

Proceso de diseño de sistemas de iluminación LED energéticamente autónomos

Design process of LED lighting systems energetically autonomous

Rodolfo Chacón-Avilés¹, Carlos Meza-Benavides²,
Henrique A.C-Braga³, Pedro S.-Almeida⁴, Cristiano G.-Casagrande⁵

Fecha de recepción: 6 de enero de 2017

Fecha de aprobación: 29 de marzo de 2017

Chácon-Avilés, R; Meza-Benavides, C; Braga, H; Almeida, P; Casagrande, C. Proceso de diseño de sistemas de iluminación LED energéticamente autónomos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 30-4. Octubre-Diciembre 2017. Pág 52-65.

DOI: 10.18845/tm.v30i4.3411

- 1 Estudiante. Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rocha182@gmail.com.
- 2 Profesor Adjunto. Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: cmeza@itcr.ac.cr
- 3 Profesor/investigador. Núcleo de Iluminación Moderna NIMO. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais. Brasil. Correo electrónico: henrique.braga@ufjf.edu.br
- 4 Profesor/investigador. Núcleo de Iluminación Moderna NIMO. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais. Brasil. Correo electrónico: pedro.almeida@engenharia.ufjf.br
- 5 Profesor/Investigador. Laboratorio de Eficiencia Energética LEENER. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais. Brasil. Correo electrónico: casagrandejf@yahoo.com.br



Palabras clave

LED; batería de ión-litio, control corriente y tensión; procesamiento de potencia.

Resumen

El reciente desarrollo en tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica e iluminación de eficiencia energética hace viable, tanto desde el punto de vista técnico como económico, la utilización de dispositivos de iluminación energéticamente autónomos. Este tipo de dispositivos no sólo son de gran utilidad en aquellas regiones en donde no existe la red eléctrica sino también en aquellos espacios en donde se desea evitar construir instalaciones eléctricas por razones estéticas, ambientales o económicas.

Si bien es cierto existen dispositivos comerciales de iluminación energéticamente autónomos, su costo, vida útil y desempeño no los hacen atractivos o competitivos con respecto a los sistemas de iluminación convencionales. Análisis basados en ingeniería inversa realizados por el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab), de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del Tecnológico de Costa Rica, se ha encontrado que el subsistema electrónico de muchas luminarias comerciales se puede modificar para ampliar significativamente su desempeño y vida útil.

En este artículo se presenta el proceso de diseño de un dispositivo de iluminación LED energéticamente autónomo, en el cual se toman en cuenta las características eléctricas del sistema de iluminación, el sistema de almacenamiento y las características ópticas de la luminaria. De esta forma, se logra identificar formas en las cuales se puede extender la vida útil del sistema y mejorar su desempeño.

Keywords

LED; Li-On Battery; current/voltage control; power processing.

Abstract

The recent development in technologies of storage of electric power and lighting of energetic efficiency makes viable, from the technical and economic point of view, the utilization of off-grid electrical devices for lighting. This type of devices is not only of great usefulness in those regions where the electrical network does not exist, but also in those spaces where it is not desirable to install electrical wiring for esthetic, environmental or economic reasons.

Even though there are in the market off-grid lighting devices, their cost, life span and performance do not make them attractive or competitive with respect to conventional lighting systems. Reverse engineering analysis done at the Laboratory of Electronic Systems for Sustainability (SESLab), of the Electronic Engineering School of the Costa Rica's Institute of Technology, have proved that the electronic subsystem of many commercial lighting devices can be modified in order to extend significantly its performance and durability.

This paper contents a design process for off-grid electrical lighting systems. The process takes into account the electrical characteristics of the lighting system, storage technology and the optical characteristics of the luminaire. In this way, the design allows to improve performance and durability of the lighting system.

Introducción

Desde su invención la iluminación artificial ha sido una de las principales formas de consumo de energía eléctrica. La iluminación pública puede representar el 50% de consumo eléctrico en ciudades de Europa [8], el 17 % del total de la iluminación en Estados Unidos y el 3% del consumo total eléctrico de Brasil [9].

Para la reducción de la huella de carbono y el costo en iluminación se han comenzado a desarrollar opciones mediante unidades inteligentes de control de iluminación de LED, como en el tráfico vehicular ajustando la intensidad de la iluminación de acuerdo el volumen vehicular [8]. La alta eficiencia luminosa, el alto índice de reproducción cromática o *CRI* por sus siglas en inglés, su larga vida útil y emisión de luz blanca, la hacen una buena candidata para aplicaciones de iluminación en interiores y muy adecuada para la iluminación pública [5]. La iluminación en exteriores juega un papel importante para el funcionamiento y seguridad en los centros urbanos. Estas situaciones no han pasado desapercibidas por distintas empresas que han empezado a desarrollar productos de iluminación basados en LED y en algunos casos con autonomía energética. Estos desarrollos están haciendo posible considerar el uso de dispositivos de iluminación energéticamente autónomos, teniendo asociados sistemas de almacenamiento de energía eléctrica recargable que evitaría el uso de cableado.

