

Traffic Lights Powered with PV Solar Energy

González-Muñiz, Ana (ORCID: 0000-0002-3917-9242); Longueira-Romero, Ángel (ORCID:0000-0001-6085-820X)

Abstract— Nowadays, with the new achievements reached on renewable energy sources, people is trying to become more and more independent from fossil fuels in order to be environmentally friendly as well. In this context, the design of modular and efficient energy storage/recovery systems are gaining importance looking towards future applications and new services. Thus, with this project, our goal is to design smart traffic lights that can work for two days just being powered by PV solar energy. The biggest advantage of this sort of devices is that they can be placed anywhere as long as there is enough solar irradiance. Through this document, a complete study of these converters, design procedure in order to operate over the optimal points and two simplified control strategies have been described, introducing in this way, a robust design with modular and self-equalization capability.

Index Terms—Street Lighting, LED lighting, Energy Storage, Smart Cities, Energy Storage, MPPT, BMS

Affiliation: All authors are from EPI Gijón. Electrical Engineering Department. Campus de Viesques-Building 3 – ES-33204 - GIJON – ASTURIAS – SPAIN.

E-mail of authors: González-Muñiz, Ana (UO230879@uniovi.es), Longueira-Romero, Ángel (UO230923@uniovi.es).

I. INTRODUCCION

A lo largo de este semestre, en el contexto de la asignatura de Electrónica de Potencia, hemos desarrollado un proyecto enmarcado en el Taller de Energías Renovables: El Semáforo Autosuficiente.

El objetivo de este proyecto es aprovechar la energía del sol a través de un panel solar y almacenarla en un banco de baterías para cubrir los gastos de iluminación del semáforo tanto de día como de noche. De esta manera, el semáforo será independiente de la red y podrá autoabastecerse.

Esta propuesta permitiría instalar semáforos en zonas remotas que carezcan de conexión a la red. Por otra parte, también aseguraremos un normal funcionamiento del tráfico durante un apagón o ante cualquier corte del suministro (por ejemplo, durante el mantenimiento de las líneas o durante las obras de construcción de un nuevo edificio).

II. ESQUEMA DEL PROYECTO

Una vez definida la idea sobre la que fundamentamos nuestro trabajo, corresponde analizar el proyecto desde un punto de vista técnico. De esta manera, El Semáforo Autosuficiente estaría constituido por los siguientes módulos de potencia:

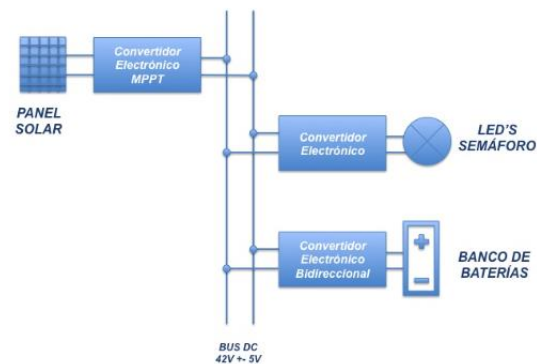


Figura 1. Esquema del proyecto

Se observan tres convertidores de potencia: un primero relativo a la captación de la energía del sol (Panel Solar), un segundo relativo al almacenamiento de dicha energía (Baterías) y un tercero correspondiente al abastecimiento de la carga de potencia (LED's del semáforo). Los tres se comunicarían a través de un bus de continua de 42V, el cual podría tener alteraciones de hasta 5V.

III. MÓDULO DE POTENCIA DEL PANEL SOLAR

El objetivo de este módulo de potencia es captar la energía del sol de la forma más eficiente posible y transferirla después hacia el bus de continua. Para ello, se escoge un panel solar que se adapte a la superficie disponible y garantice el autoabastecimiento. En función de las características de este panel, se dimensiona el convertidor necesario para extraer la máxima potencia en todo momento.

- Panel de Trabajo

De acuerdo al diseño del semáforo, habría 2m^2 de superficie libre para colocar el panel solar. Teniendo en cuenta este dato, se escogen dos paneles de 120W cada uno y que, en conjunto, ocupan un área inferior a la impuesta. De esta manera, la potencia de trabajo será de unos 240W. En cuanto a la disposición de los paneles, se anclarían en una misma estructura, como se aprecia en la Figura 2.

