



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Desarrollo de un sistema de cultivo
sostenible mediante tecnología LED e
Impresión 3D.**

Autor:

Martín Rodríguez, Alejandro Tobías

Tutor:

**Mansilla Gallo, Alberto
CMeIM/EGI/IM/IPF**

Valladolid, Julio 2020.

RESUMEN

En los últimos años, ha surgido una corriente de ciudades sostenibles, que trata de aplicar una gestión respetuosa con el medio ambiente promoviendo el uso de energías limpias, la reutilización, el reciclaje y el aumento de huertos urbanos o maceto-huertos.

Este proyecto busca plasmar las ideas anteriores realizando un prototipo de sistema led con espectro específico para la fotosíntesis, usando excedentes de energía solar para alimentar el sistema led y así cultivar de manera sostenible en bancales o maceto-huertos. También se realizará un prototipo de maceta led impresa en 3D usando materiales reciclados.

Además, buscamos que estos prototipos se usen dentro de 'hortoterapias' con personas mayores o de otras edades para crear conciencia ambiental. También aprovecharemos el proceso de fabricación y montaje de las macetas impresas, en talleres para personas en centros de reinserción como parte de un proyecto social.

PALABRAS CLAVE

Led, espectro, fotosíntesis, eficiencia, impresión 3D.

Índice

1	Introducción y objetivos.....	7
1.1	Ámbito de trabajo. Iluminación artificial.....	7
1.2	Objetivos	7
1.3	Estructura del documento	7
2	Clasificación y características de los leds.....	9
2.1	Introducción a los leds.....	9
2.1.1	Historia.....	9
2.1.2	Principio de funcionamiento y simbología led.....	11
2.1.3	Parámetros clave en uso de leds.....	14
2.2	Clasificación de los leds en función de la potencia.....	15
2.2.1	Led de baja potencia	15
2.2.2	Led de media potencia.....	16
2.2.3	Led de alta potencia.....	17
3	Horticultura Led.....	21
3.1	Luz artificial y fotosíntesis.....	21
3.2	Conceptos para cuantificar la radiación fotosintética. Valores típicos..	24
4	Diseño del sistema led.....	27
4.1	Concepto inicial.....	27
4.2	Búsqueda y selección del led adecuado.....	27
4.3	Diseño parte eléctrica y fuente de alimentación.....	30
4.4	Cálculo térmico y dimensionado del disipador.....	33
5	Ensamblaje, calibración y ajuste del sistema.....	39
5.1	Ensamblado del prototipo.....	39
5.1.1	Materiales y herramientas utilizadas.....	39
5.1.2	Montaje.....	40
5.2	Instrumentos y equipo empleado en las pruebas.....	42
5.3	Medición de la radiación fotosintética activa.....	43
5.3.2	Toma de datos.....	43
5.3.2	Conclusiones del ensayo.....	45
5.4	Gestión térmica. Test de temperatura.....	45
5.4.1	Toma de datos.....	45

5.4.2 Conclusiones del ensayo.....	49
6 Estudio viabilidad de energía solar	51
6.1 Ejemplo de estudio.....	51
6.2 Conclusiones.....	54
7 Maceta 3D FDM Led	55
7.1 Introducción.....	55
7.2 Objetivos	55
7.3 Impresión 3D MDF.	55
8 Caracterización térmica de mezcla PLA-Cobre	57
8.1 Materiales	57
8.2 Toma de temperaturas ,cálculos y conclusiones.	58
9 Caracterización de la estructura interna de impresión	63
9.1 Porosidad en impresiones 3D	63
9.2 Ensayo y solución propuesta	63
10 Desarrollo parte eléctrica y elección del led	69
10.1 Concepto inicial.....	69
10.2 Búsqueda y selección del led adecuado.....	69
10.3 Diseño parte eléctrica y fuente de alimentación.....	74
10.4 Dimensionado del disipador.....	76
11 Diseño 3D, prototipos, ensamblaje y ajustes.....	77
11.1.1 Versión 1.0.....	77
11.1.2 Versión 1.1.....	78
11.1.3 Versión 2.0.....	79
11.2 Ensamblaje del led	79
11.2.1 Materiales y herramientas utilizadas.....	79
11.2.3 Ensamblaje.....	80
11.3 Ajustes	80
12 Conclusiones	81
13 Líneas de futuro	83
Bibliografía.....	85

1 Introducción y objetivos

1.1 Ámbito de trabajo. Iluminación artificial.

Con el paso del tiempo, la tecnología led ha avanzado hasta tal punto de encontrar chips con eficiencias cercanas al 70 % y potencias superiores a 100 vatios. Éstas mejoras, unidas a la posibilidad de confeccionar un espectro casi a medida, hace que cada vez se usen más los leds en la horticultura.

1.2 Objetivos

Nuestro trabajo tiene cuatro objetivos:

1. Diseño y fabricación de un prototipo de luminaria led, con un espectro adecuado para la fotosíntesis. El espectro elegido, saldrá del estudio de los principales pigmentos de las plantas y su respuesta frente a las distintas longitudes de onda.
2. Diseño y fabricación de un prototipo con impresión 3D, de una maceta que incluya un led para poder cultivar una planta en ella. Tratando de imprimir todas las partes de la maceta, o alcanzar una solución para disipar el calor y los problemas de porosidad de las impresiones.
3. Hacer el trabajo lo más sostenible posible, mediante el uso de materiales reciclados en los filamentos de impresión y el uso de leds más eficientes. También intentando aprovechar excedentes de producción solar para alimentar los leds.
4. Conseguir una labor social mediante el uso de bancales de cultivo en 'hortoterapia' con personas mayores. Usar el proceso de fabricación y ensamblaje de la maceta impresa, como una especie de talleres para personas en centros de reinserción.

1.3 Estructura del documento

- Capítulo 1: Introducción y objetivos.
- Capítulo 2: Clasificación y características de los leds. Introducción al mundo de los leds y conceptos relacionados con el tema. Breve clasificación en función de la potencia del led.
- Capítulo 3: Horticultura led.

Explicaremos los conceptos claves que nos servirán para elegir un led con el espectro adecuado.

- Capítulo 4: Diseño del sistema led.
Explicación del proceso de búsqueda y selección del led adecuado en función de nuestro objetivo. Además de la selección de una fuente de alimentación adecuada.
- Capítulo 5: Ensamblaje, calibración y ajuste del sistema.
Centrado en la medición de la radiación sobre un área experimental. También se presentan los equipos usados y su funcionamiento.
- Capítulo 6: Estudio sobre la viabilidad de la energía solar en el proyecto.
- Capítulo 7 Maceta 3D FDM led.
Introducción a esta parte centrada más en la impresión 3D.
- Capítulo 8: Caracterización térmica de mezcla PLA-Cobre.
Estudio de los filamentos disponibles para disipar calor.
- Capítulo 9: Caracterización de la estructura interna de impresión.
Analizamos la estructura resultante para adecuarla a nuestras necesidades
- Capítulo 10 Diseño del sistema led.
Procederemos de forma análoga al capítulo 4
- Capítulo 11 Diseño y fabricación.
Se expondrá el diseño elegido y las etapas de fabricación.
- Capítulo 12 Conclusiones.
- Capítulo 13 Líneas de futuro.