En este artículo se presenta el proceso de diseño de un dispositivo de iluminación energéticamente autónomo, tomando en cuenta las características eléctricas y fotométricas del sistema de iluminación y del sistema de almacenamiento. Logrando identificar formas en las cuales se puede extender la vida útil del sistema y mejorar su desempeño.

Sistema de iluminación LED

Un sistema LED requiere de un análisis más detallado, ya que la temperatura en el dispositivo emisor de luz afecta su rendimiento luminoso [2], por lo que el control que le suministre potencia eléctrica debe evitar sobrecargas de corriente al LED. El acondicionador de potencia, mostrado en la figura 1 es un circuito electrónico necesario para regular la corriente que excita la emisión de luz del LED. Como fuente de energía del sistema de la luminaria LED se puede tener la red eléctrica o un dispositivo de almacenamiento de energía.

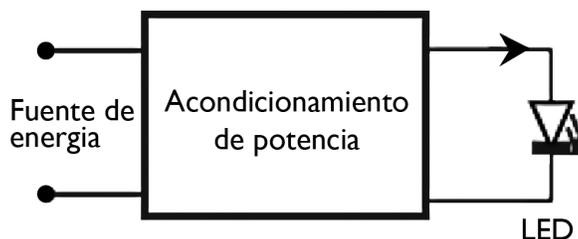


Figura 1. Sistema de iluminación LED.

Para este caso existirán dos unidades de acondicionamiento de potencia, tal y como se observa en la figura 2: una unidad de acondicionamiento de potencia etiquetada P1, que es la responsable de cargar el sistema de almacenamiento permitiendo extender su vida útil, y la unidad de acondicionamiento de potencia P2, que es encargada de regular la corriente entregada al LED con el objetivo de obtener una cantidad de iluminación deseada.

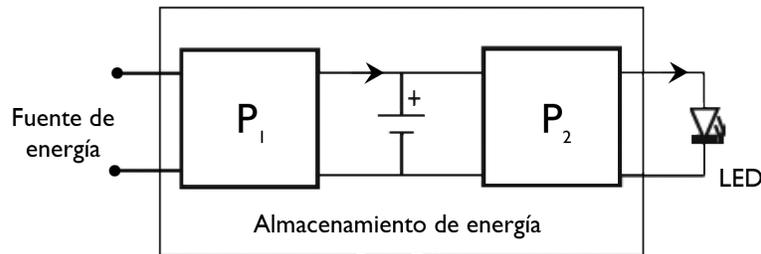


Figura 2. Sistema de iluminación LED con dispositivo de almacenamiento de energía.

Propuesta y proceso de diseño

En esta sección se describirá el proceso de diseño de un sistema de iluminación energéticamente autónomo. El proceso de diseño presentado tiene como objetivo definir los criterios técnicos para la selección del LED y del sistema de almacenamiento de energía además de definir los criterios necesarios para los circuitos electrónicos de las unidades de procesamiento de potencia del sistema de iluminación.

La figura 3 muestra el diagrama de bloques del diseño propuesto. Se supone que existe una fuente externa de energía (V_{in}) que provee una tensión de 12 V en corriente directa utilizada para cargar una batería con una tensión V_b por medio de una unidad de procesamiento de potencia P_1 , la cual provee la corriente i_b para cargar la batería. Otra unidad P_2 se encargará de entregar la corriente, i_L , necesaria para que el LED emita luz a una intensidad deseada. Dos controladores C_1 y C_2 , se encargarán de generar las señales de gestión a P_1 y P_2 para que entreguen las corrientes y tensiones requeridas a la batería y al LED. El controlador C_2 recibe señales de los sensores S_1 y S_2 que permiten optimizar el funcionamiento de la luminaria LED. El sensor S_1 es un sensor de iluminación cuya lectura permite que el controlador C_2 ajuste la intensidad del LED a la iluminación ambiental. El sensor S_2 detecta si en el rango en el cual se necesita iluminación circula alguna persona.

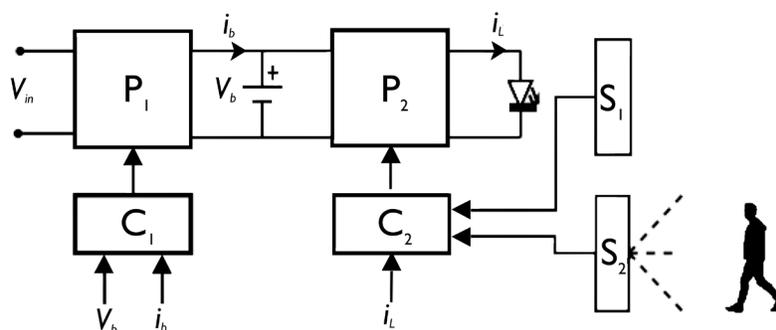


Figura 3. Diagrama de bloques del diseño propuesto.