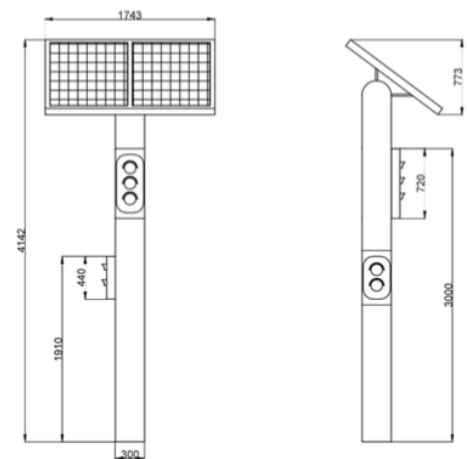


Figura 2. Vista del semáforo

Con estos 240 W de potencia instalada, el semáforo será autosuficiente. Así lo confirma el PVGIS. Según sus datos, en caso de situar el semáforo en la rotonda de entrada de la EPI, incluso en el peor de los casos (mes de diciembre), los paneles solares suministrarán más energía de la necesaria para cubrir el gasto de iluminación del semáforo. Por tanto, bajo estas circunstancias, el semáforo cumpliría con el principal objetivo del proyecto: el autoabastecimiento.

- Convertidor de Potencia relativo al Panel Solar

Los dos paneles solares se manejan de forma independiente, con dos convertidores de potencia idénticos, uno para cada panel. En cuanto a la tipología del convertidor, se emplea un Convertidor Elevador, también llamado Boost Converter, para elevar la tensión de entrada del panel solar hacia la tensión de salida del Bus DC.

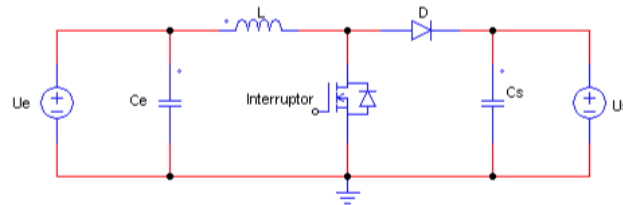


Figura 3. Boost Converter

Se fijan unos valores máximos para el rizado de corriente por la bobina y para los rizados de tensión por los condensadores y, con ellos, se dimensionan los componentes del circuito. Desarrollando los cálculos, resulta que $L=1\text{mH}$, $C_e=47\mu\text{F}$ y $C_s=47\mu\text{F}$.

Trasladando este circuito a PSIM, se obtiene el siguiente esquema:

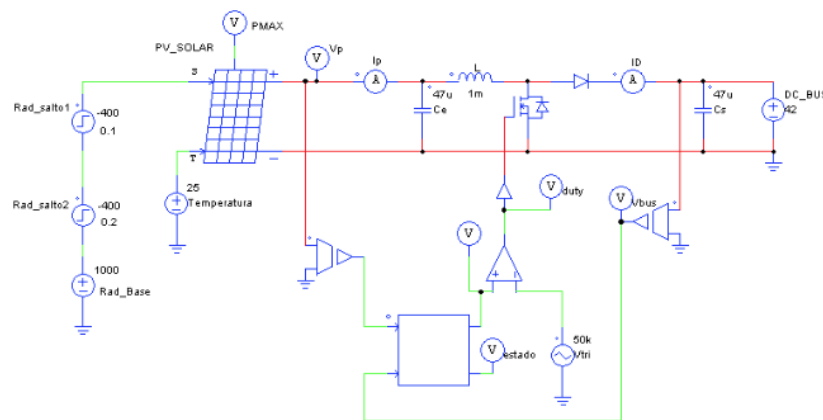


Figura 4. Circuito de trabajo en PSIM

En la Figura 4 aparece el Convertidor Elevador con el panel solar a la entrada y el Bus DC a la salida. Los valores de la inductancia y los condensadores de entrada y salida se corresponden con los expuestos anteriormente.

El ciclo de trabajo del MOSFET lo gestiona un microcontrolador. Para ello, se implementa un algoritmo de control en el dispositivo y él se encarga de generar el duty necesario para sacar la máxima potencia del panel en todo momento. Este algoritmo de control se basa en un diagrama de estados en el que se incluye, además del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), un arranque suave y un estado de protección, al cual se saltaría si la tensión del bus fuese excesiva en algún momento.

