo factor de potencia que presenta puede deberse al driver de la lámpara, ya que el flujo luminoso es muy próximo al de una lámpara de 9 W, sin embargo más adelante se discute esta deducción.

Tabla 3.14. Características de desempeño eléctrico lámpara LED Foxanon.

Instrumento	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia	F.P.
<i>Osciloscopio</i>	126.8	.041	2.8	.52
<i>Wattmetro</i>	123	.052	3.4	.48

Conforme a los datos recabados se plantea analizar una lámpara LED Philips de 9 W, ya que esta marca es una de las líderes en el área de iluminación, en la Figura 3.40, se observan las curvas de operación que presenta ésta lámpara.

Para éste caso, las curvas de corriente y voltaje se asemejan más una con otra, con respecto a la gráfica anterior, sin embargo se puede percibir un pequeño desfaseamiento del voltaje y corriente, este desfaseamiento se puede apreciar principalmente al inicio del ciclo, en donde la curva de corriente va en retraso respecto a la de voltaje.

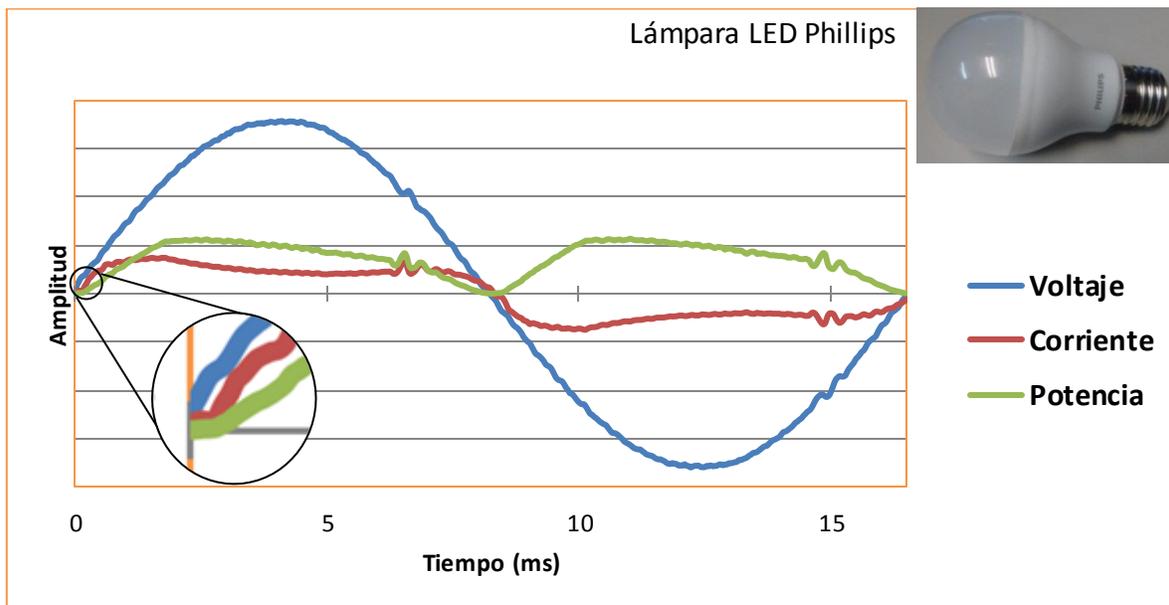


Figura 3.40. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED Philips.

Los datos obtenidos para ésta lámpara son mostrados en la Tabla 3.15, en donde se observa, que a pesar de lo mostrado en las curvas de desempeño eléctrico, la lámpara presenta un factor de potencia de .9, lo que indica que se encuentra dentro del margen para considerarlo como un factor de potencia adecuado, esto conforme a lo descrito en el apartado de factor de potencia.

Tabla 3.15. Características de desempeño eléctrico lámpara LED Philips.

Instrumento	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia	F.P.
<i>Osciloscopio</i>	126.48	.062	7.13	.89
<i>Wattmetro</i>	122.8	.07	8.1	.9

Por último se analiza otra lámpara de manufacturación china, las curvas características de ésta lámpara son mostradas en la Figura 3.41, en donde se espera que se tendrá un factor de potencia bajo, ya que las curvas de voltaje y corriente no se asemejan, se encuentran desfasadas, y además en algunos segmentos la curva de corriente y voltaje tienen valores con diferente polaridad, lo que ocasiona que se tengan valores de potencia negativos, indicando que gran parte de la energía desaprovechada es devuelta a la línea de tensión en forma de ruido eléctrico.

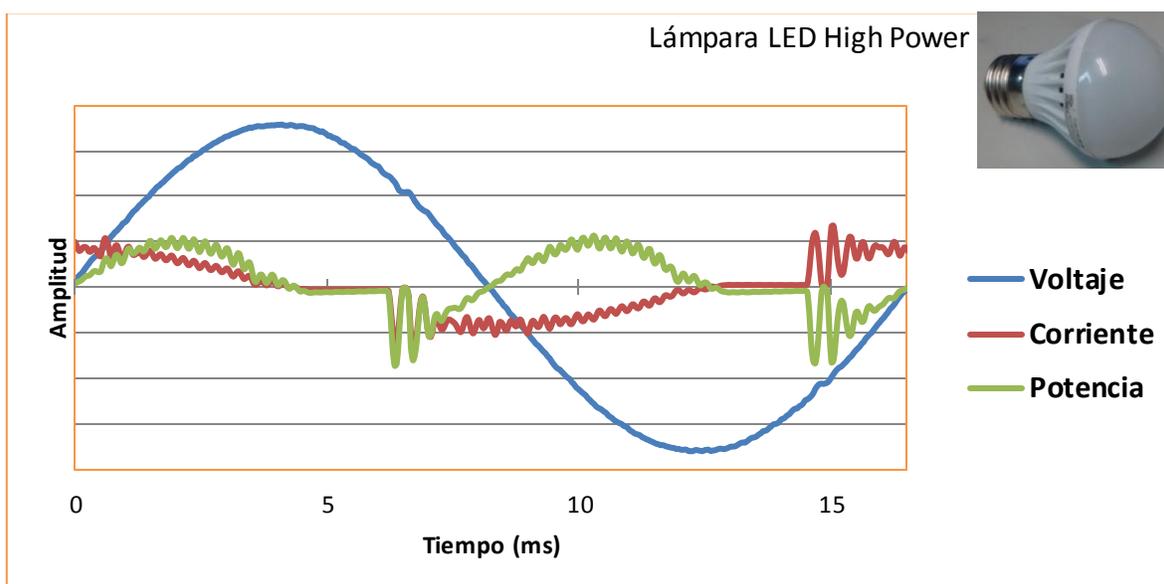


Figura 3. 41. Curvas de desempeño eléctrico lámpara LED High Power.

Como era de esperarse, la lámpara anterior conto con un factor de potencia de .16, en la Tabla 3.16 se muestran los datos de desempeño eléctrico recabados para esta lámpara.

Se cree posible que la gran diferencia de los valores mostrados por parte de los instrumentos de medición, sea debido a la resolución que presenta el wattmetro, por lo que la exactitud en la medición se ve afectada.

Tabla 3.16. Características de desempeño eléctrico lámpara LED High Power.

Instrumento	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia	F.P.
<i>Osciloscopio</i>	126.9	.074	1.57	.16
<i>Wattmetro</i>	123.7	.079	1.8	.08

Se considera que los valores encontrados sobre el factor de potencia son debidos al controlador de cada lámpara, conforme a esto, en el siguiente apartado se realiza una revisión a los diferentes drivers encontrados, con el fin de deducir si el controlador es el principal determinante del correcto aprovechamiento de energía eléctrica.

Estudio de controladores de LEDs

Para realizar la revisión a los drivers de las diferentes lámparas, primeramente se parte de recordar las características de desempeño eléctrico de un LED, ya que como se sabe, estos funcionan principalmente con Corriente Directa (CD ó Corriente Continua CC). Cuando se utilizan LEDs en fuentes de iluminación portátil como lámparas de mano, o en las luces de uso automotriz, no se necesita de algún tipo de conversión de energía de la fuente que la suministra, ya que estos dos campos anteriores funcionan a base de baterías, las cuáles contemplan Corriente Directa.

Sin embargo, al utilizar Diodos Emisores de Luz en fuentes de iluminación, en donde se tiene un suministro de Corriente Alterna (CA), se necesita de un convertidor, que transforme esa energía eléctrica, de CA a CD. Aun cuando ya se encuentre rectificadas la CA, es muy posible que se necesite disminuir el voltaje resultante de la conversión, esto conforme a cada diseño de las fuentes de iluminación, además de esto se necesita tener un control en la corriente que se suministra al (a los) LED (s).

En resumen la función del driver o controlador, es el convertir la energía de CA a CD, controlar la corriente suministrada, así como disminuir el voltaje al requerido. Una correcta alimentación de energía eléctrica a las fuentes de Iluminación de Estado Sólido, conlleva a una estabilidad en la luz de salida, así como una mayor durabilidad del dispositivo de iluminación.

A pesar de que el LED cuente con el disipador correcto, sino existe una correcta alimentación eléctrica, el LED podría consumir una mayor corriente a la necesaria, debido a las variaciones de voltaje de la línea eléctrica, lo que lleva a incrementar la temperatura del dispositivo, es decir que el driver también puede representar una estabilidad térmica del dispositivo.

Al incrementar la temperatura y consumo de corriente, el LED presentara una menor eficacia luminosa, por lo que también en esto llega a influir la elección o diseño de un correcto driver, es importante considerar que la vida útil del driver debe de ser semejante a la del propio LED (100,000 hrs promedio).

Las dos principales fuentes de voltaje son las lineales y las conmutadas, las lineales disponen de transformadores con núcleo de hierro, sin embargo el peso y tamaño los volvían inadecuados para muchas aplicaciones, por otro lado las conmutadas poseen pequeños transformadores de núcleo de ferrita, sin embargo estos trabajan a frecuencias superiores a 60 Hz, frecuencia de trabajo adecuada para transformadores de núcleo de hierro, además producen un mayor ruido eléctrico debido a la frecuencia de trabajo, a pesar de esto las fuentes conmutadas son más eficiente [10].

Conforme a lo anterior se analiza una comparativa entre los diferentes driver encontrados en las fuentes de Iluminación de Estado Sólido. En la Figura 3.42 se observa el driver de la lámpara Smartlight de 7 W, en donde se muestran la cara superior e inferior del driver, percibiendo un gran número de componentes, encontrando además un circuito integrado (CI GBF SOT23-6 AP3766K6TR-G1) que puede ser la base del driver.

Conforme a lo encontrado el driver de la lámpara Smartlight está compuesto por un transformador con núcleo de ferrita, el cual mantiene una oscilación para poder suministrar de voltaje y corriente al arreglo de LEDs, el factor de potencia que presento esta lámpara fue de .9, lo indica que la cantidad de energía no aprovechada es aceptable.



Figura 3.42. Driver lámpara LED Smartlight 7 W.

Para el caso de la lámpara Sanelec compuesta por 23 LEDs SMD 5730 el driver se muestra en la Figura 3.43, en donde se percibe que el diseño del driver es más simple, encontrando nuevamente un transformador de ferrita y un circuito integrado (CS6583BO), el cual se cree que regula las características de oscilación del transformador, el factor de potencia que presento esta lámpara fue de .48.

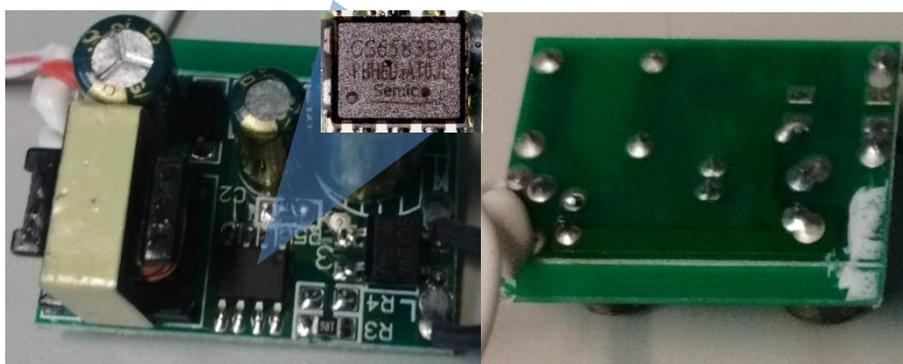


Figura 3.43. Driver lámpara LED Sanelec 9 W.