2 Clasificación y características de los leds.

2.1 Introducción a los leds.

En este capítulo se hará una introducción al mundo de los leds y se familiarizará con la terminología relativa a estos.

La palabra 'led' hace referencia a 'diodo emisor de luz'. Un diodo es un material semiconductor. El led es un diodo de unión p-n, que frente al paso de una determinada corriente desprende fotones ¹. Este efecto se conoce como electroluminiscencia. Los colores de emisión pueden ser varios y dependen de la brecha energética entre la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción, por tanto el color depende del material que esté formado el diodo ².

Existen leds que emiten desde menos de 300 nm hasta más de los 800 nm, por tanto superan el espectro visible por los humanos.

Los primeros leds, debido a su débil poder '*output*' lumínico, sólo se utilizaban en sistemas de control remoto (infrarrojo) o como pilotos indicadores en circuitos eléctricos (interruptores con un pequeño led indicador).

Hoy en día el led tiene mayor campo de aplicación; desde pantallas de televisores y de teléfonos, iluminación domestica e industrial, faros de vehículos. Hasta campos como la medicina, nanotecnología o computación cuántica.

2.1.1 Historia

Como este trabajo gira en torno a leds para su uso en iluminación, nos centraremos en la parte histórica referente al descubrimiento e inicio de este tipo de leds.

Todo comienza con el descubrimiento del efecto electroluminiscente por parte de Henry Joshep Round (británico) en 1907, pero no fue hasta 1927 cuando se documenta la fabricación del primer led por parte de Oleg Losév (soviético). Pasa desapercibido hasta que entre 1951 y 1953, Kurt Lehovec, Carl Accardo y Edward Jamgochian siguen los pasos de Oleg y consiguen replicar su led aplicando a unos cristales de carburo de silicio una corriente en impulsos ³.

Primer led infrarrojo:

¹ (RAE, 2014)

² Ivan Moreno and Ching-Cherng Sun, 'Modeling the Radiation Pattern of LEDs', *Optics Express*, 2008 <<https://doi.org/10.1364/oe.16.001808>>.

³ (Round & Round, 1907)

A mediados de los años cincuenta Rubin Braunstein, documenta la emisión en el espectro infrarrojo por parte de leds hechos con arseniuro de galio (GaAs), antimonio de galio (GaSb), arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de indio (InP) y silicio-germanio (SiGe). Este tipo de led se utilizó en el campo de las comunicaciones ópticas ⁴.

Ya en 1962, la empresa Texas Instruments, fabrica el primer led comercial infrarrojo de 890 nm. Este led se basaba en cristal puro de arseniuro de galio (GaAs) y su nombre comercial era 'SNX-100'⁵.

A finales de los años sesenta, los leds rojos basados en fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP), comienzan a abrirse hueco en el mercado como leds indicadores, esto de la mano de dos empresas; Monsanto Company y Hewlett-Packard ⁶.

Primer led azul:

El desarrollo de los leds azules comienza en 1972 de la mano de Henry Paul Maruska, usando nitruro de galio (GaN) sobre un sustrato de zafiro.

Estos primeros leds azules no eran muy brillantes hasta que la empresa Nichia Corp. de la mano de Shuji Nakamura, comercializa un led azul de alto brillo basado en nitruro de galio-indio (InGaN). Estudios acerca del nitruro de galio sobre sustratos de zafiro desarrollados por el propio Nakamura y en paralelo por Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, llevaron a la consecución del premio Nobel de Física ya en 2014 ⁷.

Los avances en el desarrollo de cristales de nitruro de galio en silicio posibilitaron la creación de nuevos leds azules de alta potencia. Un ejemplo son los actuales leds azules de la gama 'Golden Dragon' de Osram, basados en nitruro de galio-indio sobre sustrato de silicio ⁸.

Led blanco:

Tras el desarrollo de los primeros leds azules de alto brillo, llegaron los primeros leds blancos, que básicamente son leds azules con un recubrimiento de fósforo. Actualmente están sustituyendo a toda clase de sistemas de iluminación debido a su alto 'output' lumínico, llegando a encontrar en el mercado leds blancos de más de 200 lúmenes por

⁴ Herbert Kroemer, 'The Double-Heterostructure Concept: How It Got Started', *Proceedings of the IEEE*, 2013 <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2274914>>.

⁵ W. N. Carr and G. E. Pittman, 'One-Watt GaAs p-n Junction Infrared Source', *Applied Physics Letters*, 1963 <<https://doi.org/10.1063/1.1753837>>.

⁶ E. Fred. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, 2003).

⁷ (Nannini, 2014)

⁸ (Osram, 2012)

vatio ⁹. Este led sigue en continuo desarrollo debido a su uso masivo en iluminación.

2.1.2 Principio de funcionamiento y simbología led.

El led, que como dijimos sus siglas vienen de “diodo emisor de luz” (que es una traducción de “*Light-Emitting Diode*”), emite luz frente al paso de una determinada corriente y esa luz dependerá del material que conforma el led como vimos en el apartado anterior.

La unión P-N al polarizarse en directa (polo positivo de la fuente a la zona P y el negativo a la zona N), los electrones de la región N cruzan la barrera potencial y se recombinan con los huecos de la región P. Los electrones se encuentran en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia. Como la energía de los huecos es inferior al de los electrones, al recombinarse los electrones-huecos, una parte de la diferencia de energía se emite en forma de luz y el resto en forma de calor ¹⁰.

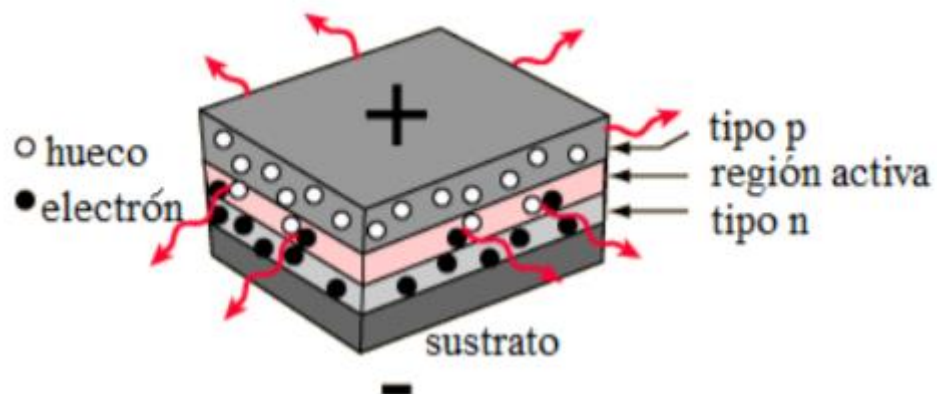


Figura 2.1 Regiones de un semiconductor¹¹.