A. Tecnología de almacenamiento de energía eléctrica

Existen diferentes tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, entre ellas las tecnologías de baterías electroquímicas. Las principales características de estas baterías [7], se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Aplicaciones de Baterías Portátiles.

Tipo	Características	Aplicaciones
SLA	Libre de mantenimiento, bajo costo, ciclo de vida moderado	TV, equipos electrónicos portables, herramientas portátiles
Ni-Cd	Libre de mantenimiento, excelente ciclo de vida, baja temperatura	Consumo electrónico, respaldo de memorias, respaldo de energía
Ni-MH	Libre de mantenimiento, con más capacidad que la Ni-Cd	Consumo electrónico, vehículos eléctricos
Li-Ion	Alta densidad de energía, largo ciclo de vida	Consumo eléctrico y portátil, vehículos eléctricos y aplicaciones espaciales

Las baterías de iones de litio presentan mayor densidad de carga y un mayor ciclo de vida que el resto de las tecnologías. Es por ello que se utilizará esta tecnología como elemento de almacenamiento de energía para el sistema de iluminación.

B. Fuente de iluminación

Para la luminaria LED se analizaron tres dispositivos comerciales cuyas características técnicas reportadas en sus hojas de datos se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características de las opciones LED según las hojas de datos.

	LED 1	LED 2	LED 3
Color de luz	Blanco	Blanco	Amarillo
Corriente (A)	0.350	1	0.350
Tensión (V)	27	10	2.95
Consumo (W)	10	10	1
Flujo luminoso(Lm)	900	900	37
Utilización	Luminaria tipo Reflector.	Luminaria tipo Reflector	Señalización/Iluminación Inter.

Fue necesario validar estos datos experimentalmente para comprobar la eficiencia eléctrica y lumínica de los LEDs. Utilizando instrumentos para mediciones fotométricas de la Universidad Federal de Juiz de Fora en Brasil como la esfera integradora mostrada en la figura 4, se validan las características fotométricas de los LEDs. La figura 5 muestra el espectro de emisión y el índice cromático del dispositivo comercial LED 1.

La medición fotométrica permite identificar características importantes de la fuente de luz, siendo las más relevantes: el IRC, el cual es la capacidad de una fuente de luz de reproducir los colores de manera fiel en comparación con aquellos percibidos en la luz solar determinándose en valores de 0 al 100%; y el Flujo Luminoso (lm) que es la cantidad de luz visible emitida por una fuente de luz, el cual se mide en lúmenes. El cuadro 3 compara dichos parámetros teórica y experimentalmente para los LED analizados.



Figura 4. Esfera integradora marca *Labsphere* para la medición fotométrica y radiométrica de lámparas.

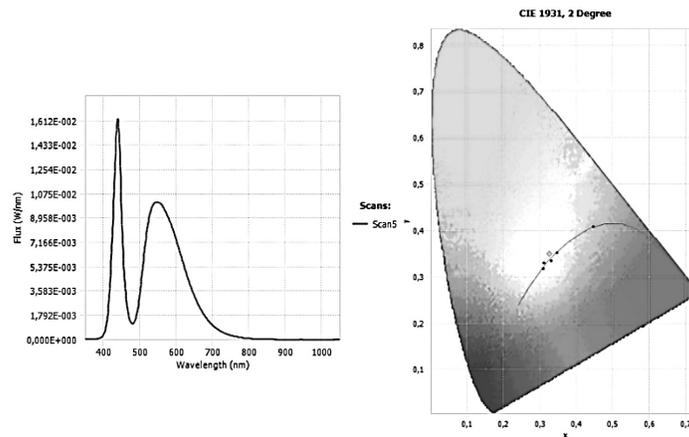


Figura 5. Mediciones de la composición espectral y el espacio de color para el LED 1

Cuadro 3. Valores fotométricos y de eficiencia para los LEDs analizados.

	Índice Reproducción de color (%)	Consumo eléctrico (W)	Flujo luminoso Real (lm)	Eficiencia luminosa (lm/Watt)	Diferencia de flujo luminoso con respecto a valor de hojas de datos (%)
LED 1	65	11	580	52	35
LED 2	85	10	381	38.1	57
LED 3	77	0.8	42	52	13

Del cuadro 3 se puede apreciar que el LED 1 presenta un IRC pobre, mientras que los LED 2 y LED 3 presentan IRC aceptables a su vez que todos presentan una eficiencia luminosa menor a la reportada. Por lo tanto, es de gran importancia considerar las características ópticas de la fuente de luz a utilizar. Las etapas de diseño que se presentan a continuación utilizan como fuente luminosa el LED 3, ya que éste presente el mejor compromiso entre eficiencia luminosa e IRC.

C. Unidad de Procesamiento de Potencia 1

Habiendo identificado la tecnología de almacenamiento de energía a utilizar y las características eléctricas del LED seleccionado es posible dimensionar la batería. En este caso, se utilizará una batería de iones de litio con una capacidad de carga de 2200 mAh, que permitirá al LED operar a su intensidad máxima de forma ininterrumpida durante 4 horas.