Otra de las lámparas que presento un factor de potencia medio, fue la de manufacturación china Foxanon, con un factor de .5, sin embargo el driver de esta lámpara es muy diferente al de la lámpara Sanelec, a pesar de que cuentan con casi el mismo factor de potencia.

La principal diferencia entre ambos controladores, es la falta del transformador de núcleo de ferrita para el caso de la lámpara Foxanon, sin embargo el arreglo de 48 LEDs conectados en serie le permite prescindir del uso de un transformador, ya que el voltaje requerido para dicho arreglo es de alrededor de 160 v, que casi son los provenientes de la sola rectificación de CA a CD.

En la Figura 3.44 se muestra el driver de la lámpara Foxanon, el cual contempla solo el uso de seis componentes electrónicos en el que destaca el circuito integrado “China OR 00 S1 028 6PRE155163”.

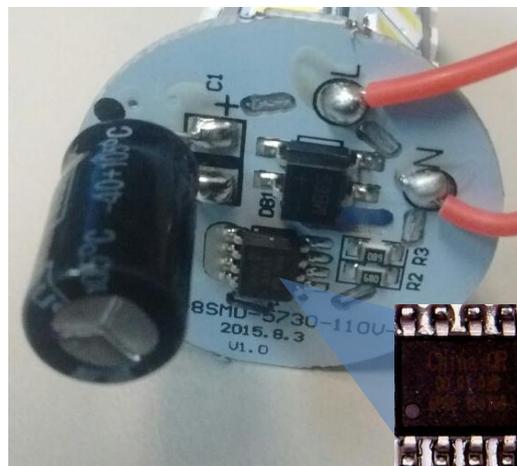


Figura 3.44. Driver lámpara LED Foxanon 3 W.

Mientras que para el caso del controlador de la lámpara Osram (ver Figura 3.45), se observa nuevamente el transformador con núcleo de ferrita, sin embargo un componente que puede parecer simple, es el capacitor de poliéster, el cual es muy comúnmente utilizado en fuentes de voltaje por caída de tensión.

Además se observa una resistencia en serie de la entrada de la línea eléctrica con la entrada del rectificador (puente de diodos), la cual puede tener la función de disminuir la corriente del circuito. Es importante mencionar que el factor de potencia que presento esta lámpara fue de .9 y que cuenta con el CI “AXN5HG”.

6 elementos y que no cuenta con circuito integrado (CI), ni transformador para reducir el voltaje de entrada.

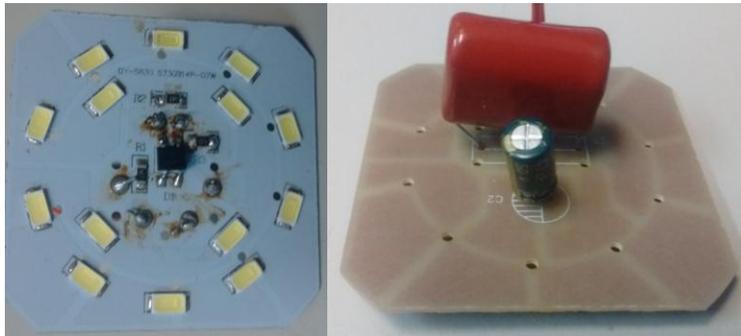


Figura 3.47. Driver lámpara LED High Power de 4W.

Para este caso al tener el circuito más simple y con el menor factor de potencia, se realiza ingeniería inversa, para así conocer el diagrama de conexión de los componentes, el cual se muestra en la Figura 3.48.

Se observa que el componente principal de dicho diagrama es el capacitor de poliéster, que tiene la función de limitar la corriente y voltaje al circuito, este diagrama es comúnmente conocido como fuente por caída de tensión.

Al tener un componente que limite la corriente que puede ser suministrada al circuito, ocasiona que al conectar la carga, esta sea la misma que haga bajar el voltaje a valores calculados, lo que indica que el voltaje de salida de este circuito sin carga, presente valores de voltaje de aproximadamente 180 V, provenientes una rectificación de CA.

El capacitor que se presenta en paralelo a la carga tiene la función de suavizar la señal rectificada, sin este componente se tendrían parpadeos considerables por parte de los LEDs.

La resistencia R2 consume la corriente restante o sobrante que suministra el capacitor, esto debido a que no existen valores de capacitancia infinitos, ya que sólo existen valores estandarizados, a los cuáles el diseño se debe de acoplar, que para este

caso el capacitor suministra mayor corriente a la requerida, sin esta resistencia el voltaje podría elevarse perjudicando a los LEDs, además dicha resistencia también funciona como protección, ya que al ser desconectada la lámpara de la red eléctrica, la resistencia se encarga de descargar el capacitor.

Sin embargo el principal elemento de este tipo de fuente, es a su vez, el responsable del bajo factor de potencia, esto se plantea más adelante.

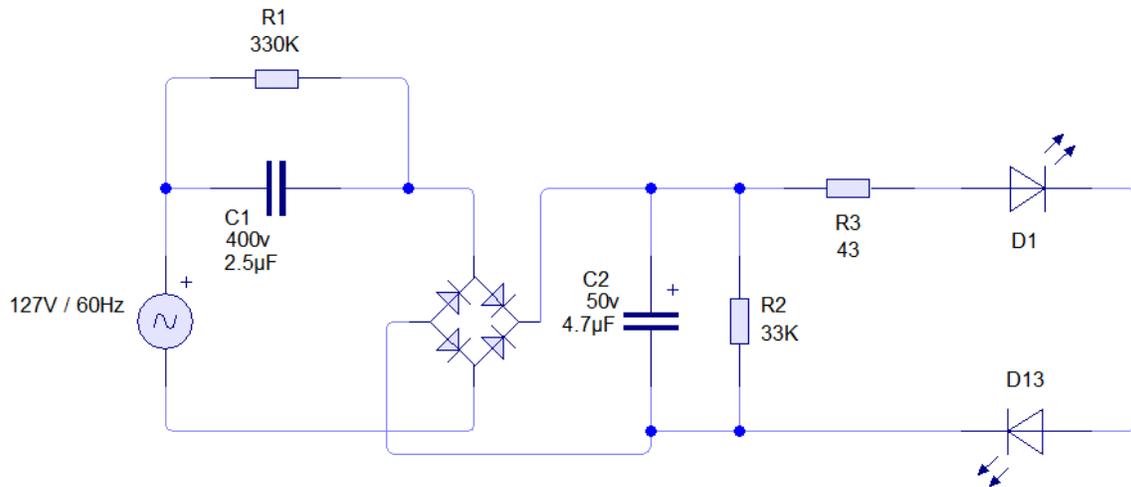


Figura 3.48. Diagrama electrónico de driver con .3 de f.p.

Por lo anterior se deduce que el driver es el responsable de tener un correcto aprovechamiento de energía eléctrica, o lo que es lo mismo un correcto factor de potencia, sin embargo esta deducción se vuelve plantear más adelante.

Ahora bien el precio de las diferentes lámparas LED también va de acuerdo al factor de potencia que presentan, ya que un dispositivo de iluminación LED que presenta un buen aprovechamiento de energía, requiere de un circuito electrónico complejo, lo que eleva el precio a comparación de una fuente de iluminación en donde la electrónica es mínima, sin embargo el costo de compra se puede ver retribuido en la factura de energía eléctrica.

La correcta elección-diseño del driver, mantendrá también la mejor relación eficacia luminosa vs flujo luminoso, ya que este componente es el encargado de suministrar la corriente y voltaje necesarios, minimizando las pérdidas.

Sin embargo al tratarse de dispositivos de estado sólido, estos poseen rápidas respuestas a variaciones de corriente y/o voltaje que a su vez ocasionan variaciones del flujo luminoso, y que son ocasionadas principalmente por las fluctuaciones de la energía eléctrica. Las variaciones de luminosidad pueden no ser perceptibles al ojo humano, debido a la frecuencia en la que se encuentran, dicha frecuencia de operación proviene de la rectificación de CA a CD, así como del mismo principio de funcionamiento del driver, debido a esto en el siguiente apartado se realiza un análisis sobre este fenómeno conocido como “flicker” (parpadeo).

Parpadeo en Fuentes de Iluminación

Anteriormente en otra sección, se mencionó lo relacionado al parpadeo que presentan las fuentes de iluminación, así como los riesgos a la salud que se pueden presentar por la interacción con este fenómeno. Para verificar el parpadeo proveniente de dichas fuentes, se realiza una comparativa de los principales dispositivos de iluminación, todos fabricados por Osram.

Con la ayuda de una cámara ultra-rápida, se caracterizó en primera instancia el parpadeo de una lámpara incandescente, para esto se registraron a 500 fotogramas por segundo (Frames Per Second, FPS), o lo que es lo mismo, se registró una imagen cada 2 milisegundos de la lámpara en operación.

Al tratarse de una lámpara incandescente se espera tener variaciones de intensidad conforme a la fluctuación de la CA. Para esto se calculó en cuantas imágenes sería posible encontrar dichos cambios de intensidad partiendo de conocer la frecuencia de la red eléctrica (60 Hz), entonces se tiene que:

$$f \text{ (Hz)} = \frac{1}{T \text{ (s)}} \quad \therefore \quad T \text{ (s)} = \frac{1}{f \text{ (Hz)}} = .016 \text{ s}$$

Donde:

f = frecuencia (Hz)

T = período (segundos)

Sin embargo al tratarse de una onda senoidal, el semiciclo positivo y negativo son idénticos, por lo que la variación se encontrara en un solo semiciclo. Entonces si se tiene una imagen cada 2 milisegundos se obtiene que el:

$$\# \text{ de imágenes correspondientes a un ciclo} = \frac{.008_{\text{semiciclo}}}{.002} = 4 \text{ imágenes}$$

En la Figura 3.49 se muestran 5 imágenes, esto con el fin de corroborar, ya que la primera imagen y la última deben de ser idénticas.



Figura 3.49. Imágenes de parpadeo lámpara incandescente Osram.

Conforme a que no se percibe una diferencia significativa, en la variación de intensidad de las imágenes anteriores, se planteó realizar un circuito que detectara dichas variaciones, pero esta vez de forma gráfica, para esto se utilizó un fotodiodo que detectará el ancho de banda del visible, a su vez dicho diodo fue conectado a un osciloscopio, con el cuál se recaba la información de la lámpara en operación.

En la Figura 3.50 se muestra la curva obtenida, debida al parpadeo que presenta la lámpara incandescente, en donde se observa que dicha lámpara presenta una atenuación de más del 10 %

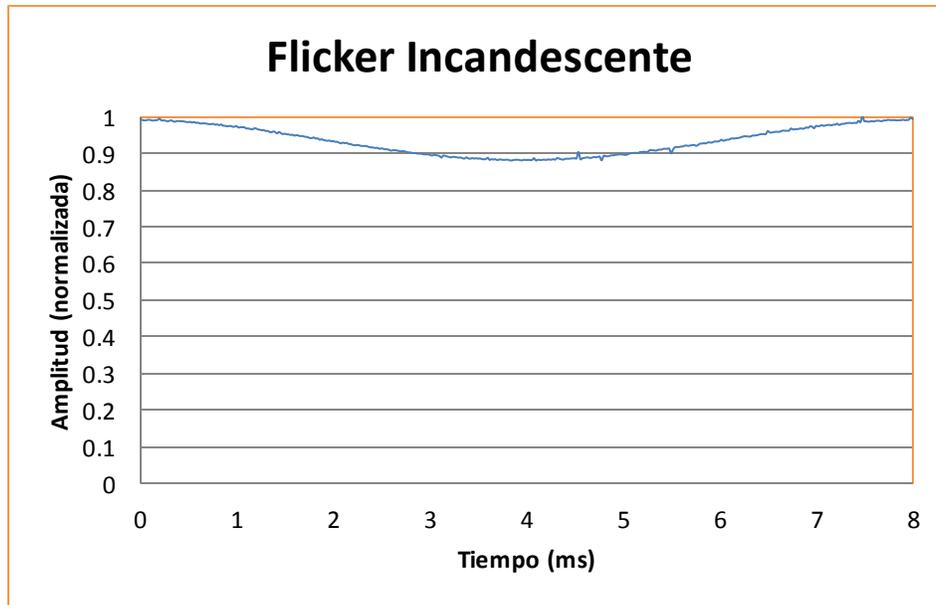


Figura 3.50. Atenuación de lámpara incandescente debida al parpadeo.

