

Sistema de iluminación adaptativo y fotovoltaico para aplicación en entornos rurales dispersos



Este trabajo sintetiza los fundamentos y el diseño para el desarrollo de un sistema de iluminación adaptativo con tecnología de iluminación de estado sólido —SSL— (o LED), alimentado con un sistema de energía solar fotovoltaica, proyectado para funcionar en condiciones climáticas calurosas. Al ser un equipo adaptativo y autónomo, su eficiencia y reducido tamaño se alcanza, por un lado, por medio de la combinación sinérgica de dos tecnologías, la fotovoltaica y led, y por el otro, por un análisis de requerimientos lumínicos de la aplicación y a través de un sistema de control adaptativo conformado, básicamente, por un microcontrolador y un sensor de presencia, lo que permite ejecutar un algoritmo que gobierna los distintos subsistemas intervinientes. Además, se aprovecha la sombra del panel fotovoltaico junto con un sistema de extracción de aire natural para acondicionar, refrigerar y mantener el acumulador a una temperatura de operación segura. El método del “mes crítico” se emplea para dimensionar el sistema autónomo. Como resultado, se obtiene un equipo de iluminación autónomo optimizado en potencia y tamaño que produce una iluminación de excelente calidad, con un flujo luminoso del cien por ciento (100%) durante las tres primeras horas de operación nocturna, que luego pasa a modo bajo consumo (50%), pudiendo incrementar al total de su capacidad (2.200 lúmenes) ante la presencia de cualquier objeto o personas en movimiento.

Palabras clave: Led, energía solar, entorno rural disperso

Nota del editor. El artículo aquí publicado fue originalmente presentado por los autores en Luxamérica 2018

Franco Fernández y Alejandro Ferreiro
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina
francofer81@hotmail.com

Carlos Cadena y Silvina Rigalli
Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales
CONICET
cadenacinenco@gmail.com

Introducción

Actualmente en el mundo, en Argentina y en la provincia de Santiago del Estero, existen comunidades rurales con demandas energéticas difíciles de satisfacer por causas diversas, entre las que se resalta como probables su localización distante de las redes de energía, su baja densidad poblacional, su reducida o nula actividad productiva. La provisión de energía a estas comunidades en la extensa geografía provincial constituye un problema, que a su vez obstaculiza la potencialidad de plasmar alternativas de desarrollo humano (DH) para sus habitantes. Los sistemas energéticos tienen relevancia por su imbricación con las múltiples dimensiones del desarrollo sustentable, sin soslayar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la mitigación del cambio climático.

La energía es esencial para satisfacer necesidades fundamentales (por ejemplo, provisión de agua, atención en materia de salud y educación, etc.), como también disponibilidad de iluminación en vías de circulación. La satisfacción de estos requerimientos tiene mayor relevancia en entornos rurales dispersos, es decir, en aquellas áreas rurales con población dispersa (ARPoD). Pese a sus características, es habitual que en las ARPoD se disponga de pequeños edificios para el funcionamiento de organismos públicos dirigidos a materializar las atenciones en educación, salud, seguridad, y otros fines. La existencia de estos reducidos grupos de habitantes, como así de los edificios públicos citados (ver figura 1), hacen necesario analizar y proponer alternativas tendientes a la iluminación de sus áreas próximas y, además, de los perímetros y caminos y accesos correspondientes.

Toda la provincia de Santiago del Estero posee clima semitropical continental con estación seca [9]; las condiciones climatológicas son rigurosas con temperaturas muy elevadas, donde las temperaturas medias máximas de verano oscilan entre 36 y 42 grados centígrados mientras que las mínimas varían entre 18 a 24 grados. La temperatura máxima absoluta estimada (en los últimos veintidós años) por satélite fue de 47 grados [8]. Otra característica de su clima son sus vientos débiles, que no superan los catorce kilómetros por hora (14 km/h) medios anuales, excepto durante el mes



Figura 1. Escuela y vivienda típicas en entornos rurales (Departamento Pellegrini, Santiago del Estero), sin acceso a la red eléctrica

de agosto. Los bajos niveles de vientos, temperaturas bastantes extremas, precipitaciones suficientes y muy buenos niveles de radiación solar caracterizan esta provincia como una región con clima extremo, donde gran parte de las áreas rurales con población dispersa que la habita debe subsistir sin los servicios para satisfacer las necesidades fundamentales, es decir, sin electricidad, agua potable, ni gas natural.