Se define una corriente de carga igual a 1/5 de la corriente máxima de carga, esto es, 0,4 A.

Por su simplicidad y robustez se propone utilizar como topología del circuito de potencia un convertidor reductor, que se muestra en la figura 6. El cuadro 4 muestra los parámetros necesarios para dimensionar el convertidor reductor.

Cuadro 4. Valores requeridos para el convertidor reductor de tensión tipo reductor.

Parámetro	Valor
Tensión de entrada	12V
Tensión de salida	3.7V
Corriente de salida	0.4A
Rizado en tensión de salida (ΔV_b)	5%
Rizado en corriente de salida (ΔI_b)	1%
Frecuencia de conmutación (F_s)	200 kHz

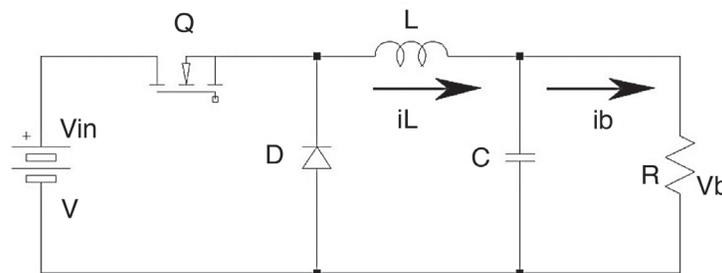


Figura 6. Convertidor reductor.

Las siguientes ecuaciones modelan el funcionamiento del convertidor reductor:

Con Q: ON, $0 < t < dT$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - v_b) ; \quad \frac{dv_b}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_b}{R} \right)$$

Con Q: OFF, $dT < t < T$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (-v_b) ; \quad \frac{dv_b}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_b}{R} \right)$$

A partir de los valores del cuadro 4, y mediante las expresiones propuestas por [4], es posible obtener los valores de los componentes del convertidor, los cuales se detallan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Valores y expresiones de las variables requeridas en el convertidor reductor.

Variable	Expresión	Valor
Ciclo de trabajo	$D_{bu} = \frac{Vb}{Vpv}$	0.308
Inductor BUCK	$L_{min_{bu}} = \frac{Vb * (Vpv - Vb)}{Vpv * Fs * \Delta Ib}$	581.63uH
Capacitor BUCK	$C_{min_{bu}} = \frac{\Delta Ib}{8 * Fs * \Delta Vb}$	371.622nF

La corriente de carga en la batería es aplicada cuando se encuentra descargada, es decir cuando la tensión es menor a la tensión nominal. Una vez que se alcanza la tensión nominal al aplicar una corriente constante (proceso de carga), es necesario mantener una tensión constante. El proceso de carga anteriormente descrito se ilustra en la figura 7.

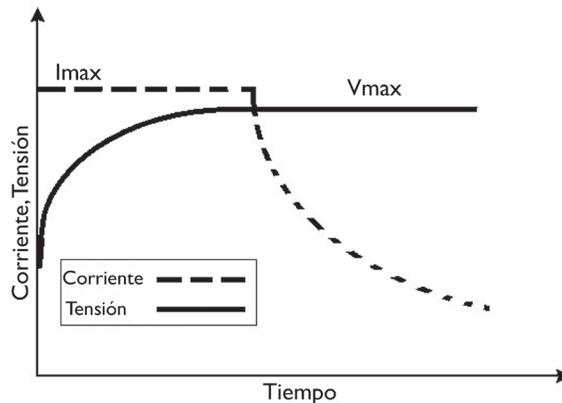


Figura 7. Perfil de carga de la Batería de Ion-Litio.

El proceso de carga antes descrito se puede obtener por medio controles de corriente y tensión conocidos como CC/CV, por los acrónimos en inglés de “*Constant Current (CC)*” y “*Constant Voltage (CV)*”. El control de corriente a implementar entra a funcionar cuando la tensión de carga disminuye de su valor mínimo, inyectando un flujo constante de 0,4A. y el control de tensión es activado cuando la tensión de la batería que va aumentando gradualmente supera la tensión nominal, que para la batería seleccionada es 4V.

D. Unidad de Procesamiento de Potencia 2

La unidad de procesamiento de potencia 2 se encarga de controlar la intensidad de luz del LED. La relación entre la corriente que circula a través del LED y la intensidad de luz es no lineal, sin embargo, tal y como se comprueba en [2], el LED se puede modelar como una resistencia, denominada resistencia dinámica del LED, conectada en serie con una fuente de tensión en corriente directa, tal y como se indica en la figura 8.

A partir de las medidas experimentales de la curva corriente vs. tensión del LED 3 en todo su rango de operación se obtuvieron los parámetros para el modelo lineal expuesto anteriormente. De esta forma, $R_s = 1.7323$ ohms y $V_o = 2.8794$ voltios. Con el fin de obtener una mayor intensidad de luz se utilizan tres LED conectados en serie. El modelo para el conjunto de LEDs se muestra en la figura 9.