Para calcular el porcentaje correcto de parpadeo, se tiene la siguiente expresión matemática [11]:

$$M(\%) = 100 * \frac{(Max - Min)}{(Max + Min)}$$

Donde:

M (%) = porcentaje de modulación o porcentaje de parpadeo.

Max = Máxima luminancia de la fuente.

Min = Mínima luminancia de la fuente.

Por lo que se tiene:

$$M(\%) = 100 * \frac{(1 - .879)}{(1 + .879)}$$

$$M(\%) = 100 * \frac{(.121)}{(1.879)} = 6.43 \%$$

Conforme la norma propuesta por el IEEE (IEEE Std. 1789-2015) sobre los efectos del parpadeo anteriormente mencionada, la lámpara incandescente Osram se encuentra en el área de bajo riesgo, conforme a la Figura 3.51, ya que contempla un porcentaje modulación de 6.43 % a una frecuencia de 120 Hz (el doble de la frecuencia de la red eléctrica debido a la repetición de los semiciclos).

Sin embargo el porcentaje de modulación lo considera correcto para limitar efectos biológicos de bajo riesgo, ya que la misma norma contempla la siguiente expresión para el máximo parpadeo de la fuente de iluminación con una frecuencia entre 90 Hz y 1250 Hz.

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.08 = 120 * .08 = 9.6 \%$$

Conforme a esto, la lámpara incandescente evita los efectos biológicos de bajo riesgo, producidos por el parpadeo.

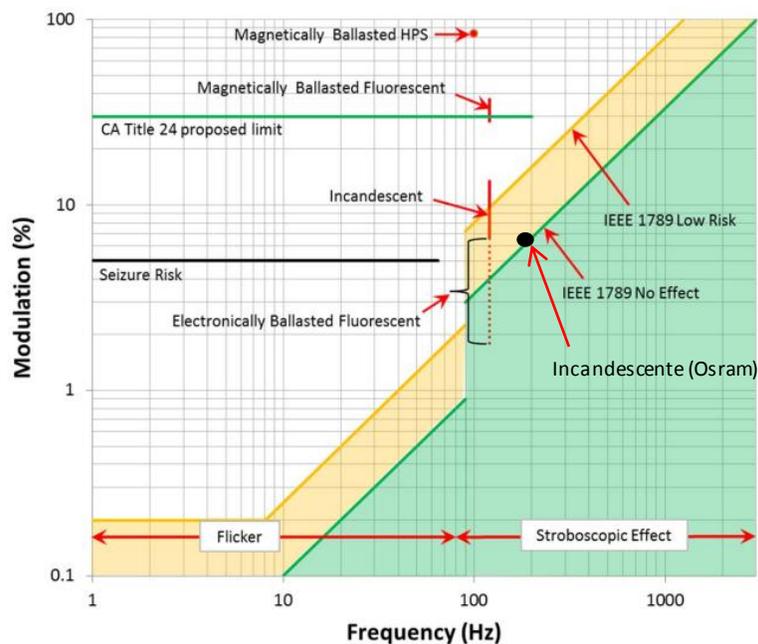


Figura 3.51. Profundidad de riesgo por parpadeo, lámpara incandescente.

Sin embargo existe otra expresión matemática para limitar algunos efectos de mayor riesgo relacionados con el parpadeo, claro está que esto dependerá de las diferentes características poblacionales, anteriormente comentadas.

Para frecuencias entre 90 Hz y 3000 Hz

$$\text{máx \% flicker} = \text{Frecuencia} * 0.0333 = 120 * 0.033 = 3.99 \%$$

Por lo que para este caso la lámpara incandescente si puede ocasionar efectos biológicos, es importante resaltar que esto dependerá de la población, tiempo de exposición, tareas realizadas con este tipo de iluminación, entre otras.

La segunda lámpara analizada bajo el mismo criterio, fue la fluorescente del fabricante, en la Figura 3.52 se observan las imágenes de la variación de intensidad de dicha lámpara, sin embargo como en el caso de la incandescente no se percibe a detalle la atenuación del flujo luminoso.

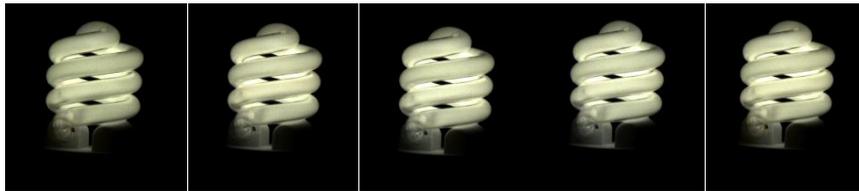


Figura 3.52. Imágenes de parpadeo lámpara fluorescente Osram.

Conforme a la baja percepción de cambio en la luminosidad, se obtiene nuevamente la curva de la intensidad luminosa versus tiempo (ver Figura 3.53), en donde se percibe que para este caso, el valor máximo de atenuación (aprox. 10 %), no se encuentra a la mitad del periodo, esto puede ser debido al principio de funcionamiento de la lámpara fluorescente, ya que recordando, ésta proporciona luz blanca a partir de una descarga eléctrica que produce radiación UV, la cual es absorbida por un fósforo, el cual produce luz visible, haciendo su principio de funcionamiento muy diferente a la incandescente.

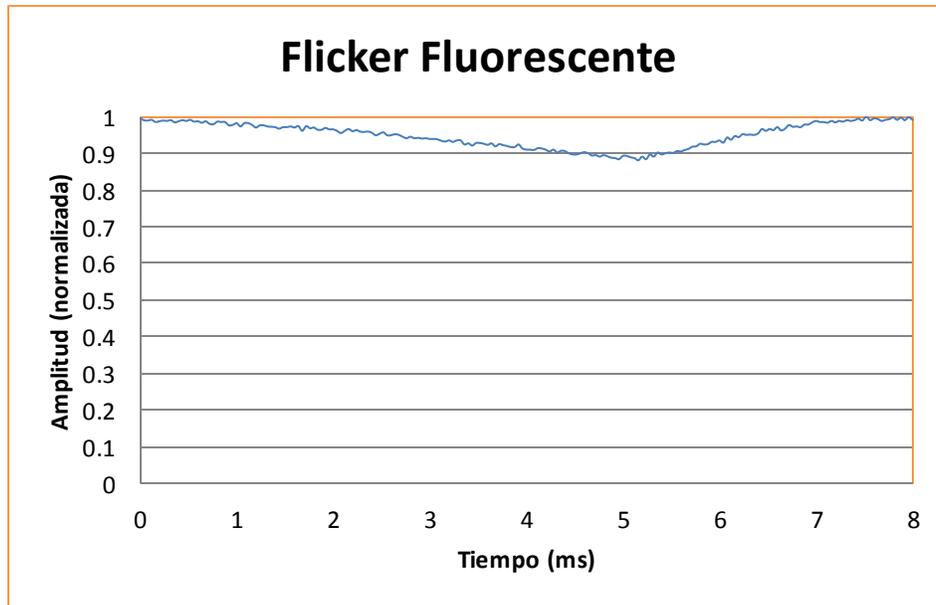


Figura 3.53. Atenuación de lámpara fluorescente debida al parpadeo.

Al igual que para el caso anterior se ocupa la misma expresión matemática para calcular el porcentaje de parpadeo, por lo que se tiene:

$$M(\%) = 100 * \frac{(1 - .88)}{(1 + .88)}$$

$$M(\%) = 100 * \frac{(.12)}{(1.88)} = 6.38 \%$$

Lo que indica que el porcentaje de parpadeo de la lámpara fluorescente es menor al porcentaje de parpadeo de la lámpara incandescente, ambas fabricadas por Osram. Mientras que para el caso de la profundidad de riesgo biológico, en la Figura 3.54 se observa la ubicación de la lámpara fluorescente acorde a la norma del IEEE.

Conforme a los resultados anteriores se sabe que para frecuencias de 120 Hz, el porcentaje de modulación para evitar riesgos biológicos bajos debe de ser menor a 9.6%, mientras que para limitar los de alto riesgo deberá ser menor a 3.99%. Debido a que ni la lámpara incandescente ni fluorescente cumplen por completo con esta norma, era el descontento de la NEMA al IEEE por dicha exigencia, ya que si estas lámparas no alcanzan

a superar los requerimientos establecidos, lo será más difícil para Iluminación de Estado Sólido (LEDs) debido a la velocidad de respuesta de los dispositivos de estado sólido.

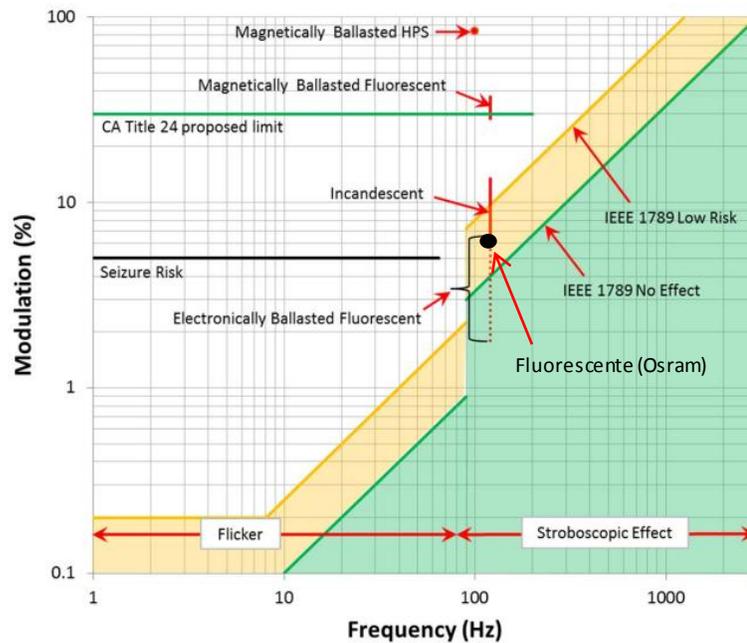


Figura 3.54. Profundidad de riesgo por parpadeo, fluorescente Osram.

Ahora bien se analiza el parpadeo que presenta una lámpara LED Osram, para este análisis de igual forma se tomaron imágenes cada 2 milisegundos. En la Figura 3.55 se observan las 5 imágenes representativas de la variación de intensidad, en donde además se espera tener un porcentaje de atenuación alto, ya que el cambio de intensidad es muy notorio.



Figura 3.55. Imágenes de parpadeo lámpara LED Osram.

Para conocer gráficamente el comportamiento del parpadeo, igualmente se registran los datos de intensidad, los cuales son normalizados y mostrados en la Figura 3.56, en donde se observa que la lámpara LED Osram presenta una atenuación de más del

70 %, a pesar que la lámpara posea un factor de potencia adecuado (.9) debido al driver, esto no indica que a su vez se tenga un mínimo parpadeo, ya que conforme a lo mostrado se comprueba que ambas características de desempeño son independientes.