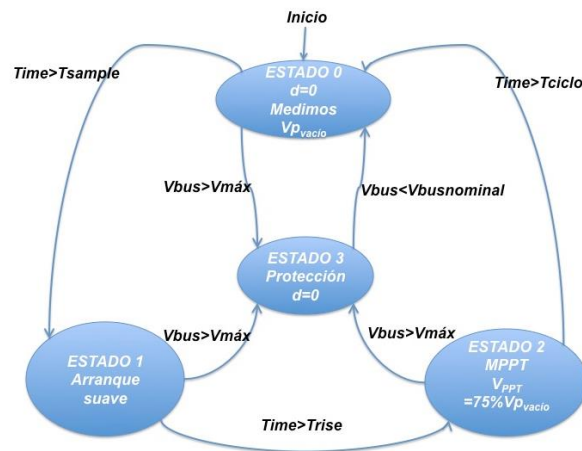


Figura 5. Diagrama de estados

Aplicando este diagrama de estados se obtiene el siguiente resultado:

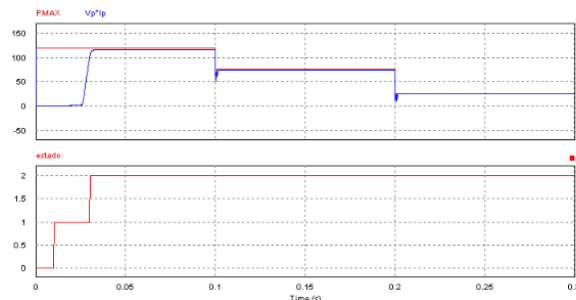


Figura 6. Resultados de la simulación

En la primera gráfica se aprecia, para tres radiaciones solares distintas, la diferencia entre la potencia máxima del panel y la que realmente se extrae con el convertidor. En los tres casos, ambas son prácticamente idénticas. Por otro lado, en la segunda gráfica figura el cambio de un estado a otro, de acuerdo a lo especificado en el diagrama de control.

- Elección de componentes

Con la simulación que aporta el PSIM, se determina el peor punto de trabajo para cada componente: por un lado, desde el punto de vista de la tensión y, por otro, desde el punto de vista de la corriente. A continuación, se buscan en el mercado aquellos componentes que garanticen su funcionamiento en ambas circunstancias. A modo orientativo, se muestran los componentes escogidos en la siguiente tabla:

Componente	Máxima Tensión (V)	Máxima Corriente (A)	Modelo Comercial Escogido
Condensador de salida	42	0.4	MMK27 de Kelnet
Condensador de entrada	25	8	MMK27 de Kelnet
Diodo	-42	6	RHRG3060-F085 de Fairchild
MOSFET	42	6	Si5476DU de VISHAY
Bobina	25	6	-

Tabla 1. Componentes del módulo de potencia del panel solar

En cuanto a la bobina, podría fabricarse en el laboratorio sin necesidad de encargarla a ningún fabricante. Empleando como material magnético el N27 de Siemens y un núcleo E40/16/12, serían necesarios un entrehierro de 3mm y 127 espiras.

En lo que respecta al diseño térmico, corresponde asegurar que el diodo y el MOSFET nunca trabajen a temperaturas peligrosas. Por su parte, el diodo en funcionamiento supera la temperatura máxima indicada por el fabricante. Necesitaría un disipador de resistencia menor de 43°C/W para mantenerse por debajo de la temperatura de riesgo (se le incorpora uno de 12°C/W de AAVID Thermalloy, referencia 501303B00000G). Sin embargo, el MOSFET trabaja siempre por debajo de la temperatura de riesgo y no necesita disipador.

Las pérdidas en la bobina (en el núcleo y en el cobre), junto con las pérdidas en el diodo y en el MOSFET, alcanzan los 22W. Esto implica un rendimiento del convertidor de potencia del 82%.

IV. MÓDULO DE POTENCIA DEL BANCO DE BATERÍAS

El objetivo de este módulo de potencia es almacenar la energía que se obtiene de los paneles solares. También proporciona capacidad de autoabastecimiento (pudiendo devolver la energía al bus para alimentar la carga de iluminación) y regula la tensión del bus.

- Capacidad del banco de baterías

El banco de baterías propuesto debe satisfacer las necesidades del semáforo tanto desde el punto de vista de la energía, como de la potencia. Por un lado, para un funcionamiento ininterrumpido del sistema de iluminación y exigiendo una autonomía de dos días, sería necesario manejar 960Wh de energía. Todo ello sin tener en cuenta los rendimientos de las baterías, ni las pérdidas del convertidor de potencia. Por otro, en el peor de los casos, el convertidor tendrá que manejar hasta 240W de potencia, como se observa en la figura 7. Teniendo en cuenta ambas restricciones, se trabaja con tres módulos de potencia de 80W cada uno. Para ello, son necesarias 21 baterías de 15Ah y 3.2V cada una. Estas baterías estarán resguardadas en el interior del poste de sujeción del semáforo.