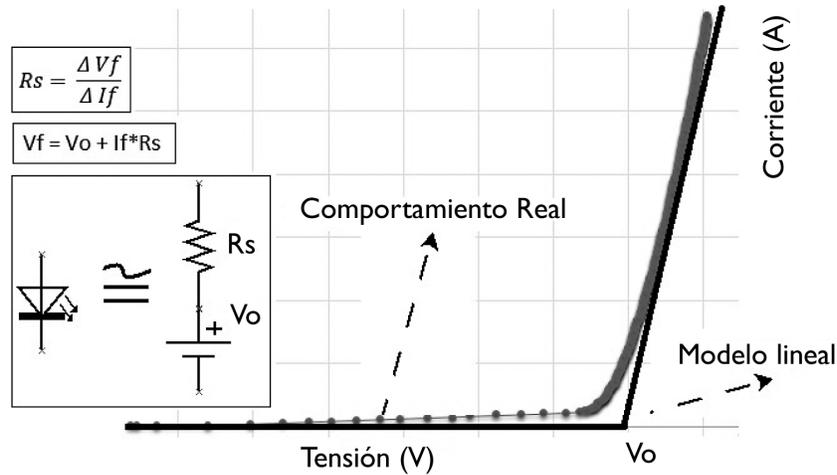


Figura 8. Modelo lineal del LED.

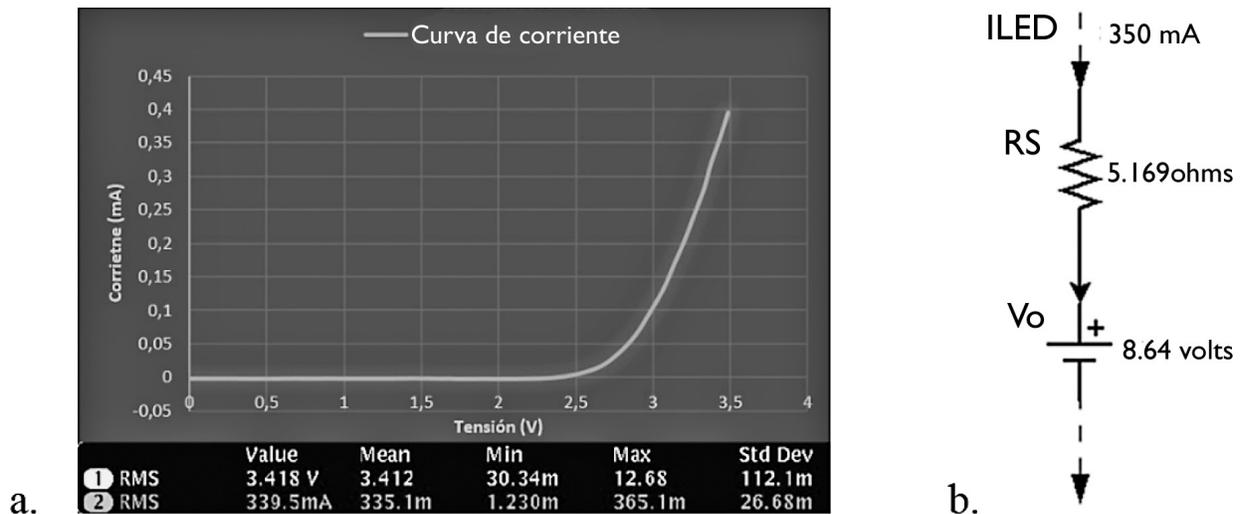


Figura 9. a. Curva característica del LED EHP-AX08. b. Modelo lineal para 3 LED en serie.

Debido al nivel de tensión de la batería y la necesaria para alimentar el conjunto de LEDs se decide utilizar una topología de convertidor de potencia elevador. Este convertidor se muestra en la figura 10.

De igual forma que para el caso de la unidad de procesamiento de potencia 1, esta unidad regula la corriente de salida por medio del control de la conmutación del transistor Utilizando el modelo lineal del LED como carga, las ecuaciones de estado del convertidor son las siguientes:

Con Q: ON, $0 < t < dT$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_b) ; \quad \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} * - \left(\frac{V_c - V_o}{R_s} \right)$$

Con Q: OFF, $dT < t < T$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_b - v_c) ; \quad \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \left(\frac{v_c - V_o}{R_s} \right) \right)$$

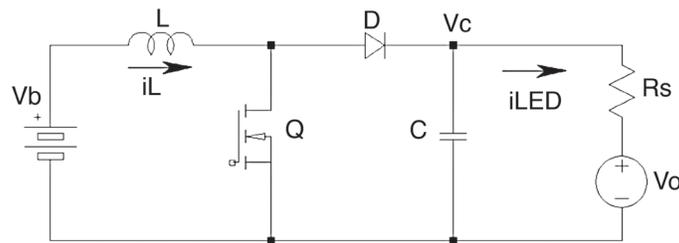


Figura 10. Convertidor elevador aplicado al modelo lineal del LED.