Por lo anterior, se propone aprovechar los buenos niveles de radiación solar que posee esta región, sumados a la evolución de las tecnologías renovables y la iluminación de estado sólido (SSL), para construir un sistema de iluminación autónomo y optimizado a un costo moderado. Este equipo permitirá iluminar áreas externas o caminos requeridos por los poblados dispersos durante las noches de los 365 días del año.

Descripción

Descripción de componentes

Con este artículo se propone una metodología que permita el diseño, la simulación y el dimensionado para el desarrollo de un sistema de iluminación exterior, optimizado, adaptativo y solar. La fuente de energía que impulsará el sistema será por medio de la tecnología fotovoltaica. Las celdas fotovoltaicas de silicio cristalinas [2], en sus versiones mono- y poli-, son las más apropiadas para este trabajo debido a su madurez, disponibilidad y eficiencia. (Ver figura 2).

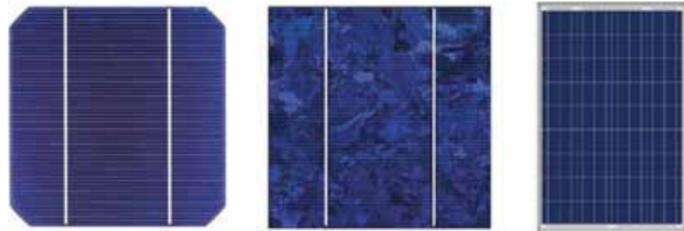


Figura 2. Tecnologías de celdas fotovoltaicas cristalinas: monocristalina (izquierda) y policristalina (centro); y panel monocristalino (derecha)

Como resultado del desfase entre el consumo y la producción solar, se requiere la utilización de sistema de acumulación eléctrica. En la actualidad, existen diferentes tecnologías de baterías con muy buenas características, pero en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos se usan normalmente baterías de plomo-ácido por su muy buena relación precio/energía disponible [3]. La figura 3 muestra las diferentes tecnologías de baterías, comparando su capacidad en relación a su peso (eje vertical) y su volumen (eje horizontal). Las baterías de litio como las que se usan en los teléfonos móviles son superiores. Estos tipos existen también para aplicaciones fotovoltaicas, pero su precio es alto, por lo que solo se utilizan en casos muy especiales. Las baterías de plomo-ácido con válvula reguladora (VRLA) se utilizan comúnmente en sistemas de iluminación solar por ser selladas y de libre mantenimiento; existen dos tipos de tecnologías según se presente el

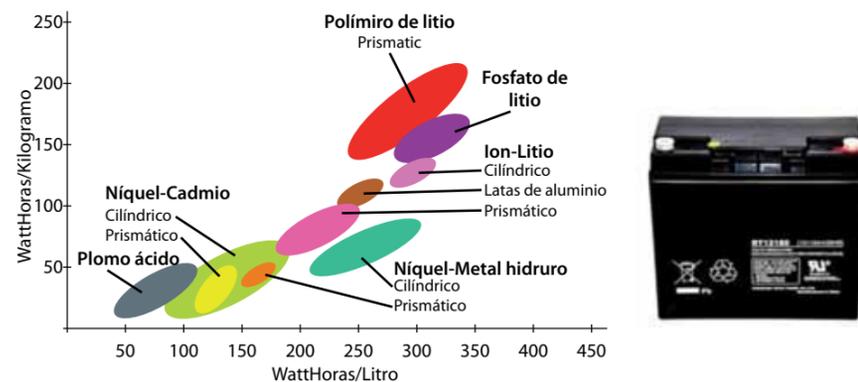


Figura 3. Comparación de capacidades de diferentes tecnologías de baterías en función del peso y volumen (izquierda). Batería AGM 12 V/18 Ah (derecha)

electrolito en estado sólido (AGM) o en forma de gel. Se propone, como alternativa de uso, la batería tipo AGM debido a su buena tolerancia a las altas temperaturas, porque no requieren de mantenimiento y no presentan sensibilidad al proceso de carga como las de gel.