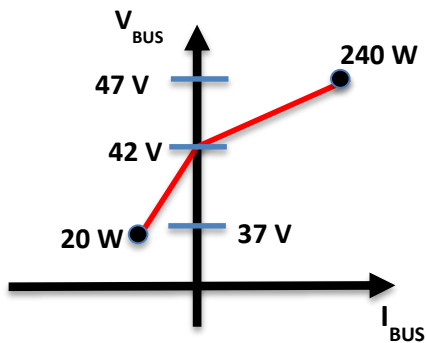


Figura 7. Relación entre corriente y tensión del bus

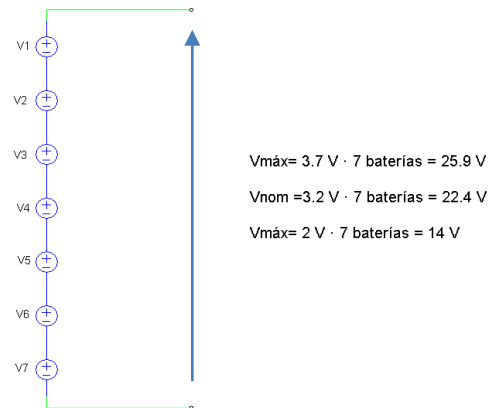


Figura 8. Módulo de baterías

- Convertidor de Potencia relativo al Banco de Baterías

Cada módulo de potencia se maneja de forma independiente con un convertidor idéntico para cada uno. La topología empleada en este caso será un convertidor bidireccional, que permitirá tanto cargar las baterías, como suministrar energía al bus DC.

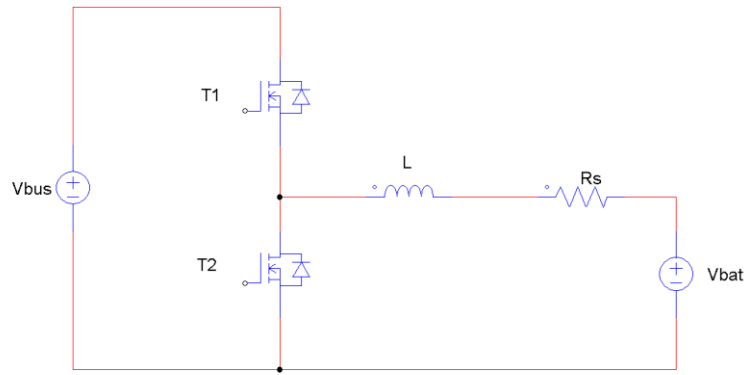


Figura 9. Convertidor bidireccional

Se fijan unos valores máximos para el rizado de corriente por la bobina y para los rizados de tensión por los condensadores y, con ellos, se dimensionan los componentes. Desarrollando los cálculos se obtiene que: $L=500 \mu\text{H}$, $C_e=1 \text{ mF}$ y $C_s=100 \mu\text{F}$.

Con todo lo anterior, trasladando los datos al PSIM, se obtiene el siguiente esquema:

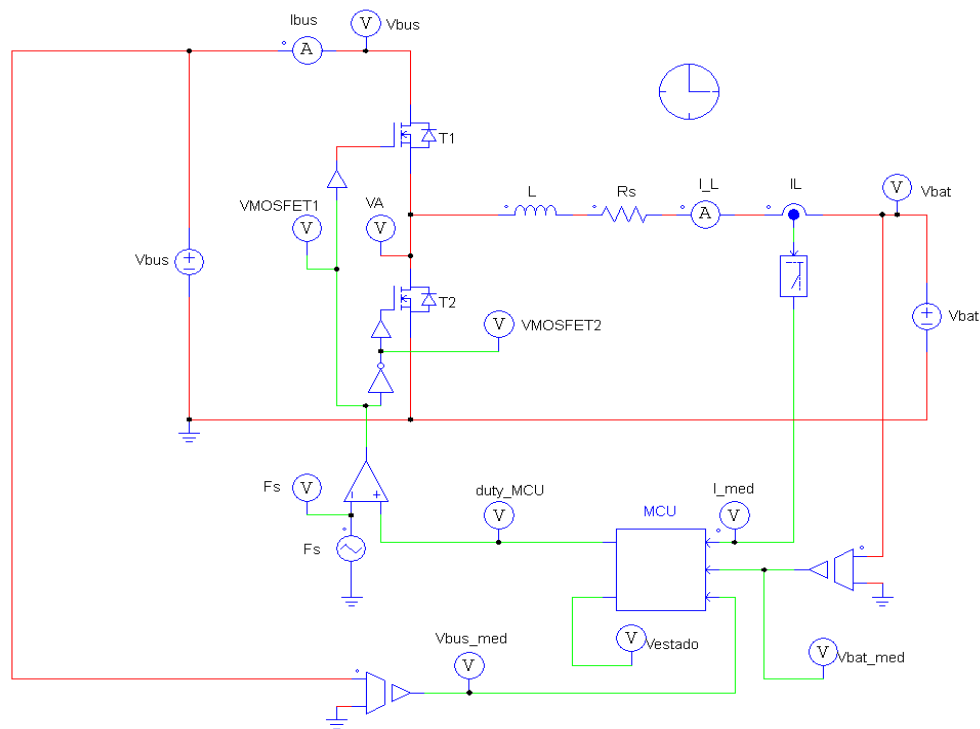


Figura 10. Circuito simulado en PSIM

La apertura y cierre de los MOSFET se regulará mediante un microcontrolador. En él se grabará un programa que, en función de las tensiones medidas en el bus DC y en el banco de baterías, genera el duty necesario para conseguir una corriente concreta en el bus (según la figura 7, a cada tensión le corresponde sólo una corriente). De esta manera, se realiza un control en bucle abierto. La estructura del algoritmo que gobierna los transistores está basada en un diagrama de estados, como el que se presenta a continuación:

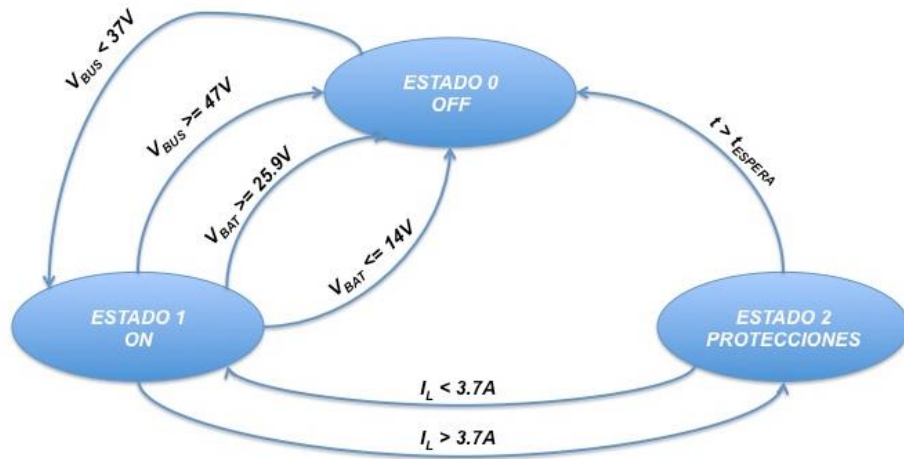


Figura 11. Diagrama de estados

Los resultados que se obtienen con él, son los siguientes:

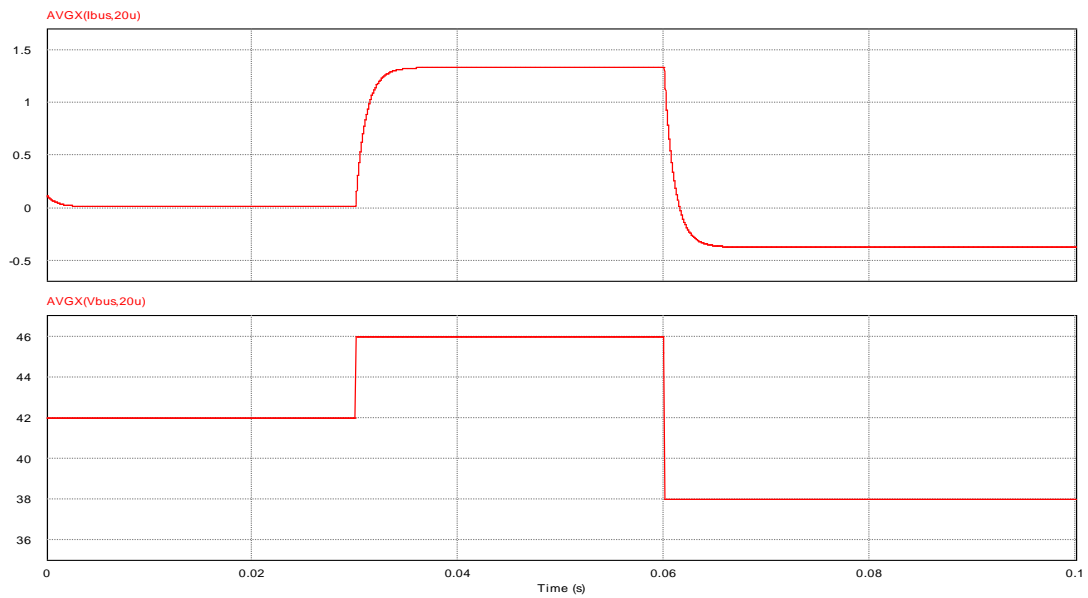


Figura 12. Simulación en PSIM

Como se aprecia en las gráficas, a cada tensión del bus, le corresponde un valor de corriente (también en el bus DC) único.

- Elección de componentes

La elección de los componentes se puede realizar, bien mediante una simulación en PSIM (viendo los peores puntos de trabajo), o bien al calcular los rizados de tensión y corriente en los mismos. Es importante prestar atención tanto a las limitaciones de tensión, como a las de corriente, que impone el circuito. Con esto, se tiene:

Componente	Máxima Tensión (V)	Máxima Corriente (A)	Modelo Comercial Escogido
Condensador de salida	450	5	UBT1H101MPD8 de Nichicon
Condensador de entrada	450	8	UVY1H102MHD de Nichicon
MOSFET	60	10	FQPF13N06L de FairChild
Bobina	47	4	-

Tabla 2. Componentes del módulo de potencia del banco de baterías

Aunque sería interesante buscar si existe en el mercado una bobina que cumpla las restricciones de trabajo, se puede construir en el laboratorio. Empleando para ello el material magnético N27 de Siemens y un núcleo E30/15/7, serán necesarias 163 espiras con un entrehierro de 2 mm. Las pérdidas que hay en la bobina alcanzan los 7.4 W.

En el caso del convertidor de potencia del banco de baterías, los únicos componentes susceptibles de trabajar a temperaturas peligrosas son los MOSFET. Durante su funcionamiento no superan nunca la máxima temperatura que son capaces de soportar, por lo que no es necesario incluir ningún tipo de disipador térmico.

V. PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB)

Como punto final, se elabora una placa de circuito impreso (PCB) para cada módulo de potencia estudiado.

Para ello, deben incorporarse a los circuitos de trabajo algunos elementos esenciales, como:

- Un driver que comunique la salida del microcontrolador con la puerta del MOSFET.
- Divisores de tensión para realizar medidas en el circuito de trabajo y llevarlas hacia el microcontrolador.
- Fuentes de tensión auxiliares que proporcionen los 5V necesarios para la alimentación del micro y los 12V que necesita el driver para trabajar.
- Otros elementos auxiliares: diodos para la protección del micro; resistencias para los divisores de tensión y para limitar corrientes; condensadores para filtrar ruidos; LED's de señalización que se manejarán desde el micro, etc.

Teniendo en cuenta estos elementos, se transfiere el circuito completo a una PCB que será de cobre por ambas caras. En la figura 13 se observa la placa obtenida para el caso del módulo de potencia del panel solar y en la figura 14, la correspondiente a cada módulo de baterías.