Según la teoría de bandas, la diferencia entre un aislante y un semiconductor es el tamaño de la banda prohibida, mucho mayor en el caso del material aislante.

⁹ (Samsung, 2018)

¹⁰ César Segura, 'PFC_cesar_segura_antunez', *Proyecto Final de Carrera*, 2014.

¹¹ Segura.

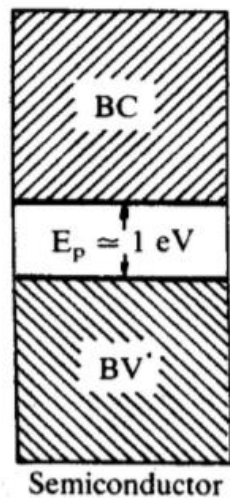


Figura 2.2 Banda de conducción y valencia¹².

Donde 'Ep' es la energía de banda prohibida y en los semiconductores (depende del tipo de material) toma valores cercanos a 1 eV (1 electrón por 1 voltio) que equivale a $1,602176462 \times 10^{-19}$ Julios.

Es necesario conocer la simbología del led para su correcta polarización en directa, por ello se muestra a continuación el símbolo del led.

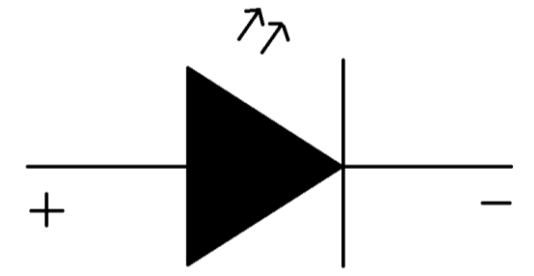


Figura 2.3 Símbolo led

¹² Segura.

A continuación se muestra una tabla resumen con los distintos colores, y tensión de trabajo en función del material composición del led:

Composición del chip	Nombre del compuesto	Color de la luz emitida	Tensión de trabajo en volt (V)	Frecuencia en hertz (Hz)	Longitud de onda en nm
GaAs	Arseniuro de galio	Infrarrojo	< 1,9	< 4,0 x 10 ¹⁴	> 760
GaAlAs	Arseniuro de galio y aluminio				
GaP	Fosfuro de galio				
GaAlAs	Arseniuro de galio y aluminio	± 1,8	4,8 - 4,0 x 10 ¹⁴	610 - 760	
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio				
GaAsP/GaP	Fosfuro de galio y arsénico / Fosfuro de galio				
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio	± 2,0	5,1 - 4,8 x 10 ¹⁴	590 - 610	
GaAsP/GaP	Fosfuro de galio y arsénico / Fosfuro de galio				
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio				
GaP	Fosfuro de galio	± 3,0	5,3 - 5,1 x 10 ¹⁴	570 - 590	
InGaN	Nitruro de indio y galio				
GaN	Nitruro de galio				
InGaN / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro	± 3,3	5,8 - 5,3 x 10 ¹⁴	500 - 570	
SiC	Carburo de silicio				
InGaN / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio	± 3,4	6,7 - 6,0 x 10 ¹⁴	450 - 500	
InGaN / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
InGaN	Nitruro de indio y galio				
GaN	Nitruro de galio	± 3,7	>7,9 x 10 ¹⁴	< 400	
Ce:YAG	Granate-aluminio-itrio, dopado de cerio				
		Ultravioleta	± 3,4	Espectro completo	Espectro completo

Figura 2.4 Color del led en función del material ¹³.

¹³ Segura.

2.1.3 Parámetros clave en uso de leds.

Los parámetros para que el led funcione y lo haga correctamente son los siguientes:

Tensión de funcionamiento: voltaje aplicado en directa (zona P al ánodo y N a cátodo), para leds individuales toma valor de 2 a 3 voltios.

Intensidad de corriente: Desde el orden de los 10 mA hasta los 4,2 A. La intensidad influye en la eficacia, a mayor intensidad menor eficacia y eficiencia.

Vida útil: Esta depende tanto de la calidad del led como de la temperatura e intensidad de funcionamiento. Para una vida útil dada, a intensidad nominal, si se aumenta la esa intensidad la vida disminuirá, la igual que si aumento la temperatura en la unión. La nomenclatura suele expresarse como por ejemplo 'L70B10 50000h', y nos dice que de una muestra de leds, transcurridas 50000 horas encendido, al menos el 90% de ellos mantendrán flujo mayor o igual al 70% del flujo inicial.

Ángulo de apertura del haz: La luz es direccional siempre con ángulos menores de 180°. Comúnmente desde los 15° en bajas potencias hasta 120-150° en potencias elevadas.

Longitud de onda: En los leds monocromáticos el color se expresa con su longitud de onda, abarcando desde 200 a más de 900 nm.

Temperatura del color: Un cuerpo negro, al ser calentado a una determinada temperatura, emite luz. Por eso la temperatura del color se define comparando su color con la luz que emite un cuerpo negro a una temperatura, esta temperatura se mide en Kelvin. Varía desde los pocos cientos hasta los miles.

Índice de reproducción cromática: O IRC es la manera de medir la capacidad que tiene un tipo de luz para mostrar los colores de forma real, tomando la luz natural (el sol) como referencia de medida, esto es así porque la luz solar contiene todos los espectros. Los valores van de 0 a 100. Una luz con IRC 100 reproduce los colores igual que la luz solar.

Lumen: En los leds blancos se usa el lumen como unidad de medida del flujo luminoso. El lumen (lm) equivale a una candela (cd) por estereorradián (sr)

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \times 1 \text{ sr} \quad (1)$$

Eficacia: En leds blancos se mide como los lúmenes que son capaces de producir por vatio consumido (lm/W). En leds monocromáticos la eficacia se mide en mili vatios (mW).

LER: 'Luminous Efficacy of Radiation' Es la eficacia que daría un led ideal en el que toda la energía se transformase en luz.

Eficiencia: En leds blancos la eficiencia se calcula dividiendo la eficacia (lm/W) entre la eficacia ideal que daría el led si no hubiese pérdidas de energía en forma de calor (LER). En leds monocromáticos se obtiene dividiendo la eficacia en mili vatios entre la potencia eléctrica en vatios.

2.2 Clasificación de los leds en función de la potencia.

En este apartado se hará una clasificación de los leds existentes en función de la potencia consumida y orientando dicha clasificación hacia la selección del led adecuado para el proyecto.