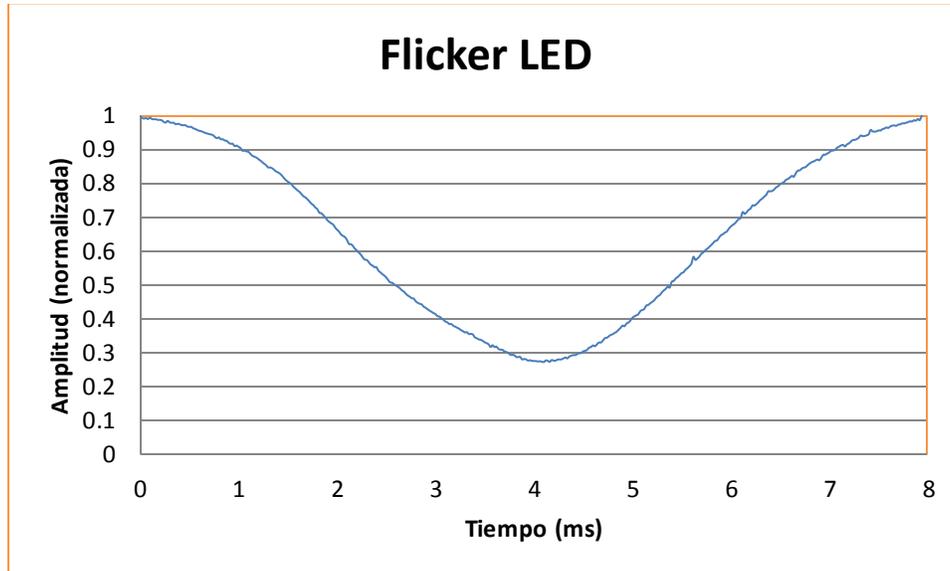


Figura 3.56. Atenuación de lámpara LED debido al parpadeo.

Para obtener los valores del porcentaje de parpadeo se realiza la correspondiente operación por lo que se tiene que:

$$M(\%) = 100 * \frac{(1 - .271)}{(1 + .271)}$$

$$M(\%) = 100 * \frac{(.729)}{(1.271)} = 57.35 \%$$

El 57 % de parpadeo indica que este tipo de lámpara no cumple con ninguna de las especificaciones para limitar el riesgo biológico que puede llegar a ocasionar el parpadeo, ya sea de riesgo bajo o alto, que debe ser debajo del 9.6 % y 3.99 % respectivamente.

Conforme a esto el porcentaje de parpadeo es representado en la Figura 3.57, en donde se observa que dicha lámpara presenta el mayor riesgo, en comparación con las lámparas analizadas, esto a pesar de que se trate de la fuente de iluminación comparada más eficiente.

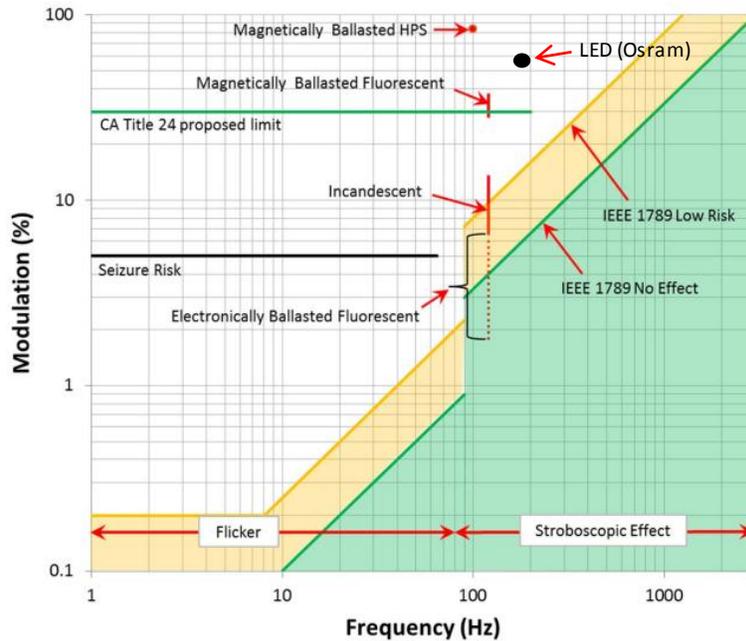


Figura 3.57. Profundidad de riesgo por parpadeo, LED Osram.

Debido a que ninguna de las tres principales fuentes de iluminación contempla características de desempeño aceptables por la norma del IEEE, se planteó realizar el último de estudio de parpadeo, pero para este caso se contempló una lámpara halógena Osram, el procedimiento de caracterización fue el mismo que para los casos anteriores.

Las imágenes capturadas para dicha lámpara se muestran en la Figura 3.58, en donde no se percibe a detalle la atenuación que puede presentar dicha lámpara, por lo que esto es un buen indicador de un mínimo parpadeo.



Figura 3.58. Imágenes de parpadeo lámpara halógena Osram.

Para observar gráficamente el parpadeo que presenta la lámpara se registraron los datos de operación, la curva de intensidad versus tiempo se muestra en la Figura 3.59, en

donde se observa que ciertamente esta lámpara presenta una menor atenuación que las lámparas anteriores.

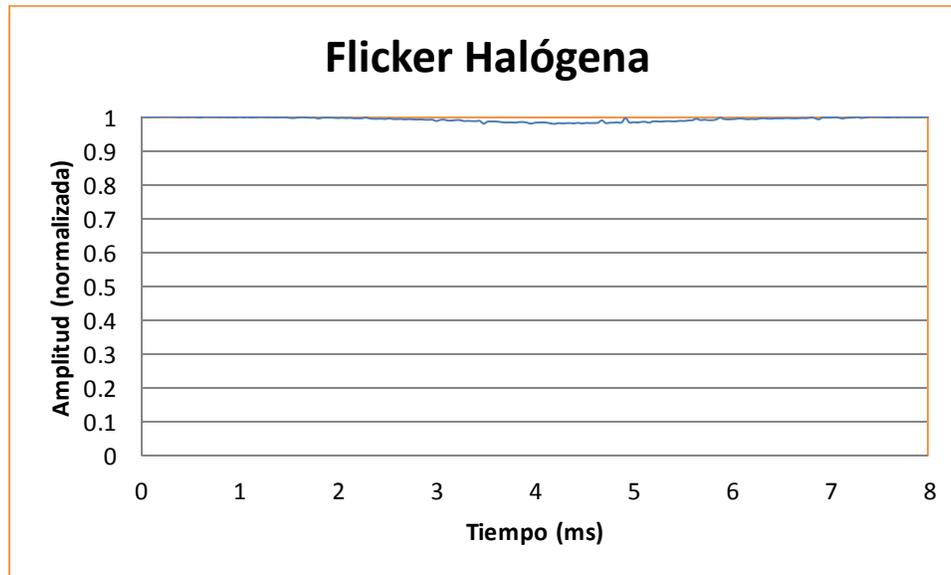


Figura 3.59. Atenuación de lámpara halógena debida al parpadeo.

Para conocer el porcentaje de parpadeo se recurre a las formulas antes mencionas, en donde se tiene que:

$$M(\%) = 100 * \frac{(1 - .978)}{(1 + .978)}$$

$$M(\%) = 100 * \frac{(.022)}{(1.978)} = 1.11 \%$$

El mínimo porcentaje de parpadeo presentado por la lámpara halógena, indica que es la única de las lámparas comparadas, que cumple con los parámetros exigidos por la norma IEEE Std. 1789-2015 recomendada por el IEEE, ya que el porcentaje de parpadeo es menor al indicado para limitar los riesgos biológicos bajos y altos, que puede traer el parpadeo en las fuentes de iluminación.

Por último, en la Figura 3.60 se muestra la profundidad de riesgo biológico por parte de la lámpara halógena, en donde se observa que conforme a un porcentaje de parpadeo de 1.11 % y una frecuencia de 120 Hz, no se contemplan riesgos a la salud por la

exposición a este tipo de iluminación, esto conforme a las complicaciones que puede presentar el parpadeo.

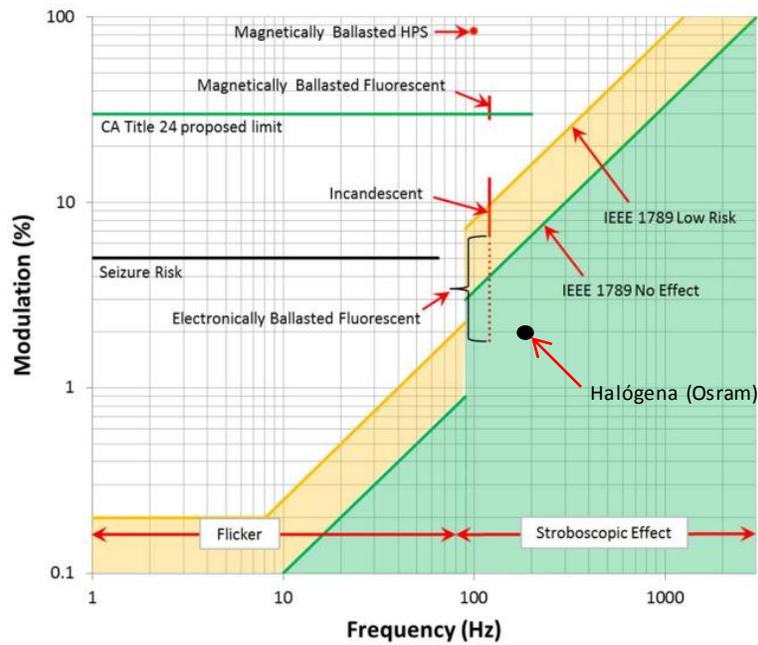


Figura 3.60. Profundidad de riesgo por parpadeo, lámpara halógena.

Por consiguiente, en la Figura 3.61 se muestran las curvas de parpadeo de cada lámpara analizada, en donde se percibe claramente la gran diferencia que posee la fuente de iluminación LED respecto a las demás.

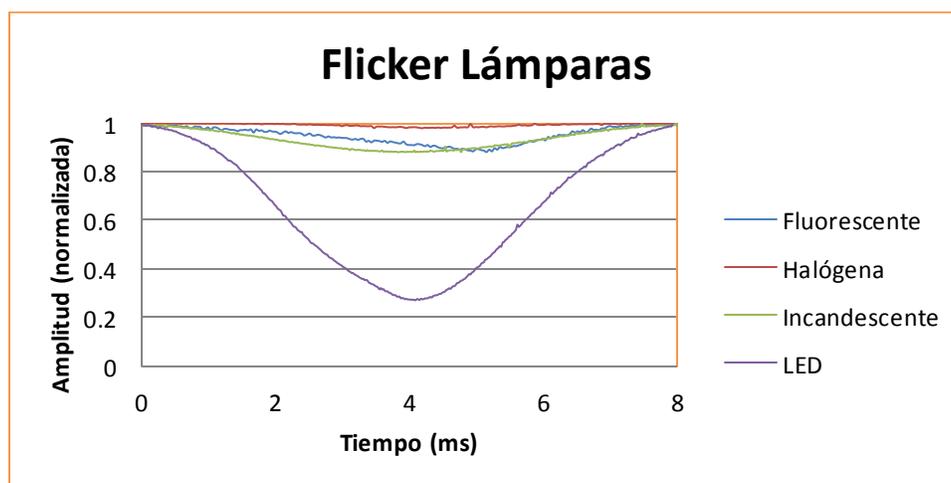


Figura 3.61. Atenuación de lámparas debidas a parpadeo.

Diseño y evaluación de prototipos

Construcción de prototipos

Conforme a los LEDs adquiridos, se contempló realizar el primer prototipo con un arreglo de LEDs de 5 mm, por ser el diodo emisor de luz más económico adquirido, para estos diseños se plantea que el uso de electrónica para su funcionamiento sea sólo el fundamental, esto con el fin de comprobar la importancia del driver en una fuente de iluminación.

Partiendo de conocer que el LED funciona con Corriente Directa y se tiene Corriente Alterna en la línea eléctrica, se plantea calcular cuántos LEDs de 5 mm se pueden conectar en serie, para que estos sean los adecuados al voltaje de CD resultante de la conversión.