Actualmente, las lámparas de mayor eficiencia para iluminación exterior-interior son los leds. Tienen una eficiencia luminosa entre 120 y 160 lúmenes por watt. La figura 4 muestra la evolución de las tecnologías de fuentes de iluminación artificiales en función de la eficiencia luminosa y la estructura típica de un led de un watt de potencia. Por este último y su prolongada vida útil, son superiores a otras tecnologías de fuentes luminosas existentes, además, poseen una excelente percepción visual. La tecnología led opera con niveles de tensión bajos, lo cual la hacen apropiada para trabajar con módulos fotovoltaicos y sistemas de acumulación eléctricos [4].

Con el objeto de sinérgizar las tecnologías mencionadas y alcanzar el rendimiento óptimo del equipo propuesto [1], el control se puede basar en la tecnología de sistemas embebidos. Esta última podría ser alguno de los modelos de placa de desarrollo de la marca Arduino, como ser nano o mega. (Ver figura 5). Eventualmente, ante la necesidad de contar con un sistema digital de mayores prestaciones, se podría recurrir a dispositivos como *BeagleBone Black* o *Raspberry Pi*; estos últimos requieren un pequeño sistema operativo para funcionar.

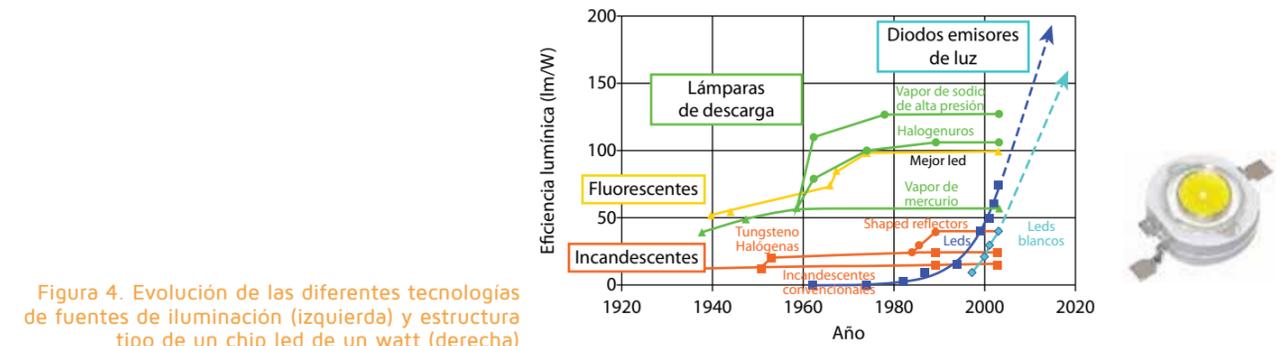


Figura 4. Evolución de las diferentes tecnologías de fuentes de iluminación (izquierda) y estructura tipo de un chip led de un watt (derecha)



Figura 5. Alternativa de dispositivos embebidos para implementar el control del sistema: *Arduino* (izquierda), *BeagleBone Black* (centro) y *Raspberry Pi* (derecha)

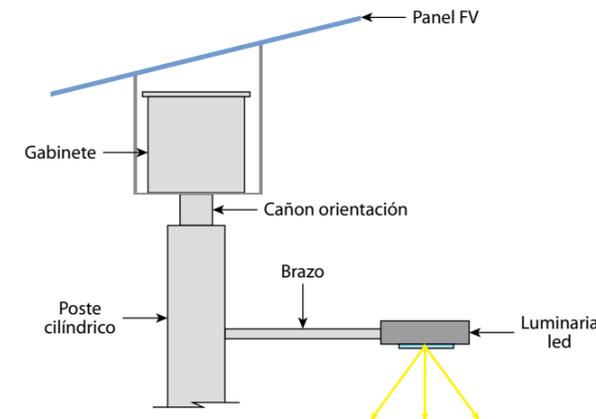


Figura 6. Estructura de montaje y de fijación de los componentes del sistema

El módulo fotovoltaico, el acumulador, la luminaria y los elementos de control del sistema se montarán y fijarán sobre un poste metálico que será diseñado y construido con materiales resistentes para que sean capaces de soportar las cargas y las inclemencias del tiempo. Se prevé ubicar el gabinete que contiene la batería y la electrónica en el nivel superior del poste y

por debajo del panel solar, para evitar problemas de vandalismo y robos.