2.2.1 Led de baja potencia

Los leds de baja potencia son aquellos cuya potencia generalmente no alcanza los 0,2 W.



Figura 2.5 Led de 0,05 W encapsulado cilíndrico 4,8 mm.

Dentro de este rango podemos encontrar pequeños led de encapsulado cilíndrico de 1,8 a 4.8 mm de diámetro (figura 2.5), también rectangulares o cuadrados. Todos estos leds tienen en común que el ánodo y cátodo son dos patas fácilmente manipulables por un humano para su montaje, sin necesidad de máquina ensambladora. El encapsulado es de resina, generalmente epoxi, y solo tienen una celda o 'punto de luz'.

Encontrando ángulos de apertura de 15° a 60° generalmente.

El voltaje suele ser de 2,5 a 3 v y la intensidad de corriente no supera los 50 mA.

Debido a su escasa potencia no es necesaria su refrigeración.

Estos leds se usan, desde su inicio en los años sesenta, como piloto indicador en circuitos, para comprobar el correcto funcionamiento de estos. También se usan en sistemas de control remoto mediante leds infrarrojos.

Hasta la mejora del brillo los usos estaban limitados a los citados anteriormente, pero según aumentaba el brillo sus aplicaciones también lo hacían. Ahora se pueden encontrar en pequeñas luces de emergencia, linternas 'baratas', luces del interior de un vehículo, flash de un teléfono, etc.

Led SMD: desde baja a alta potencia.

Es conveniente dar una breve explicación de este tipo de leds, pues abarca un rango de potencia desde menos de 0,2 W a más de 5 W.



Figura 2.6 Led SMD 3030 'Samsung LM301b' ¹⁴

SMD hace referencia a '*Surface mount device*', es decir, este led está concebido para ser montado sobre un circuito impreso, pero el montaje lo realiza un brazo robotizado de precisión, pues las patas son muy pequeñas (figura 2.6).

Estos leds pueden estar compuestos por varias celdas o 'puntos de luz', depende del tamaño.

La nomenclatura siempre es 'SMD' más un número de 4 dígitos, los dos primeros hacen referencia al largo del led aumentado diez veces y los dos últimos al ancho aumentado diez veces, todo en milímetros. Así por ejemplo el led de la figura 2.6, SMD 3030, corresponde a un led rectangular de 3 mm de largo y 3 mm de ancho.

Este tipo de led se encuentra desde el flash del teléfono ya mencionado hasta bombillas led que podemos tener en casa.

2.2.2 Led de media potencia.

Comprenden el rango de 0,2 a 0,7 W aproximadamente.

¹⁴ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B'.

Aquí podemos encontrar leds de encapsulado cilíndrico pero de mayor tamaño que los de baja potencia, de 6, 8 y 10mm.

Ángulos de apertura de hasta 120°.

Pueden necesitar refrigeración, aunque su potencia no sea elevada, se concentra en una pequeña superficie y a veces es necesario añadir disipadores. Si es necesaria la refrigeración, el led tendrá una forma que facilite su acople a un disipador, mediante pasta térmica o un correcto contacto led-disipador.

El voltaje no pasa de 3,5 v y la intensidad no pasa de 200 mA.

Aquí entran los SMD de media potencia, cuyo uso se ha extendido en todo tipo de bombillas, focos, luminarias planas, tiras led, retroiluminación de televisores, faros etc. A día de hoy los leds blancos SMD son los más avanzados en cuanto a 'output' lumínico (en concreto el modelo de la figura 2.6), de ahí su uso extendido.

2.2.3 Led de alta potencia.

Llegamos a rango de potencia en el que se seleccionará el led para nuestro sistema.

Aquí encontramos leds de 0,7 W en adelante.

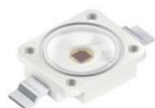


Figura 2.7 Led de 628 nm 'Golden dragon' Osram¹⁵.

Amplio rango de voltaje de 2 v a 110 v, igualmente para la intensidad de corriente que varía de 150 a 4200 mA.

Ángulos de apertura de hasta 140°, como ejemplo algunas versiones del led 'golden dragon' de la figura 2.7 con ese ángulo de apertura de luz.

El uso de disipadores es obligatorio pues en este caso la potencia crece en mayor medida que la superficie de disipación del led. En la mayoría de casos se opta por una disipación pasiva, pero a veces la potencia del led es tal que no queda más que recurrir a disipación activa, como en el caso del led de la figura 2.9 con una potencia de 500 vatios concentrada en una superficie de 38x38 mm.

¹⁵ OSRAM Opto Semiconductors, 'Lr W5sm', 001 (2018), 1-22.

Al igual que en el resto de potencias, encontramos leds de todos los colores. Con aplicaciones desde lámparas domésticas, grandes focos (campos de fútbol), farolas, invernaderos, etc.

En este apartado es conveniente introducir nuevo tipo de led como es el led 'Multichip'.

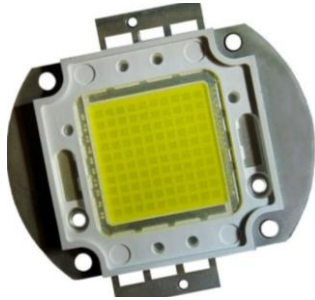


Figura 2.8 Led 100 W 'Multichip' genérico ¹⁶.

El led 'Multichip' (figura 2.8) está compuesto por una matriz cuadrada de células led, conectadas las filas unas a otras en paralelo y las columnas en serie. El voltaje tipo de estos leds suele ser de 30 a 36 v, con intensidades varias que van desde menos de 1 A a más de 3 A.

Dentro de esta categoría de leds 'Multichip' encontramos los leds conocidos como 'Chip On Board' o COB. Estos leds se componen de matrices led pero ya no tienen forma cuadrada sino que se agrupan de forma que todas las células led queden dentro de una circunferencia.

El COB es una versión más moderna y eficiente del led 'Multichip' y junto con los leds tipo SMD son los que más se están desarrollando en la actualidad. Debido al uso de materiales cerámicos en la base del led, la gestión térmica mejora y soportan temperaturas de trabajo mayores que cualquier otro led, ej.: Temperatura en la unión máxima de 150 °C en el caso de la figura 2.9.



Figura 2.9 Led COB Citizen clu058-3613 ¹⁷.

¹⁶ Shoptronica.com, 'LED MULTICHIP 100W', 2010 <www.shoptronica.com> [accessed 3 August 2019].

¹⁷ Citiled, 'CLU058-3618C4', 2017, 1-15.

Están orientados a luminarias usadas en sitios con altos requerimientos de iluminación. Los más eficientes ofrecen hasta 200 lúmenes por vatio consumido. Pudiendo encontrarse en color azul, púrpura, verde, rojo y en las distintas tonalidades de blanco.