Tras saber que dicho diodo emisor de luz contempla un voltaje 3.3 V y una corriente de 14 mA para su funcionamiento, se realiza la siguiente metodología para el diseño de una fuente de iluminación con este tipo de LED:

1) Se obtuvo la lectura de Corriente alterna (CA) que es suministrada en casa habitación, dando una lectura promedio de 127 V RMS (Root Mean Square),

2) Conforme a lo descrito por el fabricante el LED a utilizar funciona con CD, por lo tanto se procede a obtener el dato de equivalencia de 127 CA a CD.

$$\therefore \text{si } V_{\text{RMS}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) (\text{Voltaje máximo}) [12].$$

$$\text{Voltaje máximo} = \frac{V_{\text{RMS}}}{\frac{1}{\sqrt{2}}}$$

$$\text{Voltaje máximo} = V_{\text{RMS}} * \sqrt{2}$$

$$\text{Voltaje máximo} = 127 * \sqrt{2}$$

$$\text{Voltaje máximo} = 179.6 \cong 180 \text{ V CD}$$

Conociendo el valor de voltaje teórico de corriente directa, se procede a calcular el número de LEDs necesarios conectados en serie para dicho voltaje, sin considerar pérdidas por rectificado, filtrado, ni por barrera de conducción para cada LED, por lo que se tiene que:

$$\text{Número de LEDs} = \frac{\text{Voltaje máximo CD}}{\text{Voltaje de operación LED}} = \frac{180}{3.3} = 54.4 \cong 55 \text{ LEDs}$$

Es decir que se requieren conectar 55 LEDs en serie para un voltaje rectificado de casa habitación. Para rectificar y filtrar la señal se utiliza un puente de diodos, capacitor y resistencia como se muestra en el esquema de la Figura 3.62.

Es importante señalar que el diagrama no cuenta con un controlador de corriente, por lo que las mismas variaciones de tensión de la línea eléctrica podrían afectar al dispositivo, modificando características tanto eléctricas como ópticas.

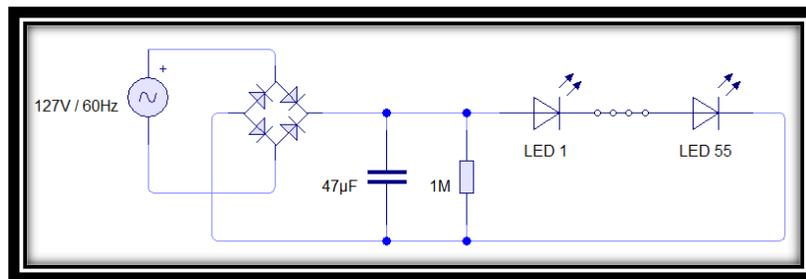


Figura 3.62. Diagrama básico de conexión de LEDs a CA.

Con el arreglo anterior se puede calcular la potencia eléctrica de corriente directa únicamente para el conjunto de LEDs, tal y como se muestra a continuación:

$$P_{CD \text{ LEDs}} = VI$$

Conociendo que la corriente necesaria para cada LED es de 14 mA, entonces:

$$P_{CD \text{ LEDs}} = (180)(.014) = 2.52 \text{ W}$$

Lo que indica que el grupo de LEDs presentan un consumo eléctrico de 2.52 W, sin embargo faltaría conocer el consumo del dispositivo en conjunto, así como el factor de potencia que se presentaría sin el uso de un driver adecuado.

Posterior a los cálculos, se parte al ensamble del dispositivo sobre una placa de circuito impreso (PCB). En la Figura 3.63 a)-b) se observa el dispositivo realizado, mientras que para c) se observa el dispositivo en funcionamiento en conjunto con un difusor óptico de la marca Sanelec, en donde además se percibe un patrón con diferente intensidad lumínica, el cual se le atribuye a la propia óptica con que cuentan los LEDs de 5mm.

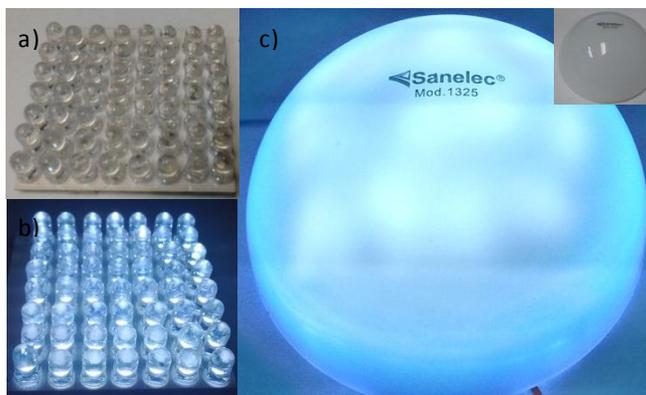


Figura 3.63. Arreglo de LEDs 5mm. a) LEDs en PCB. b) LEDs en funcionamiento. c) LEDs con difusor.

Conforme al arreglo anterior, y al contemplar que no se obtuvo un patrón de iluminación uniforme, se recurre a la realización de un segundo dispositivo pero ahora utilizando LEDs SMD 5730.

Dicho arreglo se realizó bajo el mismo esquema del primer dispositivo, sin embargo ahora cada LED opera a 3.4 v y 110 mA. El dispositivo armado se observa en la Figura 3.64 a)-b), mientras en c) se observa en funcionamiento en conjunto al difusor óptico, en donde se aprecia la uniformidad en la iluminación, en comparación con el arreglo de 5mm.

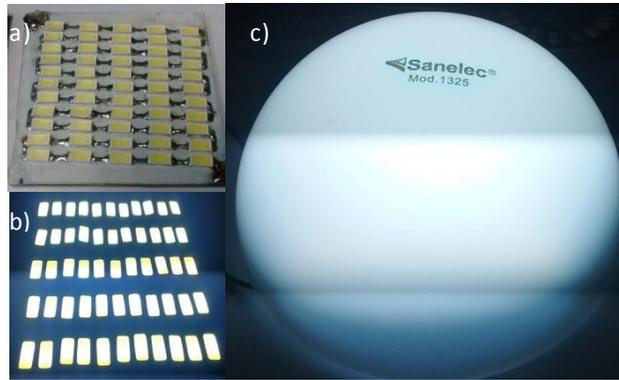


Figura 3.64. Arreglo de LEDs SMD 5730. a) LEDs en PCB. b) LEDs en funcionamiento. c) LEDs con difusor.

Es importante destacar que las franjas presentes del arreglo de LEDs en funcionamiento de la imagen anterior, se deben a la superposición de imágenes captadas por la cámara, esto debido a la velocidad de obturación (velocidad de muestreo o barrido) de la cámara, en conjunto con el parpadeo que presenta el dispositivo.

Conforme a los datos obtenidos se sabe que el flujo de cada LED SMD 5730 es de 35.2 lm, y con el arreglo anterior se esperaba obtener un flujo de 1936 lm ($35.2 \text{ lm} * 55$ LEDs). Sin embargo cierto flujo esperado sería el correcto si y solo si, las condiciones de alimentación fueran las mismas para todos los LEDs, además que la temperatura de operación fuera la adecuada, ya que el mayor número de diodos emisores de luz representa una mayor acumulación de temperatura.

Sin embargo al momento de caracterizar el arreglo de LEDs SMD 5730 se obtuvo un flujo luminoso de 1046.09 lm, lo que representa el 54% del flujo total esperado. Conforme a lo mencionado anteriormente sobre la eficiencia de un LED y una de una luminaria, se esperaba un menor flujo luminoso que el ideal, sin embargo se desconocía el porcentaje de la diferencia, esto también se debe a que dicho arreglo no cuenta con un driver para así controlar eficientemente los parámetros eléctricos de los LEDs.

Para el caso de los espectros de emisión, la intensidad del fósforo en el arreglo se ve disminuida, esto conforme a lo mostrado en la Figura 3.65, en donde se muestran ambos

espectros de emisión. Dicho cambio es atribuido a que, al tener un menor flujo del esperado indica que los LEDs no están alimentados adecuadamente, lo que hace bajar la eficiencia del chip y en consecuencia la del fósforo.

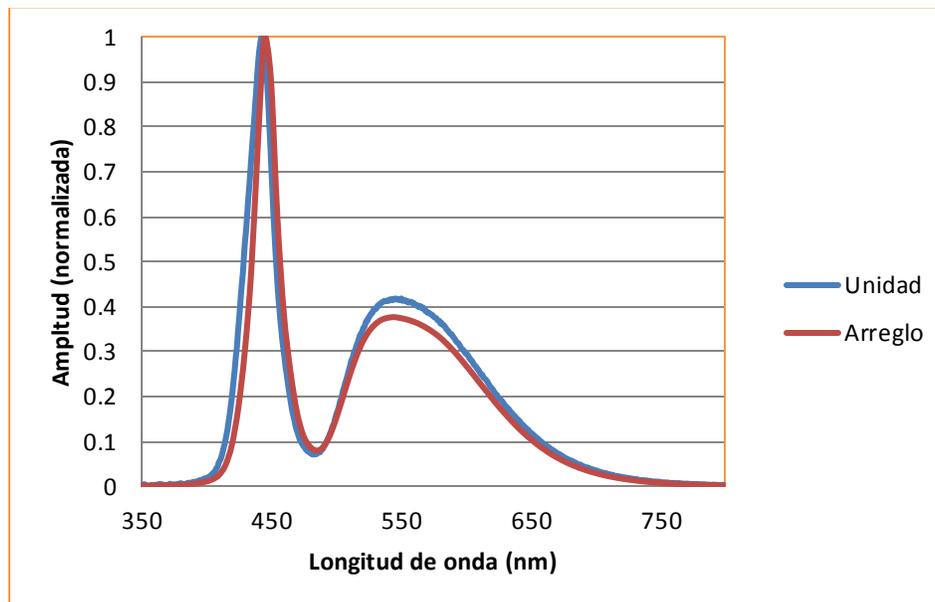


Figura 3.65. Espectros de emisión de LED SMD 5730 versus Arreglo de LEDs.

Las características de desempeño óptico y eléctrico del arreglo son mostradas en la Tabla 3.17, en donde se observa que efectivamente existe un cambio de la CCT y CRI, mientras que para el caso de la eficacia luminosa, ésta considera una disminución del 70%.

El flujo luminoso que presenta el arreglo, es equivalente al flujo que se obtiene de una lámpara incandescente de 75 W y una lámpara LED de 15 W [13], sin embargo la potencia que presenta este diseño es de 27.4 W, lo que indica que la diferencia de potencia comparada con una lámpara LED comercial de 15 W, se deba a la falta del correspondiente driver.

Tabla 3.17. Características de desempeño del arreglo de LEDs SMD 5730.

	CCT	CRI	Flujo (lm)	Eficacia luminosa (lm/w)
<i>Unidad</i>	7936	69.52	35.2	95.14
<i>Arreglo</i>	8606	72.48	1046.09	27.92

Conforme a los datos mostrados se demuestra una vez más, que el driver influye directamente en la eficacia luminosa de una lámpara LED, ya que la potencia de consumo del arreglo, presenta un desaprovechamiento de energía de más del 50 %. Esto conforme al factor de potencia que presento dicho arreglo, de alrededor del .45, presentándolo casi idéntico al factor de la lámpara de manufacturación china Foxanon, la cual contempla 48 LEDs de la misma especificación que los utilizados en dicho arreglo, sin embargo la lámpara Foxanon presenta una potencia de operación de alrededor de 3.4 W, indicando que el driver de dicha lámpara torna más eficiente su consumo, pero no el necesario como para elevar su FP.

La potencia de operación de arreglo anterior indica a su vez que necesitara de un disipador de calor eficiente, para así garantizar una temperatura de operación adecuada. Otro problema encontrado es el flujo luminoso de los de dos arreglos ya que uno presenta un flujo luminoso de alrededor de 187 lm, con un patrón de luminancia no uniforme, mientras que el segundo arreglo se tiene un patrón uniforme pero un flujo luminoso que puede ser excesivo para muchas aplicaciones, además de requerir de un disipador para desalojar el exceso de temperatura.