El diseño propuesto permite refrigerar y mantener el acumulador y la electrónica en un rango de temperatura de operación apropiada por medio del aprovechamiento de la sombra del panel solar, la aislación térmica del gabinete y por un sistema de branquias que extrae el calor del mismo. Las dos branquias se ubican en los laterales y a diferentes niveles del gabinete, permiten la circulación natural de aire, evacuando de este modo el calor generado por los componentes del sistema.

Esquema general del sistema

La figura 7 muestra el diagrama de bloque de los distintos subsistemas que forman parte del sistema de iluminación propuesto. Se indica el sentido en que interactúan los elementos representados. Se puede observar en la misma figura que el panel fotovoltaico hace de celda de encendido y apagado del sistema ante la ausencia y presencia de luz, respectivamente.

El control de todo el sistema se realiza a través de un algoritmo que se ejecuta y almacena en el dispositivo Arduino, en el instante de encendido del equipo de iluminación (interruptor on/off). La primera acción que realiza es desconectar el regulador de corriente (driver led), para luego analizar el estado de carga de la batería y el nivel de tensión del panel fotovoltaico. Es posible que se presenten las siguientes combinaciones o alternativas:

- a. Nivel de carga de batería bajo, panel fotovoltaico activado (soleado): lámpara apagada

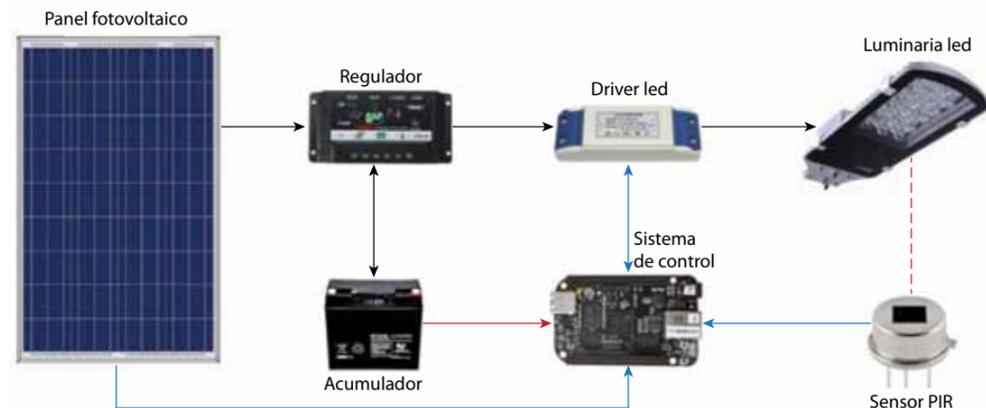


Figura 7. Diagrama de bloque del sistema de iluminación propuesto

- b. Nivel de carga de batería bajo, panel fotovoltaico desactivado (noche): lámpara apagada
- c. Nivel de carga de batería bajo, panel fotovoltaico desactivado (nublado): lámpara apagada
- d. Nivel de carga de batería normal, panel fotovoltaico desactivado (noche): lámpara encendida
- e. Nivel de carga de batería normal, panel fotovoltaico activado (sol): lámpara apagada
- f. Nivel de carga de batería normal, panel fotovoltaico desactivado (nublado): lámpara apagada

De acuerdo al análisis anterior, en caso de encender la lámpara (combinación "d"), el sistema de control en primer lugar debe verificar el detector de movimiento; si este indica la presencia de movimiento dentro del rango permitido, el microcontrolador envía una señal para activar el modulo led a su máxima potencia (100%), en caso contrario la potencia se reduce a la mitad (50%).