En el caso de los leds '*Multichip*' el montaje es más sencillo que en el resto de leds, pues solamente necesita montarse al disipador y conectar los cables al ánodo y cátodo, por el contrario los otros leds necesitan montarse primero sobre un circuito impreso y después añadir el disipador y conexiones. Por tanto el uso de estos leds hace que se pueda prescindir de robots especializados o de mano de obra.

3 Horticultura Led.

La tecnología led se usa en horticultura de tres formas posibles:

1. Apoyo de la luz natural y así incrementar las cosechas en invernaderos.
2. Control del fotoperiodo añadiendo luz led cuando la luz natural no está disponible por razones estacionales.
3. Cultivo con luz artificial 100%.

Las luminarias pueden instalarse en la parte alta del invernadero o pueden ponerse entre las plantas a escasa distancia de ella, esto es posible porque el led no desprende tanto calor como desprenden los sistemas de alta presión de sodio.

3.1 Luz artificial y fotosíntesis.

El crecimiento en las plantas está influenciado por tres factores:

1. Cantidad de luz: la cantidad de luz afecta al proceso de fotosíntesis en la planta. La fotosíntesis es una reacción fotoquímica producida dentro de los cloroplastos de las células de las plantas, que son los que se encargan de transformar el CO_2 y H_2O en carbohidratos bajo la influencia de la luz.
2. Calidad de la luz: depende de la composición espectral de la luz, distintas longitudes de onda son importantes en el crecimiento, morfología y floración de las plantas. Las regiones influyentes son varias; ultravioleta, azul, verde, amarillo, rojo, rojo lejano e infrarrojo.
3. Fotoperiodo: Es la duración diaria de las horas de luz. En muchas plantas se puede controlar el inicio de la floración con la modificación del fotoperiodo. Por ejemplo las lechugas son plantas de día largo, que quiere decir que comenzarán a florecer cuando haya más horas de luz que de oscuridad (16 horas para ser exactos en lechugas), por tanto si queremos cultivar lechugas para consumo debemos tener en cuenta el fotoperiodo a aplicar para que la lechuga solo crezca y no florezca, pues la lechuga solo se come la hoja¹⁸.

Como hemos dicho la fotosíntesis es una reacción fotoquímica. Dentro de los cloroplastos se encuentran los pigmentos responsables de la reacción, estos pigmentos se conocen como clorofilas y existen cuatro tipos; a, b, c y d. Nos centraremos en la clorofila a y b puesto que son los principales pigmentos fotosintéticos. Además existen otros

¹⁸ www.osram.com, 'Horticulture Lighting with LEDs', November, 2016, 42.

pigmentos que no intervienen directamente en la fotosíntesis pero tienen otras funciones, a estos los conocemos como pigmentos accesorios.

- La **clorofila a** está directamente implicada en la reacción fotoquímica y absorbe luz del espectro violeta, azul y rojo principalmente, es de color verde oscuro pues refleja la mayoría de la luz verde (figura 3.1).
- La **clorofila b** no interviene en la reacción sino que se encarga de transmitir la energía absorbida al resto de clorofilas que están implicadas en la reacción. Por este motivo la clorofila b se considera un pigmento accesorio. Absorbe luz de la zona azul y rojo anaranjado (figura 3.1), por tanto refleja un color verde amarillento.
- Otros pigmentos, conocidos como accesorios, son los **carotenoides**, estos se encargan de absorber una gama más amplia del espectro y también tienen la función de deshacerse del exceso de energía luminosa absorbiendo ese exceso de energía y disipándola como calor. Estos pigmentos absorben luz azul y verde (figura 3.1), reflejando luz amarilla y naranja.

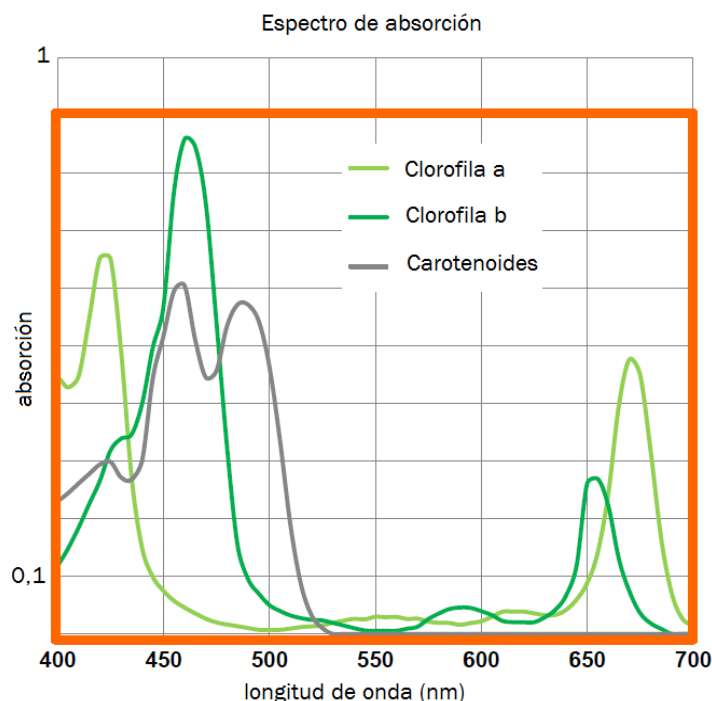


Figura 3.1 Espectro de absorción clorofila y carotenoides ¹⁹.

¹⁹ www.osram.com.

Dentro del grupo de los pigmentos existen unas proteínas que aunque no intervengan en la fotosíntesis se encargan de activar determinadas respuestas en las plantas, son tres principalmente y son los siguientes:

- **Criptocromo:** es fotorreceptor de la luz azul y ultravioleta (figura 3.2). Se encargan de mantener el ritmo circadiano y del fototropismo, es decir, se encargan de mantener las variaciones de las variables biológicas en un intervalo de tiempo y de la respuesta vegetal frente al estímulo luminoso (como es el movimiento de orientación de las hojas hacia la luz). También es influyente en germinación, expansión vegetativa, crecimiento radicular, apertura de estomas e inductor de floración²⁰.

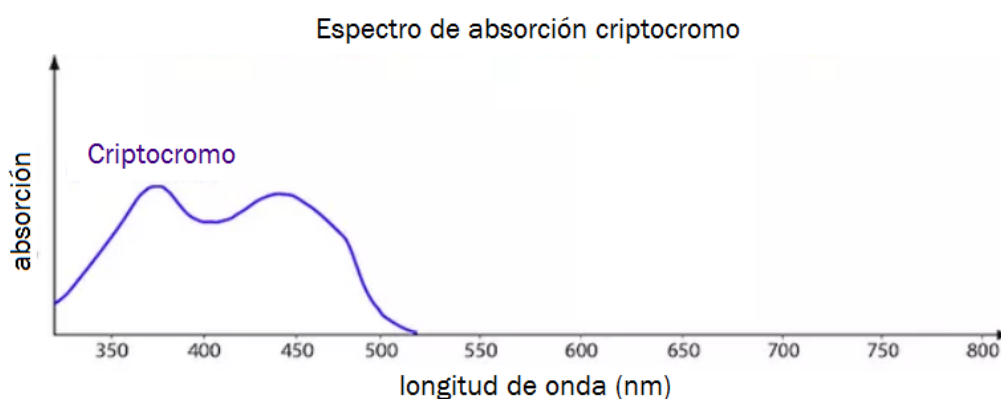


Figura 3.2 Espectro de absorción criptocromo²¹.

