



Análisis, diseño y cálculo de la instalación de un alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos en un cultivo de patata

Antonio Rodríguez Nicolás, Francisco J. Cánovas Rodríguez, Dolores Parras-Burgos y José Miguel Molina-Martínez.
Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia. josem.molina@upct.es

XIII Congreso Ibérico de AgroEngharia - XIII Congreso Ibérico de Agroingeniería 21-23/07/2025

Resumen: La creciente necesidad de optimizar los recursos energéticos en el sureste de España ha impulsado el desarrollo de sistemas "agrovoltaicos", que integran la producción agrícola con la generación de energía eléctrica. Nuestro innovador modelo presenta una estructura elevada de 4,2 metros, que permite instalar paneles fotovoltaicos móviles sobre los cultivos sin interferir en las labores agrícolas. Estos paneles se ajustan regulando la cantidad de luz natural recibida, complementándose con un sistema de iluminación LED cuando sea necesario. Las luminarias, en forma de campana, han sido seleccionadas para proporcionar la intensidad lumínica óptima para los cultivos de la patata en cada etapa de su desarrollo, adaptándose a las demandas de luz de cada fase fenológica. Se utiliza el software DIALux Evo para la planificación y cálculo de la distribución lumínica, finalmente se ha dimensionado el sistema con lámparas de 50W y 6000 lúmenes. Estas luminarias pueden encenderse y apagarse de manera alternada, sincronizadas con el ajuste de las placas solares, para asegurar que se cubran las necesidades lumínicas máxima de la patata que están en torno a $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. De este modo, se garantiza que los cultivos reciban siempre la cantidad adecuada de luz, complementándose esta luz aportada con la proporcionada de manera natural por el sol.

1. Introducción

En este trabajo se presenta el **diseño y cálculo de un sistema de alumbrado adaptado a una estructura agrovoltaica** de 4,5 metros de altura, que permite el paso de maquinaria agrícola sin interferencias. La instalación consta de una cubierta a dos aguas con 36 módulos fotovoltaicos en cada lado, de los cuales la mitad son móviles. Estos módulos pueden desplazarse en grupos de tres, regulando la cantidad de luz natural que recibe el cultivo según sus necesidades fenológicas. En la Figura 1, se muestra la estructura abierta totalmente en una de sus aguas (1.a) y representación inferior de la estructura (1.b).

El **objetivo principal** es la de diseñar una instalación de alumbrado artificial basado en iluminación LED que, en función del:

- ✓ Aporte de luz natural existente, y
- ✓ de las necesidades que pueda requerir nuestro cultivo,

Posibilite que el aporte de esta instalación de alumbrado en nuestro cultivo, sea tal, que **suplemente al existente por la luz natural**, de forma que nuestro cultivo reciba el aporte "ideal" de luz, atendiendo a los parámetros de cantidad de luz y espectro de luz que se emita sobre nuestro cultivo.

Para la **consecución de este objetivo principal, se debe tener en cuenta de que** se parte de un sistema cuyo fin primordial es gestionar el movimiento de los paneles para maximizar tanto la producción de energía como la calidad del cultivo. En dicho sistema se prevé tres niveles de apertura de los módulos, lo que genera variaciones en la luz disponible en determinadas zonas del cultivo. Nuestras luminarias serán controladas mediante microcontroladores

Es fundamental considerar, que esta variación no viene dado sólo por

- ✓ La apertura artificial que se está generando en el techo de nuestra estructura,
- ✓ Y también por la inclinación o incidencia de los rayos solares sobre nuestra estructura, muy dependiente del momento del año, así como de la hora en cada día.

Todo esto sin tener en cuenta, situaciones puntuales como podría ser días nublados.

En el presente caso a estudio se pretende **garantizar un crecimiento óptimo** del cultivo con un sistema de iluminación **con luminarias LED estratégicamente distribuidas con marcado carácter comercial -fácilmente accesible- y económico -de bajo costo por unidad-**, estas consideraciones han dificultado la consecución de los niveles de iluminación y de espectros ideales para nuestro cultivo, pero finalmente se han conseguido.