Cuadro 6. Valores requeridos de las variables requeridas para el convertidor elevador.

Parámetro	Valor
Tensión en la batería (V_b)	3.7V
Resistencia dinámica (R_s)	5.169ohms
Corriente que circula por el LED (I_{LED})	0.35A
Corriente máxima en el LED (V_o)	8.6
Rizado en tensión del LED (ΔV_{LED})	3%
Rizado en la corriente que circula por el LED (ΔI_{LED})	3%
Frecuencia de conmutación del transistor Q (F_s)	200 kHz

El cuadro 6 muestra los parámetros de diseño del convertidor elevador. Con base en el trabajo presentado por [4], se calculan los valores requeridos para el convertidor elevador, mostrados en el cuadro 7.

Utilizando estos datos se dimensiona la unidad de procesamiento de potencia 2, de forma tal que se regule la corriente en el LED.

Resultados de simulación

El comportamiento de carga del batería simulado por medio del control CC/CV es mostrado en la figura 11, en este se presenta un impulso al llegar a la máxima tensión de carga debido al cambio de control de corriente a tensión. Esta simulación fue hecha con la herramienta computacional PSIM, software para la simulación de electrónica de potencia.

Cuadro 7. Valores y expresiones para el convertidor elevador.

Variable	Expresión	Valores
Ciclo de trabajo	$D_{bo} = 1 - \frac{V_b}{V_{led}}$	0.57
Inductor	$L_{min_{bo}} = \frac{V_b D_{bo}}{F_s \Delta I_{LED}}$	352uH
Capacitor	$C_{min_{bo}} = \frac{I_{LED} D_{bo}}{F_s \Delta V V_{LED}}$	34uF

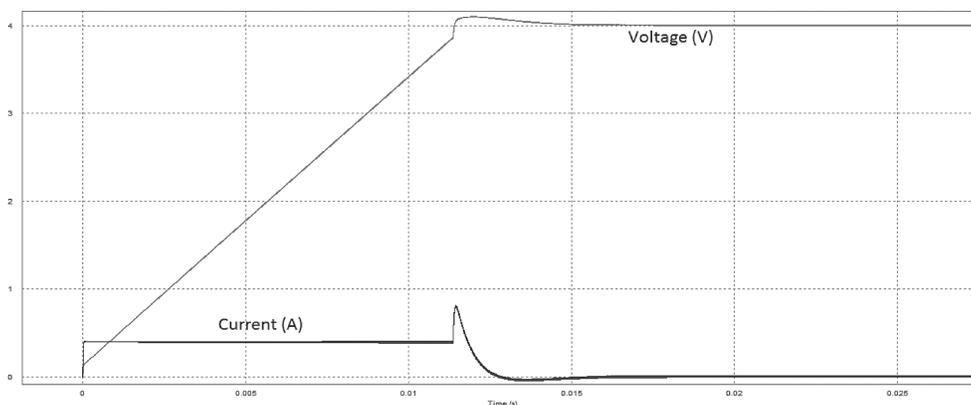


Figura 11. Curva de carga en la batería con el control CC/CV.

Utilizando Simulink se obtiene una I_{LED} de 0,36 A con los parámetros del cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros de simulación en Matlab/Simulink.

Parámetro	Valor/Tipo
Tiempo de Simulación	0.2
Metodo	ode45
Tipo	Paso variable
Tolerancia Relativa	1,00E-03
Tolerancia Absoluta	1,00E-05

Resultados experimentales

A partir de los componentes obtenidos en los cuadros 5 y 7, se implementa el prototipo de las unidades de procesamiento de potencia, en el cual por medio de reguladores Proporcionales-Integrales PI digitales en lazo cerrado se generaron las señales de control PWM requeridas para la conmutación de los convertidores. Realizando variaciones de luz ambiental en S1 y activando a S2 las señales obtenidas se muestran en las figuras 12 y 13.

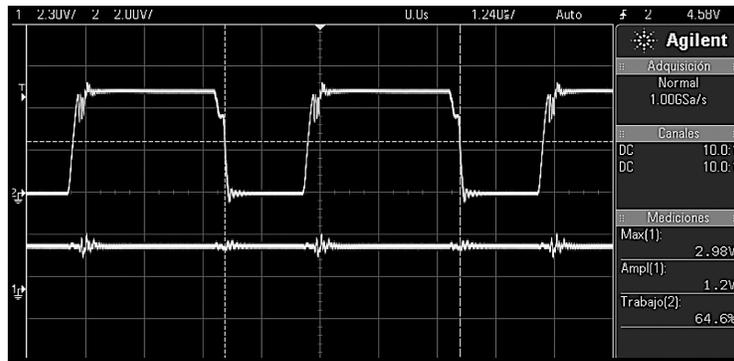


Figura 12. a) Señal de PWM con ciclo de trabajo 64% y señal de tensión del sensor de corriente equivalente a 350mA en el LED.