- **Fototropina:** también es fotorreceptor de luz azul y ultravioleta (figura 3.3). Influye en el fototropismo, estimula el estiramiento de tallos, apertura de estomas, expansión vegetativa y movimiento de cloroplastos (ante un exceso de luz los cloroplastos se ponen a la 'sombra' de otros cloroplastos para evitar la luz)²².

²⁰ LEDgrowLightsHQ, 'Chlorophyll & Other Photosensitives', 2015 <<http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>> [accessed 3 August 2019].

²¹ LEDgrowLightsHQ.

²² LEDgrowLightsHQ.

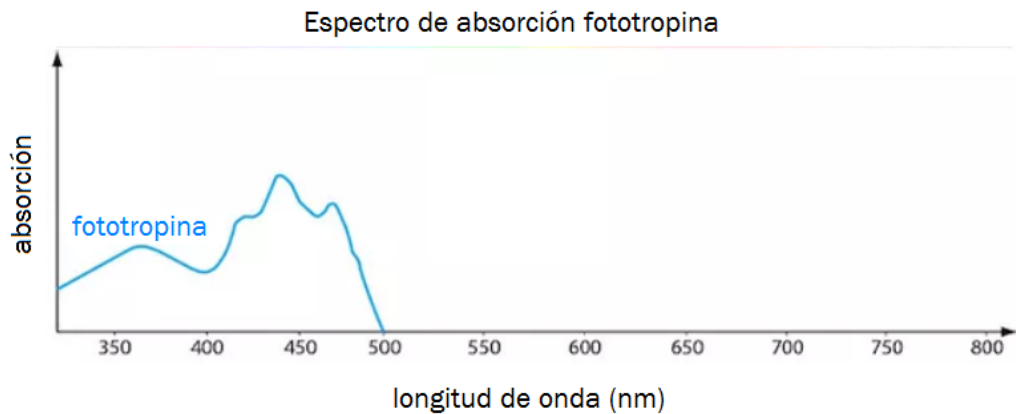


Figura 3.3 Espectro de absorción fototropina²³.

- **Fitocromo:** es fotorreceptor de luz roja y roja lejana (figura 3.4). Influye en la floración, germinación, ritmo circadiano. Su función más importante es desencadenar el crecimiento como respuesta de escape frente a una sombra, esto posibilita que frente a plantas vecinas los tallos estiren y alcancen zonas más iluminadas²⁴.

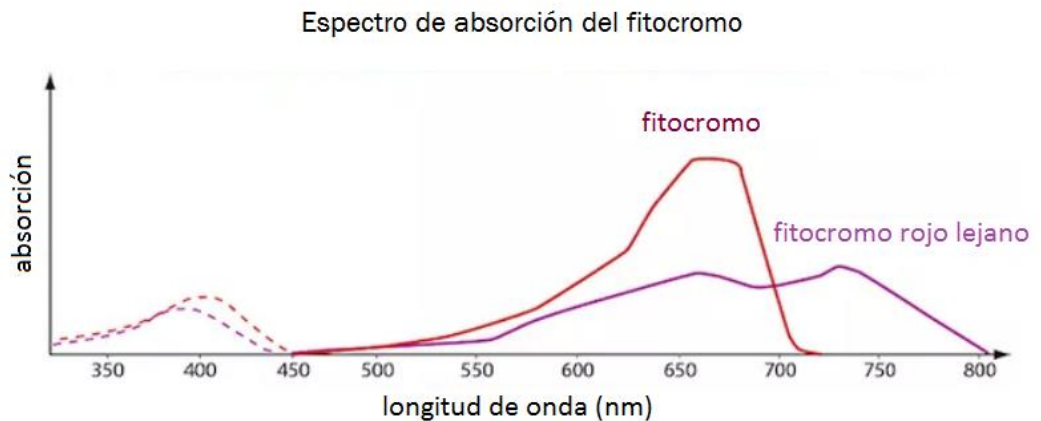


Figura 3.4 Espectro de absorción fitocromo²⁵.

3.2 Conceptos para cuantificar la radiación fotosintética. Valores típicos.

Para poder medir la radiación incidente sobre la canopia necesitamos conocer ciertos conceptos:

Micromoles: Un micromol o 'μmol' contiene un millón de veces menos fotones que un mol, concretamente:

²³ LEDgrowLightsHQ.

²⁴ LEDgrowLightsHQ.

²⁵ LEDgrowLightsHQ.

$$\frac{6,022 \times 10^{23}}{10^6} = 6,022 \times 10^{17} = 1 \mu\text{mol} \quad (2)$$

PAR: ‘Photosynthetically Active Radiation’ o Radiación Fotosintética Activa. Es la parte de la radiación que mayor influencia tiene en la fotosíntesis, comprendida entre los 400 y los 700 nm.

PPF: ‘Photosynthetically Photon Flux’ o flujo de fotones fotosintéticos, es la medida de los fotones incidentes sobre las plantas, se mide en micromoles o μmol .

PPFD: ‘Photosynthetically Photon Flux Density’ o densidad de flujo de fotones fotosintéticos. Se mide en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Para obtener cosechas adecuadas cultivando con luz artificial se debe alcanzar un nivel de PPFD determinado que varía en función de la planta, a continuación se detallan valores necesarios para algunas hortalizas y plantas ornamentales (tabla 3.1).

	Valores de PPFD para cosechar ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)					
	Mínimo	Máximo	Típico			
Tomate	170	200	185			
Pimiento	70	130	100			
Pepino	100	200	150			
	Valores para plantas en maceta ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)			Valores para obtención de flor ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)		
	Mínimo	Máximo	Típico	Mínimo	Máximo	Típico
Orquidea	80	130	105	80	105	92,5
Dendrobium	130	260	195			
Bromelia	40	60	50			
Anturios	60	80	70	80	105	92,5
Kalanchoë	60	105	82,5			
Crisantemo	40	60	50	105	130	117,5
Rosa	40	60	50	170	200	185
Geraneo	40	60	50			
Lisianthus						
Astromelias				60	105	82,5
Freesia				70	105	87,5
Gerbera				80	105	92,5
Tulipán				25	40	32,5

Tabla 3.1 Valores típicos PPFD cultivos²⁶.

²⁶ www.osram.com.