Todo esto su justifica por el hecho de que **las lámparas específicas** para uso en invernaderos y estructuras cerradas **se caracterizan por un precio y consumo muy alto.**

Se ha asegurado la viabilidad económica de la instalación, haciendo que la propuesta sea rentable y sostenible a largo plazo en el sector hortícola en general, y en particular, en el cultivo de la patata.

4. Conclusión

- En síntesis, se obtiene un modelado que **genera las necesidades máximas requeridas por nuestro cultivo de patata**. Habiendo fijado como techo los 900 lux máximos requeridos, y con capacidad de regulación a aproximadamente a la mitad fácilmente, lo cual supone aproximadamente $380 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [8], suplementados correctamente con una disposición de 4 luminarias encendidas de las 7 luminarias existentes por cercha, ilustrado en la Figura 2.b.
- Cabe destacar que este diseño **está pensado para aportar íntegramente los requerimientos lumínicos** de la planta propuesta, pero en la aplicación de campo, todo este sistema va a **tener especialmente una función complementaria a los aportes lumínicos naturales** provenientes desde el sol. Ya que en ciertos momentos las placas se solaparán alternativamente, permitiendo el paso de radiación solar. Dejando a su vez zonas sombreadas, en las que las lámparas añadirán esa energía restante.
- Con respecto a aquellos aspectos relacionados **el consumo energético y la eficiencia lumínica**, y por ende, aquellos relacionados con la viabilidad de la instalación. Hay que indicar que, encontrar fuentes lumínicas que cumplieras las restricciones de longitudes de onda, potencia y precio, no fue tarea simple entre las soluciones comerciales existentes.
- Con respecto a posibles **líneas de futuro**, es importante indicar que, las posibilidades de implantar este tipo de instalaciones de alumbrado, va a mejorar en la medida que las tecnologías de la iluminación -básicamente LED actualmente-, mejoren en aspectos relacionados con el costo económico de nuestras luminarias y del consumo que hoy por hoy tiene cada una de estas luminarias, ya que la capacidad de regulación presente en las mismas está muy lograda a fecha de hoy. En definitiva, el siguiente paso **sería automatizar el sistema, con sensores, cámaras y actuadores**, para que la iluminación artificial sea regulada para optimizar al máximo nuestra instalación, en los aspectos energéticos y de crecimiento de nuestros cultivos.

Contact

Antonio Rodríguez Nicolás / José Miguel Molina-Martínez
Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar
Email: antonio.rodriguez@edu.upct.es / josem.molina@upct.es

2. Materiales and Métodos

2.1. Punto de partida.

En primer lugar, se diseñará la estructura, donde se instale nuestra instalación fotovoltaica "movible", y la iluminación, y el cultivo de referencia, aspecto fundamental para definir la intensidad lumínica y espectro necesario en cada momento. La parcela de referencia es de $13,5 \times 12,8$ m, cultivada con patatas.

La **zona de estudio de nuestra parcela de referencia será la formada por la superficie central de dicha estructura**, con esta consideración lo que se consigue es minimizar los efectos border -frontera-, es decir, minimizar los efectos medio ambientales especialmente existentes en la zona cercana a los laterales de nuestra estructura, consiguiendo con esto que los resultados del estudio sean extrapolables a la de una estructura agrovoltaica de mucha mayor superficie

2.2. Software utilizado.

Se elige como referencia el DialuxEVO 13, para el modelado y simulación de nuestra instalación de alumbrado.