Conforme a lo mencionado, se planteó realizar otro dispositivo que combinará las características de los anteriores, esto se lograría utilizando los dos tipos de LEDs en el mismo arreglo, sin embargo para el caso del LED de 5mm aun existiría el problema del patrón de iluminación, por lo que se optó por cortar burdamente la óptica de los LEDs de 5mm.

Con dicho arreglo se espera tener un menor calentamiento, así como un menor flujo luminoso y un patrón de iluminación uniforme. En la Figura 3.66 a)-b) se muestra dicho dispositivo, mientras que en c) se observa el arreglo operación cubierto con el difusor óptico.

A pesar que el proceso de eliminar la óptica de los LEDs fue inadecuado, se obtuvieron cambios considerables, ya que se percibe un patrón de iluminación uniforme.

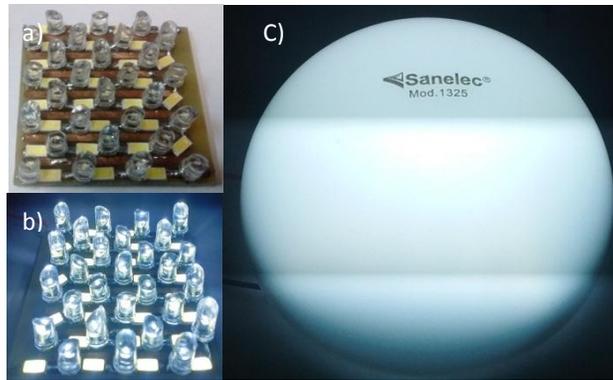


Figura 3.66. Arreglo de LEDs SMD 5730 con LEDs 5mm.

Los arreglos anteriores fueron realizados con el fin de conocer la necesidad de un driver en las fuentes de Iluminación de Estado Sólido, sin embargo para tener datos más precisos sobre las consecuencias sobre la relación de un driver con las características de desempeño, se partió a caracterizar dichos arreglos.

Para el caso del arreglo de 5 mm se obtuvieron las gráficas de la Figura 3.67, las cuales se basan en las variaciones de intensidad provenientes del parpadeo. Sin embargo también se observa cómo afecta el valor del capacitor de filtrado, primeramente se registraron los datos con el circuito sin capacitor, posteriormente con un capacitor de 10 uf y por último con uno de 22 uf.

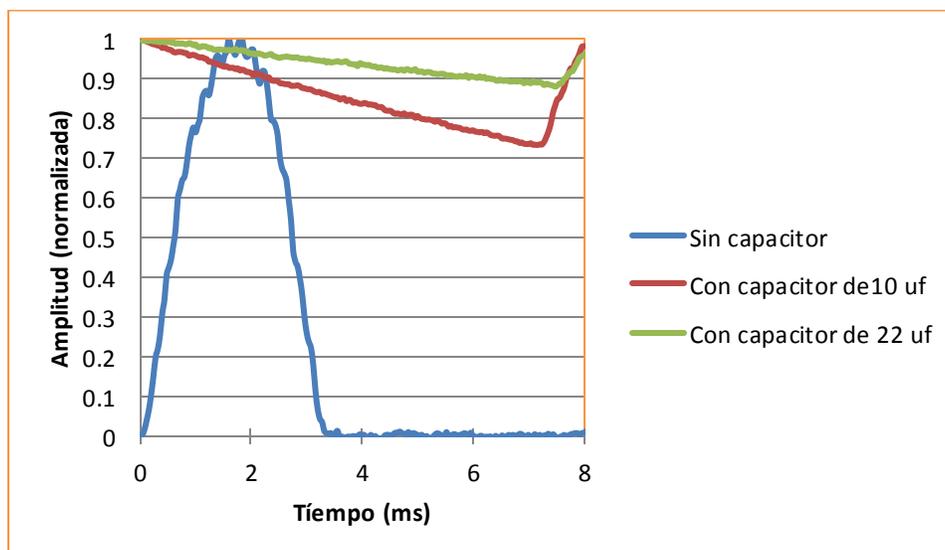


Figura 3.67. Parpadeo de Arreglo de LEDs (5mm) con variación de capacitancia.

EL ruido presente en las curvas anteriores, son debidas al propio ruido eléctrico del arreglo, así como también a que no se realizó ningún tipo de suavizado a la curva, ni un promedio de varias lecturas, ya que solo se tomó una.

En la Tabla 3.18 se muestran los datos registrados y calculados, referentes a la capacitancia en el circuito, en donde se observa la estrecha relación del capacitor con el parpadeo y el factor de potencia en las fuentes de Iluminación de Estado Sólido.

En dicha tabla se percibe que entre mayor sea el valor del capacitor, se tendrá un menor porcentaje de parpadeo, pero también el factor de potencia disminuye, indicando que existirá una mayor energía eléctrica desaprovechada.

Tabla 3.18. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED 5mm.

Capacitor	Factor de Potencia	Potencia eléctrica	% de Flicker
<i>S/C</i>	.78	1.6 W	100
<i>10 uf</i>	.41	4.2 W	15.39
<i>22 uf</i>	.38	4.4 W	6.36

Para el caso del arreglo LED SMD 5730, se realizó la misma comparación, sin embargo en las gráficas mostradas en la Figura 3.68, se observa que se requiere de un mayor valor de capacitancia para obtener los mismo resultados que los del arreglo anterior, debido a que este tipo de LED, consume casi siete veces más corriente, que la que consume el de 5mm.

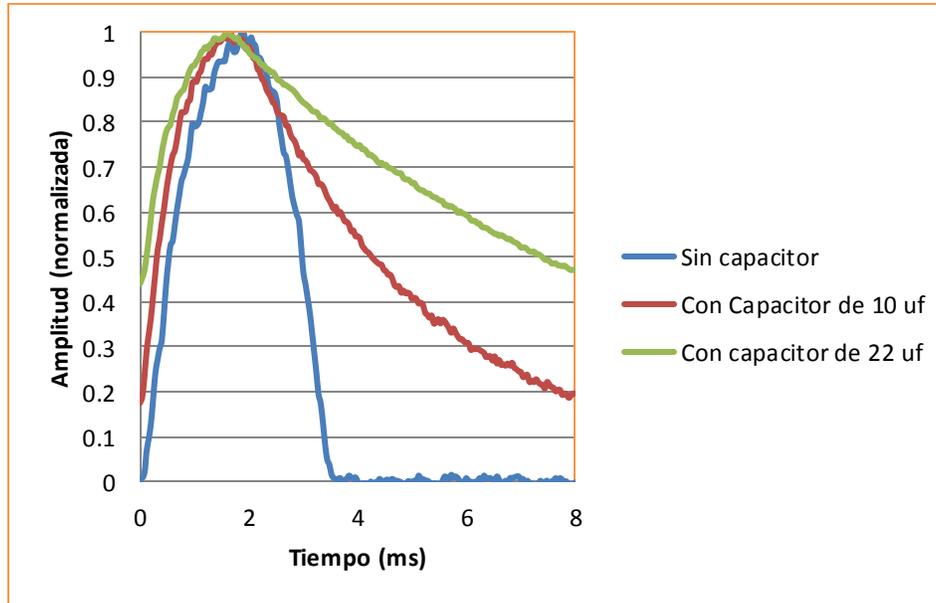


Figura 3.68. Parpadeo de arreglo de LEDs (SMD 5730) con variación de capacitancia.

De igual forma, en la Tabla 3.19 se muestran los datos obtenidos para el arreglo del LED SMD 5730, conforme a la variación de capacitancia. Los valores mostrados poseen el mismo comportamiento que los del arreglo de 5mm, sin embargo los valores se ven afectados por la corriente que demanda el arreglo SMD 5730, sin embargo al considerar esta única aclaración, se puede elegir cualquiera de los dos tipos de LEDs, ya que mantienen la misma relación de la capacitancia con el parpadeo y factor de potencia.

Tabla 3.19. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED SMD.

Capacitor	Factor de Potencia	Potencia eléctrica	% de Flicker
<i>S/C</i>	.76	7.5	100
<i>10 uf</i>	.57	12.2	70.18
<i>22 uf</i>	.53	19.5	38.86

Por último se analizó el arreglo que cuenta con los LEDs de 5mm y SMD 5730, en la Figura 3.69 se observan las gráficas de relación capacitancia y parpadeo, en donde se percibe que como era de esperarse, las curvas se encuentran entre los valores del arreglo de 5mm y las del arreglo SMD, esto debido a que sigue manteniéndose el mismo comportamiento.

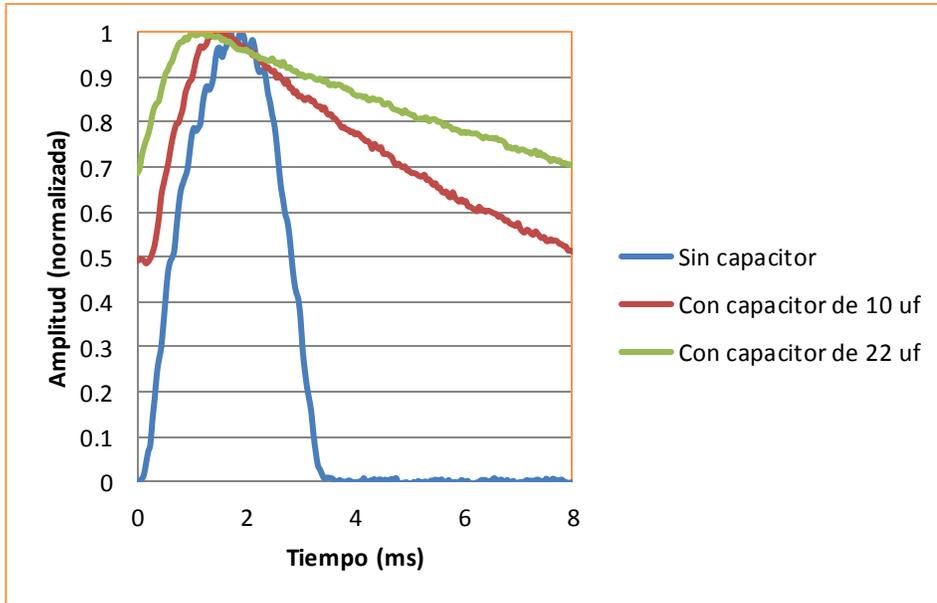


Figura 3.69. Parpadeo de arreglo de LEDs (5 mm - SMD 5730) con variación de capacitancia.

Los datos obtenidos por la variación del valor de capacitancia para este arreglo son mostrados en la Tabla 3.20, en donde se observa que efectivamente los valores se encuentran entre los valores de los arreglos anteriores, lo que indica que se pueden realizar diseños de arreglos con diferentes LEDs para poder manipular características de flujo luminoso, potencia consumida, disipación necesaria, etc.

Tabla 3.20. Parámetros relacionados con la capacitancia de circuito eléctrico LED 5mm - LED SMD.

Capacitor	Factor de Potencia	Potencia eléctrica	% de Flicker
<i>S/C</i>	.76	2.3	100
<i>10 uf</i>	.45	6.9	34.62
<i>22 uf</i>	.45	9.4	18.58

Conforme a los datos obtenidos de las diferentes lámparas, como de los propios arreglos, se sabe que existe una relación directa del driver con el parpadeo y el factor de potencia, sin embargo estos dos últimos no se encuentran relacionados entre sí.

Esto se demostró al caracterizar la lámpara Foxanon con el fin de conocer el parpadeo que presenta, ya que anteriormente se había caracterizado pero solo su f.p encontrándose alrededor del 0.5, sin embargo esta lámpara no presenta variaciones de intensidad a frecuencias alrededor de 120 Hz.

Las pequeñas variaciones presentadas en la gráfica, indican que es posible que se encuentren mínimas variaciones en frecuencias superiores 3 K Hz, sin embargo al ser inapreciable la variación y encontrándose a frecuencias altas, no se considera que exista riesgo alguno por la exposición a la luz proveniente de esta lámpara, esto conforme a la Figura 3.7, en donde se grafica la intensidad luminosa versus tiempo.