4 Diseño del sistema led.

4.1 Concepto inicial.

Partiendo de la necesidad de iluminar un banal modelo con una superficie dada de 1,4x0,5 metros, a 0,6 metros de distancia al sistema led. La idea inicial es hacer dicho sistema con cuatro puntos de luz, con una potencia total aproximada de cien vatios.

Se usará la tecnología de *'Chip on Board'* o COB por varios motivos:

- Soportan mayor temperatura de trabajo debido a su baja resistencia térmica.
- Actualmente están a la cabeza de la tecnología led.
- Simplicidad de montaje, pues no necesitaremos crear circuitos impresos.
- Simplicidad en confección del espectro. En este sistema la luz en cualquier punto tendrá la misma proporción espectral.

4.2 Búsqueda y selección del led adecuado.

Con el foco puesto en los picos de absorción espectral de la clorofila, el mercado nos ofrece varias opciones analizadas a continuación.

Hay cuatro leds que usan la tecnología COB y se ajustan a nuestras necesidades espectrales:

- HortiLum COB LED CXM-14 de Luminus.
- Luxeon SunPlus COB 1208 de Lumileds.
- Citiled COB 25/55-PRB de Citizen.
- Citiled COB 25/55-PW de Citizen.

Los cuatro tienen la misma potencia nominal de 25 vatios.

Los criterios para seleccionar uno u otro serán:

- Espectro radiado en la zona fotosintética activa.
- Eficiencia térmica del chip.
- Disponibilidad a la hora de adquirir el led.

Espectro del led:

Los COB CXM-14 y SunPlus 1208 tienen un espectro muy similar (figura 4.1 y 4.2), difieren en el pico de la zona azul de 450 nm.

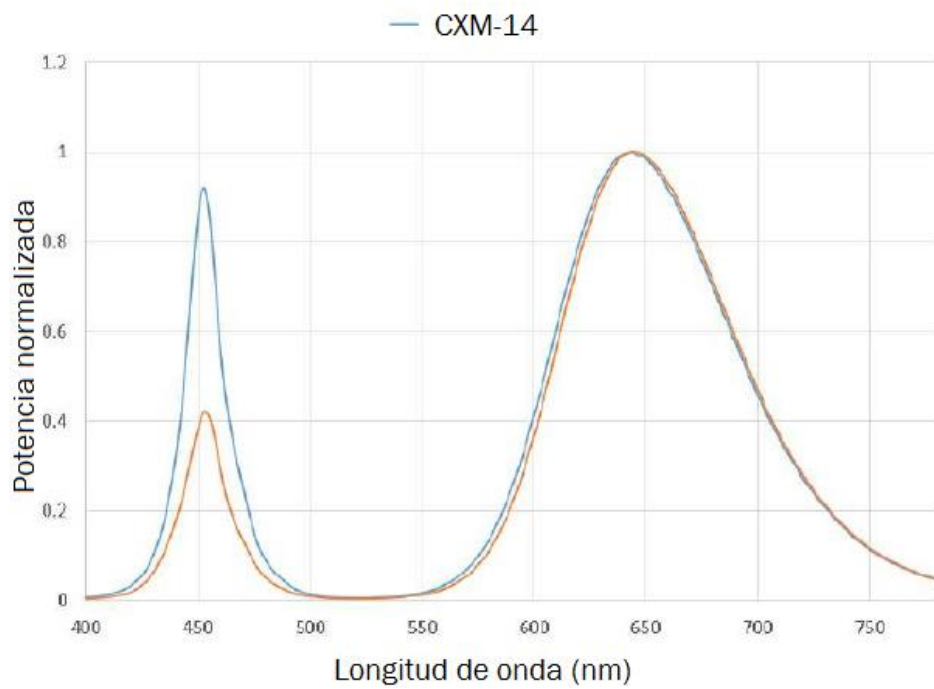


Figura 4.1 Curva espectro COB CXM-14 Luminus ²⁷.

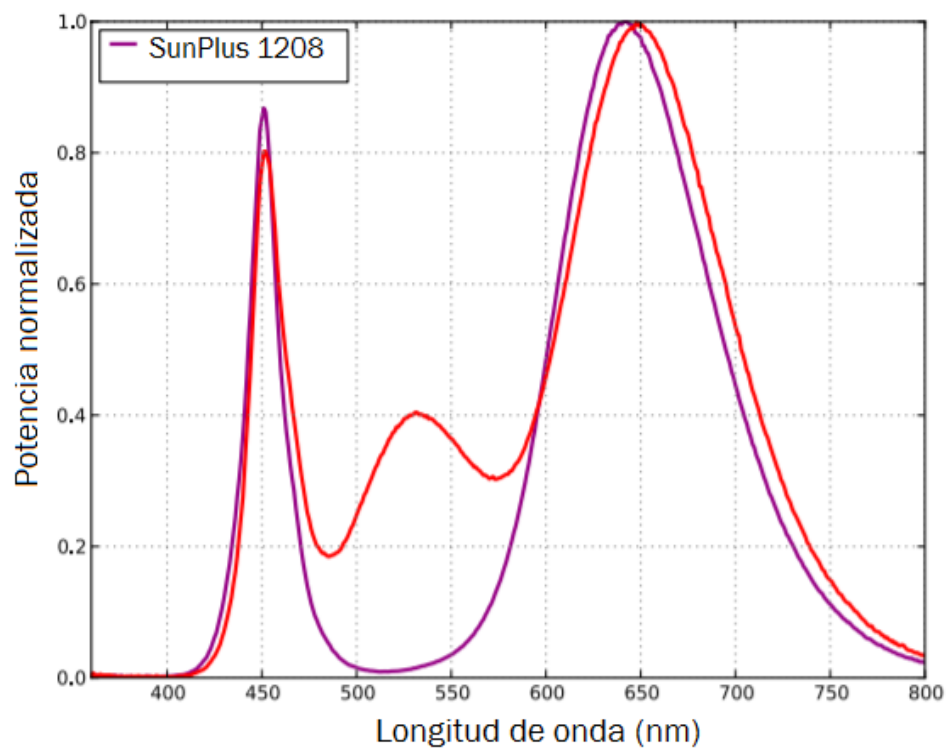


Figura 4.2 Curva espectro COB SunPlus 1208 Lumileds ²⁸.

²⁷ Inc. Luminus Decives, 'Generation 1 HortiLum COB LED Series', 2018, 1-12.

²⁸ Lumileds Holding B.V., 'LUXEON SunPlus', 2018.

Los PRB y PW de Citizen (figura 4.3) tienen picos azules en 450 nm de mayor intensidad que los dos primeros leds, además el pico en la zona de rojos está situado antes de los 630 nm por los 660 nm de los dos primeros.