Desde el instante en que se activa el sistema de iluminación, y durante todo el funcionamiento, el sistema de control (Arduino) tiene como tarea principal analizar el nivel de carga de la batería y proporcionarle el faltante necesario por medio del panel fotovoltaico, a los efectos de alcanzar el máximo aprovechamiento de la batería.

Especificaciones y resultado

Especificaciones

Para realizar el dimensionado del sistema de iluminación propuesto, se parte de la premisa de obtener con el sistema un flujo luminoso de unos 2.200 lúmenes durante unas 7,5 horas. Este tendrá el consumo máximo solo durante las tres primeras horas de encendido y luego, por instantes, en presencia de personas o mascotas. El resto del tiempo, el flujo luminoso y el consumo se reduce a la mitad.

Diseño de la luminaria

Se propone desarrollar la luminaria por medio de un módulo led comercial de 18 watts de potencia nominal, ya que esto cumple con los requisitos mencionados. Sus características son: potencia nominal de 18 watts, flujo luminoso de 2.200 lúmenes, vida útil de 50.000 horas, eficiencia luminosa de 120 lúmenes por watt, ángulo de iluminación de 120 grados y altura óptima cuatro a seis metros. El módulo led consta de 18 chips led de un watt cada uno, montados sobre una placa de circuito impreso de aluminio y un lente óptico de acrílico de alta transmitancia para controlar y direccionar la luz. La gestión térmica de los leds se realizará por medio de un disipador de aluminio en forma de aleta [4].

Se prevé que el módulo led, la lente óptica, el disipador de aluminio y el driver de corriente vayan montados dentro de una carcasa metálica con protección



Figura 8. Componentes principales para implementar la luminaria led

IP 67 (figura 8), que permita protegerlos de las inclemencias del tiempo.

Dimensionado del sistema fotovoltaico

Para estimar el consumo se tendrán en cuenta el tiempo y los consumos. Se conoce que el módulo led es de 18 watts; se precisan, además, 300 miliwatts para el Arduino y otros 300 miliwatts para el subsistema de detección infrarroja. En la tabla 1 se estima el consumo medio diario que tendrá el sistema.

Para dimensionar el panel fotovoltaico, se considera la radiación solar media diaria del mes crítico (junio, hemisferio sur) a una inclinación del panel igual a la latitud del emplazamiento más diez grados. Se debe, también, considerar las pérdidas en el panel fotovoltaico (por suciedad) y en todo el sistema, por ello se toma un margen de seguridad que contemple lo anterior de 20 por ciento. Las horas solares pico (HSP) para la inclinación óptima de Santiago del Estero se obtuvo por medio de la página web de NASA, con un valor de 4,2 horas para el mes de junio. La siguiente expresión muestra el cálculo de la potencia pico que debe tener el panel [6, 7]:

$$P_{pk} = (1,2 \times E_d) / (HSP \times \eta_g) = (1,2 \times 155) / (4,2 \times 0,85) = 52 \text{ W}$$

P_{pk} : potencia pico nominal del panel fotovoltaico

Carga	Potencia	Tiempo	Energía
Módulo led	18 W	7,5 h	135 Wh/día
Arduino	0,3 W	24 h	10 Wh/día
Sensor PIR	0,3 W	24 h	10 Wh/día
Total			155 Wh/día

Tabla 1. Estimación del consumo diario del sistema

E_d : consumo de energía diario medio del sistema
 HSP : cantidad de horas de sol (a 1.000 W/m²) mes de junio
 η_g : factor que contempla las pérdidas en panel fotovoltaico

En base al resultado computado, se selecciona un panel fotovoltaico de tecnología policristalina de una potencia pico nominal de 55 watts y una eficiencia de 16,5 por ciento.

A partir del consumo máximo estimado de 155 watts-hora por día, la tensión nominal del sistema y la autonomía (dos días), se puede establecer la capacidad de la batería para suministrar la energía necesaria a la carga (módulo led); entonces, la capacidad del acumulador viene dada por [6, 7]:

$$CB = (E_d \times N) / (V_N \times P_d) = (155 \times 2) / (12 \times 0,8) = 43 \text{ Ah}$$

CB : capacidad de la batería

N : días de autonomía

P_d : profundidad de descarga de la batería

V_N : tensión nominal de sistema

En base a lo calculado, se selecciona una batería sellada y libre de mantenimiento (AGM) de una capacidad de 55 Ah/12 V que soporte un régimen de descarga C_{20} .