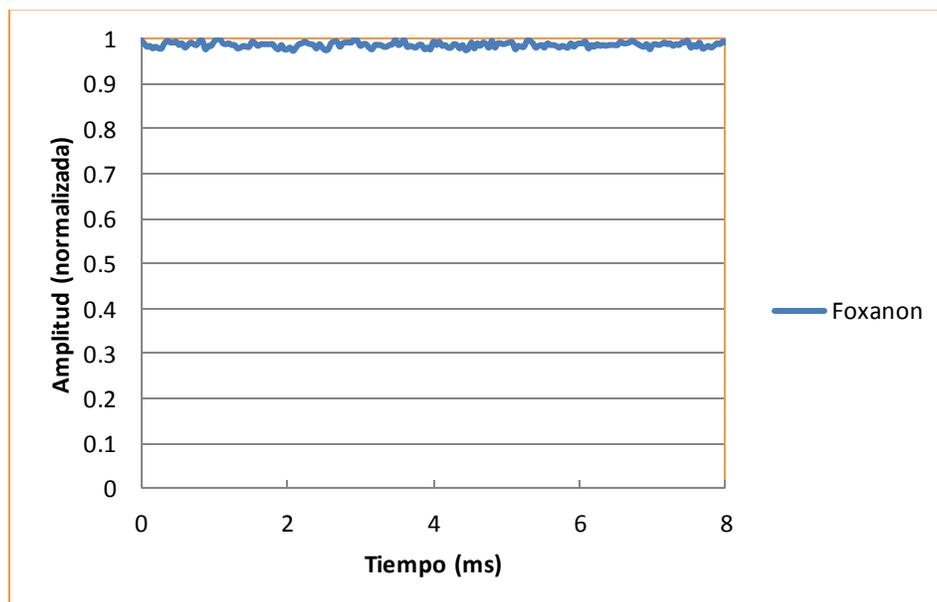


Figura 3.70. Parpadeo lámpara Foxanon con .5 de F.p.

Posteriormente conforme a los datos obtenidos por los arreglos se realizó una tabla comparativa (ver Tabla 3.21), en donde se muestran los costos tanto de diseño y/o compra, como de operación. En donde se observa que el costo por cada diseño para obtener cierto flujo, es más económico que las lámparas comerciales, sin embargo el costo de consumo de energía eléctrica modifican su valor de conveniencia, ya que a largo plazo saldría más costoso iluminar con diseños que contemplen factores de potencia bajos.

Dichos datos son reflejados conforme a la tarifa 01 de consumo intermedio (2), establecida por la Comisión Federal de Electricidad, con un uso de tres horas diarias, los costos son registrados en moneda nacional (MXN).

Es importante mencionar que los costos considerados para los arreglos son por componentes que se pueden adquirir por unidad, ya que cuando se realizan compras a escala, el costo tiende a disminuir.

Tabla 3.21. Costos de arreglos.

Tipo de lámpara	Flujo luminoso (aprox.)	Costo	Potencia eléctrica	F.P	Costo Año
<i>5mm</i>	107	24.6	4.4	.38	4.6
<i>SMD 5730</i>	1104	44.2	19.5	.53	20.41
<i>5mm-SMD</i>	605	34.4	9.4	.45	9.84

Es importante mencionar que el dispositivo realizado con diferentes tipos de LEDs, se efectuó sólo con la intención de comprobar la relación que existe entre el driver de un dispositivo de iluminación y el factor de potencia, ya que no se consideraron parámetros de desempeño ópticos, esto debido a que los LEDs utilizados no poseen las mismas características tanto ópticas como eléctricas, por lo que una mala mezcla de “luz” puede atraer características indeseadas, como un patrón de CCT y CRI no uniforme, así como un mayor o menor consumo de corriente del necesario, entre otras muchas características que se deben analizar.

Los arreglos anteriores requirieron de un menor número de componentes eléctricos/electrónicos, lo que hace que este tipo de lámpara contemplen menores costos de compra, sin embargo a su vez la falta de un driver de alto rendimiento conlleva a que este tipo de fuentes de iluminación consuman una mayor energía eléctrica incrementando el costo de mantenimiento, así también presentan fluctuaciones de intensidad, lo que puede llegar a provocar daños a la salud, conforme a lo anteriormente mencionado.

Además el tipo de lámparas bajo este diseño, muestran factores de potencia bajos (>.9), lo que puede atraer problemas no solo en la instalación y costo, ya que también existen regulaciones para mitigar productos con bajos factores de potencia, algunas regulaciones y/o recomendaciones son citadas en el apartado siguiente.

Conforme a lo encontrado se deduce que la electrónica encontrada en lámparas LEDs (Driver), tienen la función de hacer más eficientes las fuentes de iluminación, tanto en el aspecto eléctrico como en el óptico, principalmente los drivers encontrados son para tener un rendimiento eléctrico adecuado, esto se da al mejorar el factor de potencia.

Algunas de las razones por las que se da preferencia el tener un factor de potencia adecuado y no niveles de parpadeo recomendados, es principalmente para cumplir con las normas para cada federación en donde se crea y/o en donde se utiliza la lámpara.

Para obtener valores adecuados de Factor de Potencia se requieren de drivers complejos, sin embargo para mitigar las fluctuaciones de intensidad no se necesita de un gran número de componentes electrónicos, esto conforme a lo demostrado por la lámpara Foxanon, sin embargo el reto se da al requerir controladores que mantengan el factor de potencia por arriba del .9, al mismo tiempo que contemplen porcentajes de fluctuación por debajo de los recomendados por el IEEE.

Por lo que para lograrlo se requieren de drivers y componentes electrónicos “inteligentes”, con esto se podrían disminuir los posibles efectos que causa el parpadeo al usuario, al mismo tiempo que se obtendrían fuentes de Iluminación de Estado Sólido (LEDs) eficientes.

Referencias

- [1] “Manual de Luminotecnia para interiores”, via @laszlo, http://www.laszlo.com.ar/Items/ManLumi/issue/Manual_de_Luminotecnia.PDF1, Accesado 10-06-2016.
- [2] Multicomp “1W High Power LED”, RoHS Compliant, July 2012.
- [3] Xu L “SMD LED”, Datasheet LED SMD, Tbelux, 8p.
- [4] Alfonso Méndez “Disipadores térmicos para dispositivos electrónicos”, UPC Universidad Politécnica de Catalunya, Enero 2016.
- [5] Facoel “Como elegir una luminaria de LEDs”, Sistema de iluminación con Tecnología a LEDs, Facoel Argentina S.R.I, ABB CREE.
- [6] Li-Yin Chen, Wei-Chih Cheng “High-performance glass Phosphor for White-light-emitting diodes via reduction of Si-Ce³⁺:YAG inter-diffusion”, Optical Materials Express, Vol 4, January 2014.
- [7] “YAG:Ce” via @crytur, <https://www.crytur.cz/materials/yagce/>, Accesado 23-10-2016.
- [8] “La importancia de la disipación de calor de una lámpara LED”, via @lediagroup, <https://lediagroup.com/tecnologia-led/la-importancia-de-la-disipacion-del-calor-en-una-lampara-led/>, Accesado 5-11-2016.
- [9] “Proceso de anodizado” via @sapagroup, <http://www.sapagroup.com/es/extrusions-argentina/sobre-nosotros/nuestra-oferta/tratamientos-superficiales/proceso-de-anodizado/>, Accesado 10-12-2016.
- [10] “Fuentes de alimentación”, via @sase, http://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011-Fuentes_de_alimentacion.pdf, Accesado 3-12-2106

[11] Jonathan McHugh, PE, McHugh Energy & Mike McGaraghan “Quantifying Flicker: Fourier Filtering of Light”, IES Conference, 2016.

[12] John Bird “Engineering Mathematics”, Fifth Edition, Ed. Newnes Elseiver, USA 2007.

[13] “LED-Light GMH New Technology Germany” via @nt-ligth, <http://www.nt-light.com/led/es/content/12-informacion-producto>, Accesado 20-01-2017.

CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Conforme al estudio realizado, se encontraron diferentes puntos de partida para analizar.

Primeramente es de suma importancia plantear las consecuencias que puede acarrear la luz artificial a los seres vivos, además de que la longitud de onda más perjudicial al ser humano son las longitudes cercanas al azul, esto conforme a varios documentos existentes sobre estudios relacionados con este tipo de afecciones. Por lo que es importante darle la correcta prioridad a fuentes de iluminación, sobre si se requieren fuentes de iluminación que sean cada vez energéticamente más eficientes, o fuentes con menores índices de afección ocasionadas por la exposición de las mismas.

Un tipo de afección por la exposición a las fuentes de iluminación, es la proveniente del parpadeo, ya que puede llegar a generar un riesgo a la salud, sin embargo no es fácil eliminar esta condición que principalmente presentan las fuentes de iluminación basadas en tecnología LED, a pesar de esto es una condición que casi no se toma en cuenta al momento de elegir una fuente de iluminación, por lo que es importante difundir dicha información y concientizar las consecuencias que puede llegar a generar una incorrecta decisión al momento de diseñar, adquirir y utilizar fuentes de iluminación con cierta condición.

Otro punto importante que se debe aclarar aunque no se habló detalladamente de esto, es tener una adecuada iluminación del entorno, y esto dependerá tanto del usuario como de la tarea a desarrollar considerando el espacio y el tipo de material que rodea cierto espacio, ya que existen materiales de construcción con mayor reflectividad unos de otros, por lo que sería conveniente que los fabricantes indicaran en su producto no solo el flujo luminoso, sino que también proporcionarían una tabla del producto que describa el espacio y tarea donde se tendría un óptimo desempeño y los luxes que se obtendrían dependiendo de la ubicación del dispositivo. Todo esto indica que debe existir un estudio

previo para conocer cuál tipo de fuente de iluminación es la más adecuada para cada entorno y así puede conllevar a un ahorro energético.

Para los casos anteriores es de suma importancia que se planteen normalizaciones por el gobierno federal Mexicano, ya que al carecer de regulaciones en materia de iluminación, se pueden encontrar sistemas de iluminación LED con mayores índices de daño a la salud y con menor eficiencia energética, ya que este tipo de iluminación se presenta principalmente en el mercado como una alternativa de fuentes de iluminación económicas.

La baja eficiencia de las fuentes de iluminación, puede ser una consecuencia de un mal diseño en el arreglo de LEDs, como en el driver y hasta en el diseño o capacidad del disipador, ya que todos estos puntos influyen desde la estabilidad lumínica como en la eficiencia del dispositivo.

Además también se concluye que la correcta elección del disipador, influye directamente la eficiencia energética, así como en la estabilidad lumínica y durabilidad del dispositivo, esto debido a que el incremento de temperatura propicia a su vez un incremento en el consumo energético y una disminución del flujo luminoso, que por ende ocasiona una disminución de la eficacia luminosa. Sin embargo sería adecuado realizar el análisis de afecciones por temperatura a niveles atómicos, para conocer ciertamente la consecuencia del incremento de temperatura en el chip y fósforo.

Otro punto importante y que comúnmente es un dato incorrecto, es el relacionar directamente los parámetros de CCT y de CRI, ya que conforme a lo demostrado ninguno depende directamente del otro, son valores independientes. Sin embargo las fuentes de iluminación que contemplan CCT cálidas y con CRI alto representan a su vez las fuentes menos eficientes, energéticamente hablando.

Conforme los prototipos realizados se demostró que el driver es el indicador de la obtención de factores de potencia adecuados (>0.9), además que las fuentes de iluminación LED puedan contar con porcentajes de parpadeo adecuados, esto según la

norma propuesta por la IEEE, sin embargo no es nada fácil la obtención de ambos parámetros en conjunto, ya que también el f.p. y el flicker son parámetros independientes uno del otro, pero si dependientes del controlador del LED.