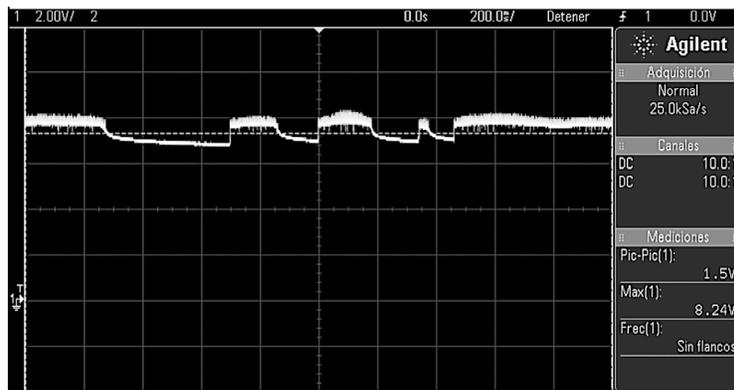


Figura 13. Comportamiento tensión en el arreglo de LEDs por variación en el sensor de luz S1.

Luego de mantener encendido el LED por varios minutos, el cargador de la batería se activó manteniendo una corriente constante de 0.44A, como se muestra en la figura 14.

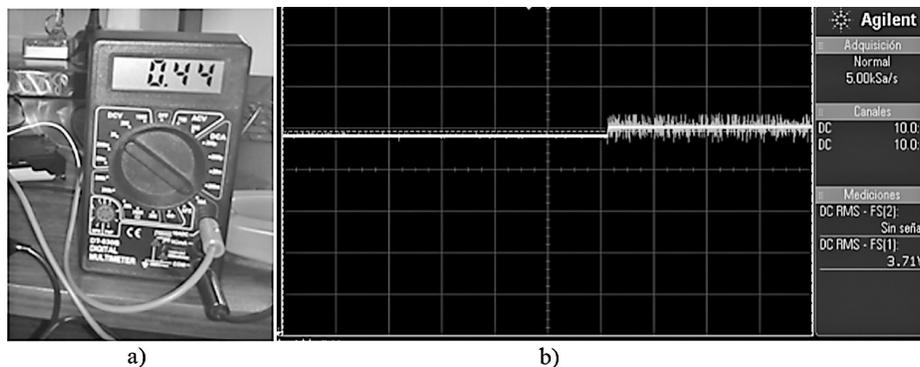


Figura 14. a) Corriente de carga en la batería. b) Inicio de carga de tensión en la batería.

La eficiencia del convertidor elevador al aumentar la tensión de salida se mantuvo sobre el 90%, alcanzando el 92% para el valor nominal de trabajo para los LED, como se muestra en la figura 15. El sistema de iluminación se muestra en la figura 16.

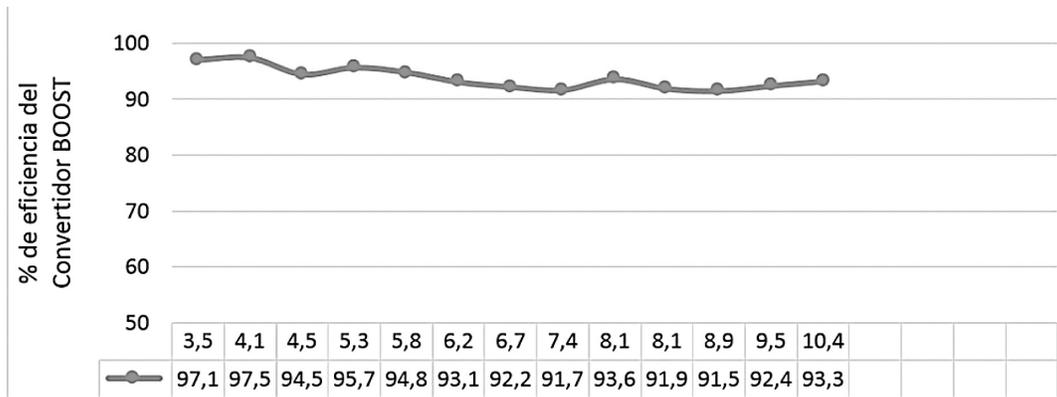


Figura 15. Eficiencia del convertidor elevador o BOOST, respecto a la tensión de salida a los LEDs.