Para determinar la capacidad del regulador de carga se debe considerar la máxima intensidad que aporta el panel fotovoltaico de 30 watts:

$$I_R \geq 1,2 \times (P_N / V_{pmp}) = 1,2 \times (55 / 18,5) = 3,6 \text{ A}$$

P_N : potencia pico nominal del panel fotovoltaico

V_{pmp} : tensión del punto de máxima potencia

Cantidad	Descripción
1	Panel fotovoltaico policristalino 55 watts
1	Batería AGM 55 Ah/12 V
1	Módulo led de 18 watts
1	Regulador de carga PWM de cinco amperes
1	Driver dimmer de tres amperes

Tabla 2: Componentes requeridos para el sistema de iluminación

El regulador de carga debe ser capaz de manejar una corriente de al menos de 3,6 amperes, por lo que se opta por valor normalizado de cinco amperes.

Finalmente, la tabla 2 muestra los componentes que se requieren para implementar el sistema de iluminación integrado y autónomo que se propone en este trabajo.

Conclusiones

Con el sistema de iluminación adaptativo y solar se busca brindar una solución en áreas rurales de población dispersa de la provincia de Santiago del Estero, u otras, donde hay servicio de energía eléctrica. El equipo aprovecha e incorpora de forma sinérgica dos tecnologías compatibles, maduras y en constante desarrollo, la solar fotovoltaica y los sistemas de iluminación de estado sólido (LED). La refrigeración del sistema se consigue, por una parte, a través de dos branquias en los laterales del gabinete, que permiten evacuar de forma natural el calor generado por sus componentes, y por otra, por la ubicación que aprovecha la sombra del panel. En general, sus características son tales que permiten que se aproveche al máximo la energía eléctrica solar disponible y de funcionar correctamente con temperaturas altas. Se pretende obtener un equipo autónomo optimizado en potencia y tamaño que produzca una iluminación de excelente calidad con un flujo luminoso al cien por ciento durante las primeras tres horas de operación nocturna, luego pase a modo detección con un consumo de cincuenta por ciento, pudiendo activarse al cien por ciento ante la presencia de objetos o personas en movimiento. ❖

Referencias

- [1] Villalba G., Cadena C. (2015), *Sistema de iluminación inteligente y autónomo*, Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 3, pp. 08.375-08.384, 2015
- [2] Fernández F., Rodríguez R., Juárez C. (2015), "Influencia de la temperatura en la tensión de circuito abierto de una celda fotovoltaica de silicio policristalina" en *X Jornada de Ciencia y Tecnologías de Facultades de Ingenierías del NOA*, Salta, Pág. 432
- [3] Baltazar V., Valverde G., Valdez L., Ramírez J. (2013) "Sistema fotovoltaico de iluminación solar", en *Epistemos 15*, Año 7, págs. 86-92
- [4] Secretaría de Energía, Especificación Técnica para la adquisición de luminarias de Alumbrado Público con Led. PRONUREE
- [5] Goswami Yogi (2000), *Principles of Solar Engineering*, Taylor & Francis, Filadelfia
- [6] Luque, A., Hegedus, S. (2003), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons
- [7] *Photovoltaic Systems Research & Development*, Sandia National Laboratories (2007)
- [8] NASA (2018), "Base de dato meteorológica satelital", en <https://eosweb.larc.nasa.gov> (última consulta 20/01/2018)
- [9] Wikipedia Enciclopedia de contenido libre, en <https://es.wikipedia.org> (última consulta 01/09/2018).
- [10] Martínez, J (2013), "Evolución de los precios de la energía solar fotovoltaica y la paridad de red", en <http://www.eoi.es/blogs/meerron/2013/01/21/evolucion-de-los-precios-de-la-energia-solarfotovoltaica-y-la-paridad-de-red/>
- [11] Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (1991), *Solar energy of thermal processes*, John Wiley & Sons