2.3. Dimensionado.

Revisando bibliografía se determinará que la luz máxima demandada por algunas variedades de patata puede ascender hasta $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, por lo que se tomará como referencia de diseño el valor de $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

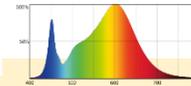
Teniendo en cuenta que el programa tomado como referencia DialuxEVO, nos da los niveles de **iluminación en lux**, y que los parámetros que definen las necesidades lumínicas de nuestro cultivo viene dado en $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, se utilizará el **procedimiento de Sipsos [8]**, que permite **estimar el factor de conversión de lux a partir de $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$**

$$PPFD = \int_{430}^{700} \Phi(\lambda) \cdot AS(\lambda) d\lambda = \sum SPD_i \cdot AS_i \quad f_c = \frac{\sum (SPD_i \cdot AS_i)}{\sum SPD_i} \approx 0,76$$

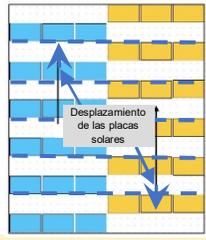
Aplicando dicho procedimiento se observa que el valor de los luxes necesario serán aproximadamente 900 lux, para abastecer al cultivo de patata en su totalidad.

Tras una amplia búsqueda entre los fabricantes, se obtuvo finalmente **con un consumo limitado, coste bajo y temperatura de color (IRC) de 3000 o 4000K**, se escoge como opción óptima una luminaria con forma de campana, y cuyas características técnicas se reflejan en la tabla siguiente, tal y como se abordará en el siguiente apartado.

Característica	Valor
Potencia LED	50W ±1%
Luz de 4800 lux	CCT (3000K + 4000K + 6000K).
Eficiencia luminaria	120 lm/W
Luminosidad (l.m)	6.000 ± 5%

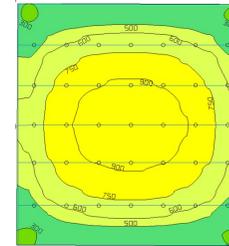


Disposición lateralmente abierta de los módulos en cada lado - figura superior-; vista inferior de dicha configuración (abajo)

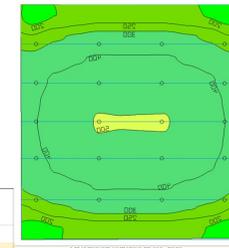


Detalle en planta del sistema de placas, su desplazamiento y localización de las cerchas que tendrán nuestras luminarias

Cerchas sobre las que se apoya la iluminación



Distribución lumínica en lux, para 7 lámparas encendidas por cercha



Luz máxima necesaria en lux, para 4 lámparas encendidas por cercha

3. Resultados

Se procede a la modelización en DialuxEVO, en nuestra estructura de partida, que consta de 5 cerchas expresamente colocadas para la iluminación.

Tras valorar diversas disposiciones sobre las limitaciones definidas, **se define a una disposición de 7 luminarias por cercha**, obteniendo así la distribución lumínica reflejada en la figura 3.a en lux. Con esta disposición se **cubre la situación más desfavorable**, que sería aquella que se produce cuando el aporte de luz natural sea nula o casi nula. Como se comentó **ese nivel medio, es del orden de 900 lux** era equivalente a los $680 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, que se necesitan como máximo.

Por **control del apagado y encendido de las correspondientes luminarias**, se conseguirá un aporte de luz artificial que busque complementar la posible luz natural insuficiente, de forma que como se muestra en la figura 3.b, un simple apagado alternado de nuestras luminarias de cada cercha, pasando cada cercha de 7 a 4 luminarias, consigue un nivel de iluminación máximo de la mitad.

En el presente trabajo nuestro **sistema de control estará basado en apagados y encendidos de luminarias**, ya que las luminarias elegidas finalmente no tienen regulación del flujo luminoso, y a partir de las lecturas de PAR de la cantidad de luz que llega a nuestro cultivo, para conseguir que el nivel de luz que llegue al cultivo esté lo más cercano en cada momento (fotoperiodo) a su valor ideal.

Para los cálculos se considera una **altura de cultivo máxima** de 20 cm y una altura desde el suelo a la cercha de 4,20 m (distancia de la luminaria a la planta de 4 m.)