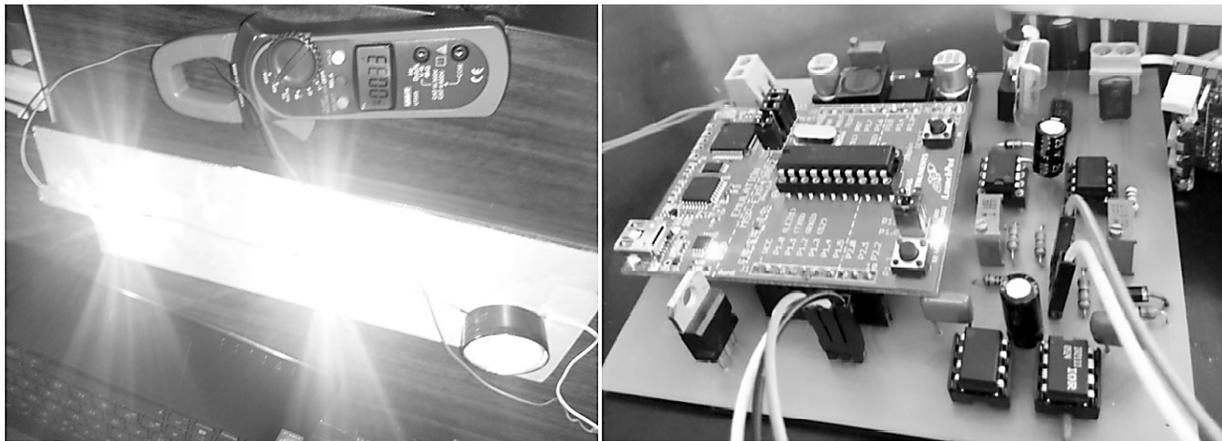


Figura 16. Prototipo de Sistema de Procesamiento de Potencia para Iluminación LED.

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente artículo se analizó teórica y experimentalmente las principales características físicas de dispositivos LED, se pudo comprobar la eficiencia luminosa y el índice de reproducción del color de algunos de estos dispositivos. Las diferencias de error de flujo luminoso son cuantificables y afectan directamente la eficiencia del sistema al dar a conocer la verdadera cantidad de luz que emiten respecto a su corriente y tensión nominal. La eficacia luminosa incide directamente en la calidad de luz, la cual es difícil de cuantificar sin la instrumentación adecuada.

A partir de reguladores PI, se puede realizar un control adecuado de la corriente del LED aplicando el modelo lineal de este mediante su resistencia dinámica y su tensión de corte, no obstante, este modelo no es válido para valores bajos de corriente debido a la dinámica no lineal del LED. Este tipo de reguladores permiten realizar circuitos de carga para baterías de iones de litio respetando los ciclos de carga. Con el convertidor elevador se logra obtener valores de alta eficiencia, es decir que casi toda la energía es transferida al LED. Cabe mencionar que, para realizar un control adecuado de la corriente en el LED, se debe dimensionar un dispositivo de disipación: activo o pasivo, ya que la temperatura afecta directamente al LED.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al “Programa de Pasantía Estudiantil con Fondos del Sistema 2015, CONARE-TEC” por el cual se ha cubierto parte del viaje del pasante y a la Rectoría del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su gestión.

Referencias

- [1] Assaf, M. Seshsachalam, D. Chandra, R. “DC-DC Converters Via Matlab/Simulink”. *Electrical Engineering Department, Motilal Nehru National Institute of Technology*. Allahabadm Utter Pradesh-211004. India, n.d.
- [2] V. C. Bender, T. B. Marchesan and J. M. Alonso, “Solid-State Lighting: A Concise Review of the State of the Art on LED and OLED Modeling,” in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 6-16, June 2015. doi: 10.1109/MIE.2014.2360324
- [3] Campos, D. “Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD”. Facultad de Ciencias (UASLO), n.d.
- [4] Mota, L C. “Dimensionamiento e gestao de energía solar fotovoltaica para aplicacao em sistemas autimatizados isolados da rede eléctrica”. *Dissertacao de mestrado. Faculdade de Engenharia*. Universidade Federal de Juiz de Fora. M.G, Brasil, 2013.
- [5] P. S. Almeida, F. J. Nogueira, L. F. A. Guedes and H. A. C. Braga. “An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white LEDs” *XI Brazilian Power Electronics Conference, Praiamar, 2011*. pp. 728-733. doi: 10.1109/COBEP.2011.6085242.
- [6] P. S. Almeida, A. L. C. Mello, V. M. Albuquerque, G. M. Soares, D. P. Pinto and H. A. C. Braga, “Improved state-space averaged representation of LED drivers considering the dynamic model of the load,” *2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013*, pp. 434-439. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785152
- [7] S. Y. Park et al., “A universal battery charging algorithm for Ni-Cd, Ni-MH, SLA, and Li-Ion for wide range voltage in portable applications,” *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 2008*, pp. 4689-4694. doi: 10.1109/PESC.2008.4592708
- [8] T. Novak and K. Pollhammer, “Traffic-Adaptive Control of LED-Based Streetlights [Industry Forum] Public lighting in urban environments accounts for about 50% of the electricity con,” in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 48-50, June 2015. doi: 10.1109/MIE.2015.2413455
- [9] V. C. Bender, F. B. Mendes, T. Maggi, M. A. Dalla Costa and T. B. Marchesan, “Design methodology for street lighting luminaires based on a photometrical analysis,” *2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013*, pp. 1160-1165. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785261