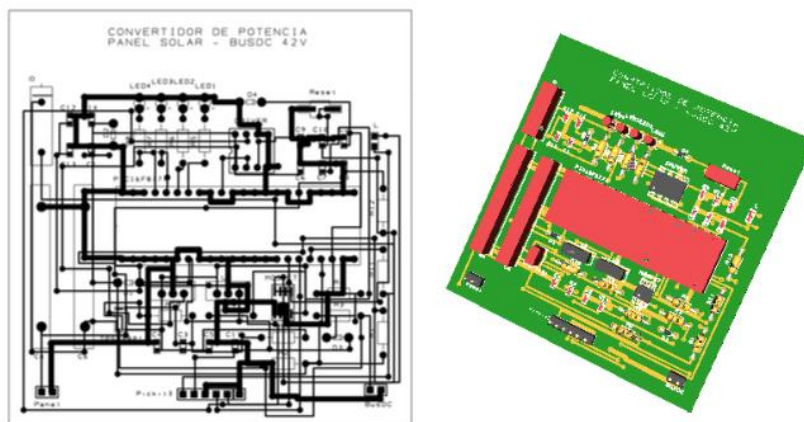


Figura 13. Placa de Circuito Impreso del Boost Converter

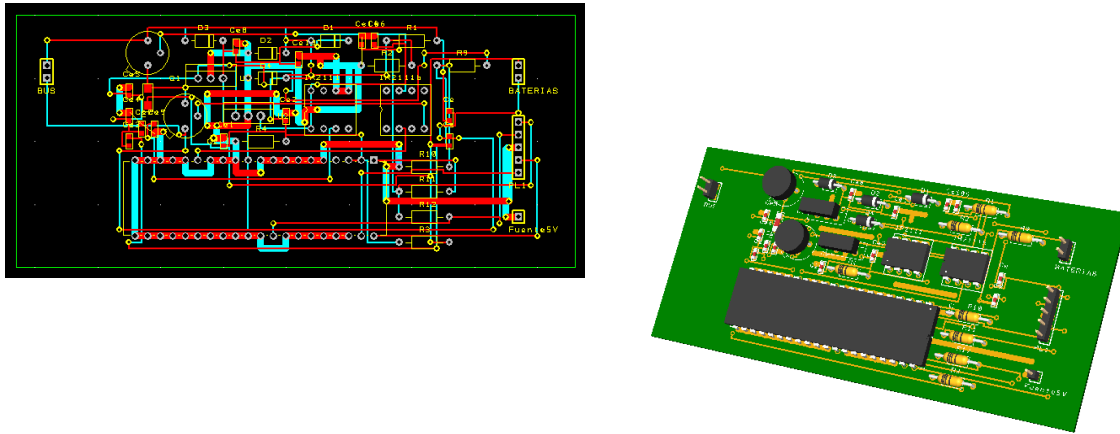


Figura 14. Placa de Circuito Impreso del bidireccional

VI. ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ILUMINACIÓN

En la mayoría de semáforos, el sistema de iluminación se diseña para alumbrar con el mismo nivel de intensidad todo el día. Sin embargo, estas luces deberían tener una intensidad diferente de día que de noche:

- Mayor de día, cuando la luz ambiental es muy alta.
- Menor de noche, evitando deslumbramientos, cuando la luz ambiental es baja.

Combinando sensores de luz ambiental y reguladores de intensidad eléctrica, puede alcanzarse el equilibrio deseado: el regulador aumentará o disminuirá la intensidad eléctrica en función del nivel de luz ambiental detectado por el sensor.

Dicha regulación puede llevarse a cabo desde un microcontrolador: el MCU envía una señal de salida (duty) que gobierna el cierre y apertura de un interruptor. Este interruptor se encarga de abrir y cerrar el circuito de iluminación, como se refleja en la figura 15.

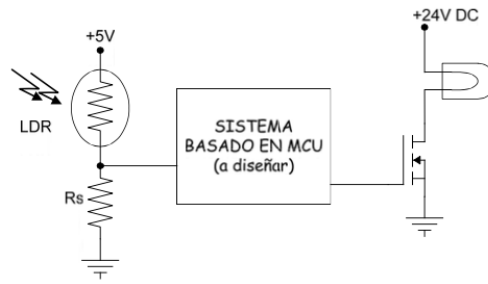


Figura 15. Control de potencia del sistema de iluminación

Un posible diagrama de control sería el siguiente,

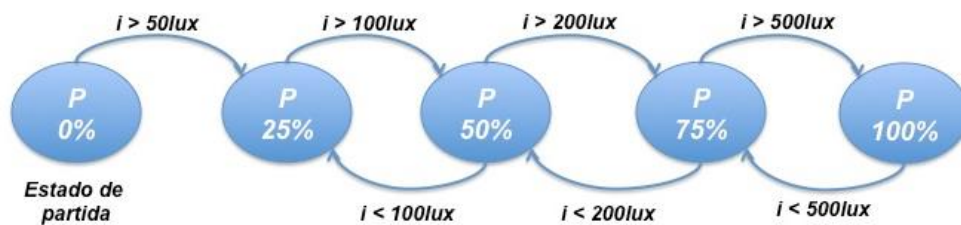


Figura 16. Diagrama de control del sistema de iluminación

De acuerdo a este diagrama, la potencia del sistema de iluminación varía del 0 al 100% en función de la luz ambiente. Considerando la cantidad de horas nocturnas, atardeceres, amaneceres, días nublados... que se suceden a lo largo del año, podría alcanzarse un elevado ahorro de energía.