Para el caso de parámetros ópticos como CCT y CRI, el diseño de una fuente de iluminación dependerá del requerimiento del usuario, ya que las fuentes de Iluminación de Estado Sólido con CCT cálida y con CRI alto (>90) conlleva a un mayor costo y una menor eficacia luminosa, sin embargo si sólo uno de los parámetros anteriores es relevante, se puede tener fuentes de Iluminación cálidas pero con bajo CRI, o fuentes con un CRI alto y con CCT frío, o inclusive se pueden tener fuentes con CRI intermedio alrededor de 70 y con temperaturas mayores a 5000, siendo el rango donde se encuentran los LEDs con mayores eficacias luminosas.

Un caso crítico es el controlar los parámetros de parpadeo y de f.p, por lo que se plantean drivers inteligentes que contemplen retroalimentación de las características electro-ópticas, sin embargo la incorporación de mayor número de componentes electrónicos o una electrónica compleja, conllevará al incremento de costos por dichas fuentes, pero así también conforme a lo demostrado, esto puede ser retribuido tanto en la factura de energía eléctrica como en la disminución de repercusiones en el individuo

ANEXOS

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 239.8 lm (LED 2 “10W1”)

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
2	10W1	239.8	1	1	239.8	49	49	2.602230483	6.79	6.79	35.31664212	13.57168104
3	10W2	217.1	1.104560111	1	217.1	8	8	0.424853956	6.18	6.18	35.12944984	82.68594256
4	10W3	209.5	1.144630072	1	209.5	11	11	0.58417419	5.19	5.19	40.36608863	69.09940445
5	5W	191.6	1.251565762	1	191.6	15	15	0.796601168	2.35	2.35	81.53191489	102.3497305
6	3W	26.1	9.187739464	9	234.9	10	90	4.77960701	0.67	6.03	38.95522388	8.150298507
7	3W1	40.8	5.87745098	6	244.8	10	60	3.186404673	0.71	4.26	57.46478873	18.0343662
8	3W2	43.9	5.462414579	5	219.5	7.3	36.5	1.938396176	0.61	3.05	71.96721311	37.12719515
9	1W	43.9	5.462414579	5	219.5	8	40	2.124269782	0.61	3.05	71.96721311	33.87856557
10	1W1	15.7	15.27388535	15	235.5	5.5	82.5	4.381306426	0.46	6.9	34.13043478	7.790013175
11	MB	23.3	10.29184549	10	233	6	60	3.186404673	0.23	2.3	101.3043478	31.79268116
12	5mm	3.4	70.52941176	71	241.4	0.35	24.85	1.319702602	0.04	2.84	85	64.4084507
13	smd 5730	35.2	6.8125	7	246.4	0.7	4.9	0.260223048	0.37	2.59	95.13513514	365.5907336
14	lg7030	56.1	4.274509804	4	224.4	5	20	1.062134891	0.46	1.84	121.9565217	114.8220652
15	lg2835	34.7	6.910662824	7	242.9	5	35	1.858736059	0.41	2.87	84.63414634	45.53317073
16	sharp	16.1	14.89440994	15	241.5	5	75	3.983005842	0.18	2.7	89.44444444	22.45651852
17	Samsung	36	6.661111111	7	252	5	35	1.858736059	0.38	2.66	94.73684211	50.96842105

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 217.1 lm (LED 3 “10W2”)

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
3	10W2	217.1	1	1	217.1	8	8	0.424853956	6.18	6.18	35.12944984	82.68594256
4	10W3	209.5	1.03627685	1	209.5	11	11	0.58417419	5.19	5.19	40.36608863	69.09940445
5	5W	191.6	1.13308977	1	191.6	15	15	0.796601168	2.35	2.35	81.53191489	102.3497305
6	3W	26.1	8.318007663	8	208.8	10	80	4.248539565	0.67	5.36	38.95522388	9.169085821
7	3W1	40.8	5.321078431	5	204	10	50	2.655337228	0.71	3.55	57.46478873	21.64123944
8	3W2	43.9	4.945330296	5	219.5	7.3	36.5	1.938396176	0.61	3.05	71.96721311	37.12719515
9	1W	43.9	4.945330296	5	219.5	8	40	2.124269782	0.61	3.05	71.96721311	33.87856557
10	1W1	15.7	13.82802548	14	219.8	5.5	77	4.089219331	0.46	6.44	34.13043478	8.346442688
11	MB	23.3	9.317596567	9	209.7	6	54	2.867764206	0.23	2.07	101.3043478	35.32520129
12	5mm	3.4	63.85294118	64	217.6	0.35	22.4	1.189591078	0.04	2.56	85	71.453125
13	smd 5730	35.2	6.167613636	6	211.2	0.7	4.2	0.223048327	0.37	2.22	95.13513514	426.5225225
14	Ig7030	56.1	3.869875223	4	224.4	5	20	1.062134891	0.46	1.84	121.9565217	114.8220652
15	Ig2835	34.7	6.25648415	6	208.2	5	30	1.593202337	0.41	2.46	84.63414634	53.12203252
16	sharp	16.1	13.48447205	13	209.3	5	65	3.451938396	0.18	2.34	89.44444444	25.91136752
17	Samsung	36	6.030555556	6	216	5	30	1.593202337	0.38	2.28	94.73684211	59.46315789

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 209.5 lm (LED 4 "10W3")

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
4	10W3	209.5	1	1	209.5	11	11	0.58417419	5.19	5.19	40.36608863	69.09940445
5	5W	191.6	1.0934238	1	191.6	15	15	0.796601168	2.35	2.35	81.53191489	102.3497305
6	3W	26.1	8.026819923	8	208.8	10	80	4.248539565	0.67	5.36	38.95522388	9.169085821
7	3W1	40.8	5.134803922	5	204	10	50	2.655337228	0.71	3.55	57.46478873	21.64123944
8	3W2	43.9	4.772209567	5	219.5	7.3	36.5	1.938396176	0.61	3.05	71.96721311	37.12719515
9	1W	43.9	4.772209567	5	219.5	8	40	2.124269782	0.61	3.05	71.96721311	33.87856557
10	1W1	15.7	13.34394904	13	204.1	5.5	71.5	3.797132236	0.46	5.98	34.13043478	8.988476741
11	MB	23.3	8.991416309	9	209.7	6	54	2.867764206	0.23	2.07	101.3043478	35.32520129
12	5mm	3.4	61.61764706	62	210.8	0.35	21.7	1.152416357	0.04	2.48	85	73.75806452
13	smd 5730	35.2	5.951704545	6	211.2	0.7	4.2	0.223048327	0.37	2.22	95.13513514	426.5225225
14	lg7030	56.1	3.734402852	4	224.4	5	20	1.062134891	0.46	1.84	121.9565217	114.8220652
15	lg2835	34.7	6.037463977	6	208.2	5	30	1.593202337	0.41	2.46	84.63414634	53.12203252
16	sharp	16.1	13.01242236	13	209.3	5	65	3.451938396	0.18	2.34	89.44444444	25.91136752
17	Samsung	36	5.819444444	6	216	5	30	1.593202337	0.38	2.28	94.73684211	59.46315789

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 191.6 lm (LED 5 "5W")

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
5	5W	191.6	1	1	191.6	15	15	0.796601168	2.35	2.35	81.53191489	102.3497305
6	3W	26.1	7.340996169	7	182.7	10	70	3.717472119	0.67	4.69	38.95522388	10.47895522
7	3W1	40.8	4.696078431	5	204	10	50	2.655337228	0.71	3.55	57.46478873	21.64123944
8	3W2	43.9	4.364464692	4	175.6	7.3	29.2	1.550716941	0.61	2.44	71.96721311	46.40899394
9	1W	43.9	4.364464692	4	175.6	8	32	1.699415826	0.61	2.44	71.96721311	42.34820697
10	1W1	15.7	12.20382166	12	188.4	5.5	66	3.505045141	0.46	5.52	34.13043478	9.737516469
11	MB	23.3	8.223175966	8	186.4	6	48	2.549123739	0.23	1.84	101.3043478	39.74085145
12	5mm	3.4	56.35294118	56	190.4	0.35	19.6	1.040892193	0.04	2.24	85	81.66071429
13	smd 5730	35.2	5.443181818	5	176	0.7	3.5	0.185873606	0.37	1.85	95.13513514	511.827027
14	lg7030	56.1	3.415329768	3	168.3	5	15	0.796601168	0.46	1.38	121.9565217	153.096087
15	lg2835	34.7	5.521613833	6	208.2	5	30	1.593202337	0.41	2.46	84.63414634	53.12203252
16	sharp	16.1	11.90062112	12	193.2	5	60	3.186404673	0.18	2.16	89.44444444	28.07064815
17	Samsung	36	5.322222222	5	180	5	25	1.327668614	0.38	1.9	94.73684211	71.35578947

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 56.1 lm (LED 14 "lg7030")

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
6	3W	26.1	2.149425287	2	52.2	10	20	1.062134891	0.67	1.34	38.95522388	36.67634328
7	3W1	40.8	1.375	1	40.8	10	10	0.531067446	0.71	0.71	57.46478873	108.2061972
8	3W2	43.9	1.277904328	1	43.9	7.3	7.3	0.387679235	0.61	0.61	71.96721311	185.6359757
9	1W	43.9	1.277904328	1	43.9	8	8	0.424853956	0.61	0.61	71.96721311	169.3928279
10	1W1	15.7	3.573248408	4	62.8	5.5	22	1.16834838	0.46	1.84	34.13043478	29.21254941
11	MB	23.3	2.407725322	2	46.6	6	12	0.637280935	0.23	0.46	101.3043478	158.9634058
12	5mm	3.4	16.5	17	57.8	0.35	5.95	0.31598513	0.04	0.68	85	269
13	smd 5730	35.2	1.59375	2	70.4	0.7	1.4	0.074349442	0.37	0.74	95.13513514	1279.567568
14	lg7030	56.1	1	1	56.1	5	5	0.265533723	0.46	0.46	121.9565217	459.2882609
15	lg2835	34.7	1.616714697	2	69.4	5	10	0.531067446	0.41	0.82	84.63414634	159.3660976
16	sharp	16.1	3.48447205	3	48.3	5	15	0.796601168	0.18	0.54	89.44444444	112.2825926
17	Samsung	36	1.558333333	2	72	5	10	0.531067446	0.38	0.76	94.73684211	178.3894737

Cálculos para obtención de un flujo luminoso de 43.9lm (LED 8 “3W2”)

LED	Potencia F	Flujo luminoso	Cantidad ideal	Cantidad real	Flujo total esperado	Costo unidad	Costo total	Costo total usd	Potencia de prueba U	Potencia de prueba F	Eficacia lm/w	eficacia lm/w \$
6	3W	26.1	1.681992337	2	52.2	10	20	1.062134891	0.67	1.34	38.95522388	36.67634328
7	3W1	40.8	1.075980392	1	40.8	10	10	0.531067446	0.71	0.71	57.46478873	108.2061972
8	3W2	43.9	1	1	43.9	7.3	7.3	0.387679235	0.61	0.61	71.96721311	185.6359757
9	1W	43.9	1	1	43.9	8	8	0.424853956	0.61	0.61	71.96721311	169.3928279
10	1W1	15.7	2.796178344	3	47.1	5.5	16.5	0.876261285	0.46	1.38	34.13043478	38.95006588
11	MB	23.3	1.884120172	2	46.6	6	12	0.637280935	0.23	0.46	101.3043478	158.9634058
12	5mm	3.4	12.91176471	13	44.2	0.35	4.55	0.241635688	0.04	0.52	85	351.7692308
13	smd 5730	35.2	1.247159091	1	35.2	0.7	0.7	0.037174721	0.37	0.37	95.13513514	2559.135135
15	lg2835	34.7	1.265129683	1	34.7	5	5	0.265533723	0.41	0.41	84.63414634	318.7321951
16	sharp	16.1	2.726708075	3	48.3	5	15	0.796601168	0.18	0.54	89.44444444	112.2825926
17	Samsung	36	1.219444444	1	36	5	5	0.265533723	0.38	0.38	94.73684211	356.7789474