VII. CONCLUSIONES

Finalizado el estudio del proyecto, concluimos que **El Semáforo Autosuficiente** es un proyecto viable y aparentemente asequible:

- Será viable, puesto que hemos demostrado su capacidad para autoabastecerse sin necesidad de conexión a la red.
- Será asequible, al menos desde un punto de vista teórico, ya que con los conocimientos adquiridos a lo largo de la asignatura hemos sido capaces de plantear una solución a la propuesta.

El punto final de nuestro trabajo sería llevarlo a la práctica. Para ello, fabricaríamos la placa de circuito impreso en los laboratorios de la EPI (también podríamos pedirla por encargo, pero a un alto coste). Puesto que la fabricación no es objeto de este curso, dejamos este apartado pendiente para retomarlo en asignaturas futuras.

El semáforo, una vez acabado, tendría el siguiente aspecto:

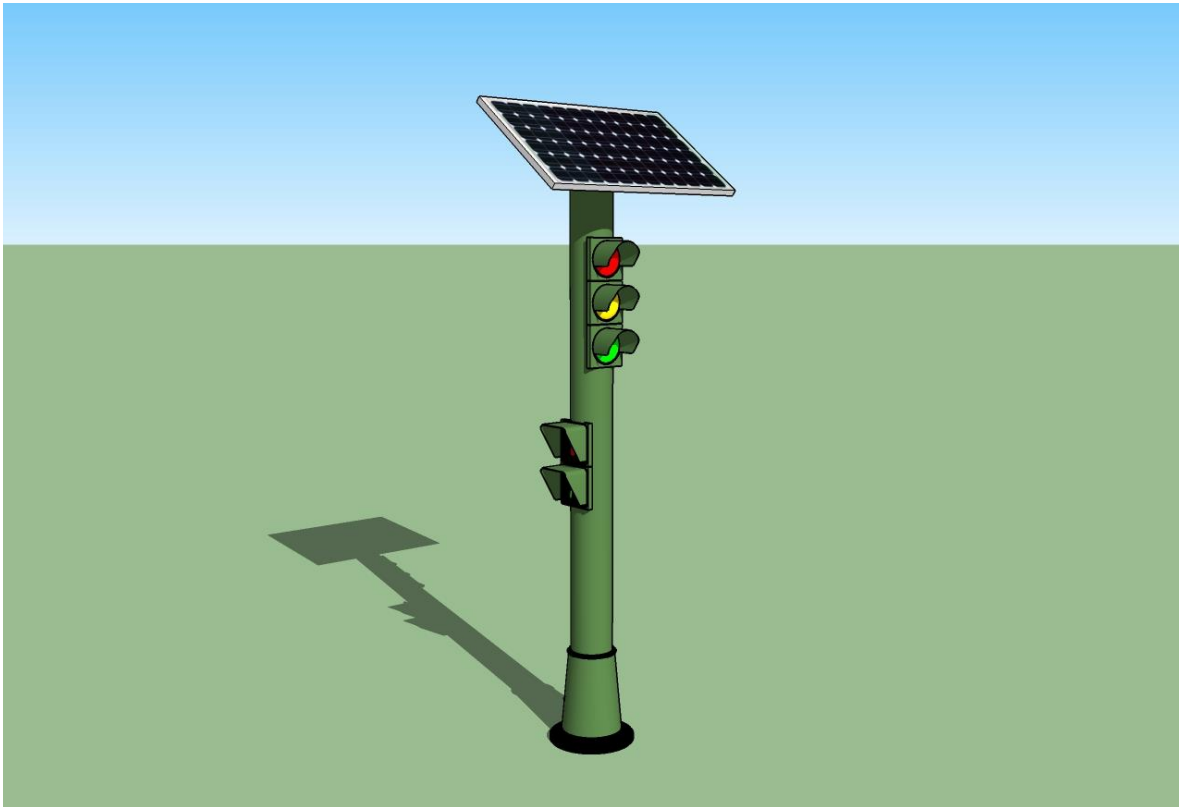


Figura 17. Vista 3D del semáforo

VIII. REFERENCIAS

- [1] Estimación del recurso solar. Base europea de datos de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [2] Apuntes de la asignatura [Electrónica de Potencia](#). M. Rico-Secades, A. J. Calleja.
- [3] Propuestas de cursos anteriores de la revista Workroom on Renewable Energy ([WRE](#)).
- [4] Referencia de consumo de las lámparas tipo LED del semáforo vía [SonTrafic](#).
- [5] Apuntes de la asignatura Sistemas Electrónicos Digitales de Fernando Nuño García.