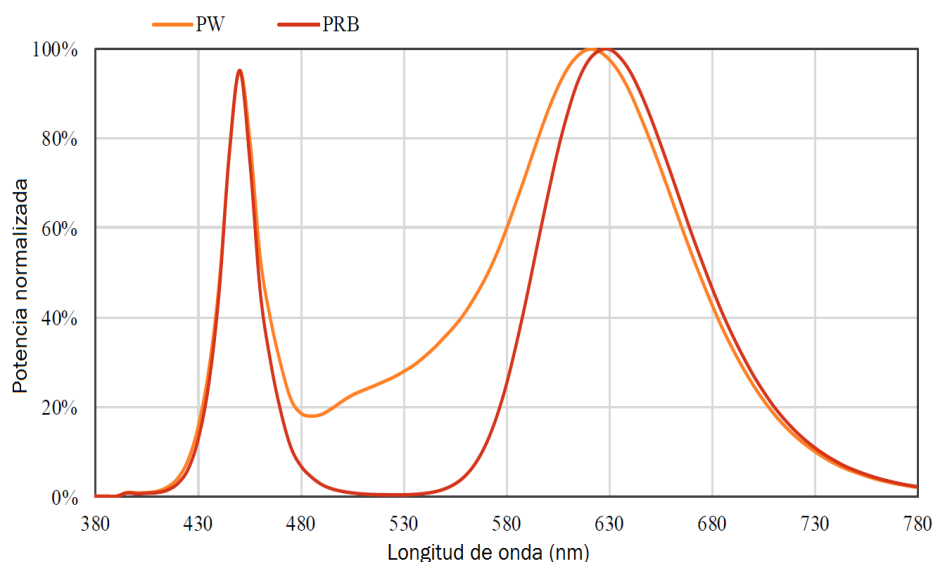


Figura 4.3 Curva COB Citizen PRB y PW ²⁹.

La principal diferencia entre el PRB y el PW es la zona de verdes-amarillos que posee este último led.

Una vez analizadas las curvas, al compararlas con la curva de absorción de las clorofilas (figura 3.1) observamos que necesitamos mayor rojo en la zona de 660 nm que en la de 630 nm.

Por tanto teniendo en cuenta el espectro, saldrían ganando el CXM-14 de Luminus y el SunPlus 1208 de Lumileds.

Eficiencia térmica del chip:

Está ligada a la resistencia térmica, cuanto menor sea esta, mayor será la eficiencia.

Es un dato proporcionado por el fabricante conocido como 'Rj-c', los valores para los chips analizados son los siguientes:

- HortiLum COB LED CXM-14 con Rj-c de 0,27 K/W ³⁰.
- Luxeon SunPlus COB 1208 con Rj-c de 0,29 K/W ³¹.
- Citiled COB 25/55-PRB con Rj-c de 0,78 K/W ³².

²⁹ Citizen Electronics Co, 'Horticulture Series PRB and PW COB', pp. 1-14.

³⁰ Luminus Decives.

³¹ B.V.

³² Citizen Electronics Co, 'Horticulture Series PW', pp. 1-14.

- Citiled COB 25/55-PW con Rj-c de 0,78 K/W ³³.

Vemos que los COB de Citizen son menos eficientes que los de Luminus y Lumileds.

Debido a su menor eficiencia y a un espectro menos adecuado, los leds de Citizen no pasan el corte y de ahora en adelante usaremos tanto los Luminus como los Lumileds pues difieren poco en espectro y eficiencia térmica.

Ambos leds son fáciles de conseguir en los distribuidores habituales.

En principio al ser tan similares usaremos los dos indistintamente pero, para ver si merece la pena usar uno u otro, tendremos que realizar pruebas tras el montaje de un prototipo con leds de ambas marcas.

En capítulos posteriores realizaremos dichas pruebas que consistirán en la medición de la radiación mediante un sensor PAR y test de temperatura sobre el led-disipador. Una vez analizados los resultados y teniendo en cuenta el precio veremos si se usa uno u otro.

4.3 Diseño parte eléctrica y fuente de alimentación.

Según la hoja de datos del fabricante, tanto el led de Luminus como el Lumiled necesitan de 34 a 37 voltios y una intensidad alrededor de 700 miliamperios para alcanzar la potencia nominal^{34 35}.

Hay dos opciones posibles, montaje en serie o en paralelo.

En el montaje en paralelo (figura 4.4) necesitaríamos una fuente que proporcione unos 36 voltios constantes de corriente continua, pues es la tensión de alimentación de cada led, además la intensidad de corriente tendría que ser cuatro veces la de cada led (pues nuestro sistema consta de cuatro leds), es decir, 2,8 amperios.

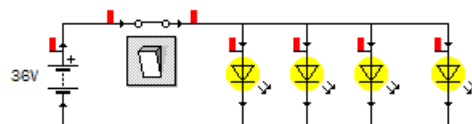


Figura 4.4 Esquema eléctrico paralelo realizado con Crocodrile clips v3.5.

³³ Co, 'Horticulture Series PW'.

³⁴ B.V.

³⁵ Luminus Decives.

Para el montaje en serie (figura 4.5) sumamos la tensión de los cuatro leds y mantenemos la intensidad, necesitando por tanto una fuente de unos 143 voltios y una corriente de 700 miliamperios.

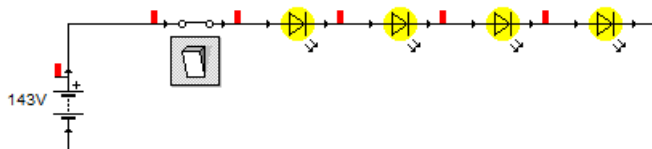


Figura 4.5 Esquema eléctrico en serie realizado con Crocodrile clips v3.5.

El fabricante no recomienda el montaje en paralelo por varios motivos:

1. Debido a las tolerancias de fabricación, aunque sean dos modelos idénticos, pueden existir variaciones en el voltaje de un led a otro, esto hace que el brillo no sea uniforme³⁶.
2. También si un led falla, la intensidad que circulaba por dicho led se reparte entre el resto, es decir, la intensidad que atraviesa cada led aumenta. Por tanto puede darse el caso que ante el fallo de un solo led, se produzca un fallo en cadena del resto de leds al verse superada la intensidad máxima admisible de cada led.

Por todo ello el montaje adecuado es la disposición en serie.

Selección de la fuente de alimentación.

Ahora que sabemos el tipo de montaje y que este es en serie, necesitamos una fuente de alimentación que proporcione unos 143 voltios y 700 miliamperios.

Existen dos tipos de fuentes de alimentación:

1. Fuente de alimentación de voltaje constante.
2. Fuente de alimentación de corriente constante.

Como ya indicamos en los primeros capítulos, a medida que aumenta la intensidad que circula por el led, la eficacia y eficiencia de este disminuye.

Frente a un aumento de temperatura, el led demanda más intensidad debido a que se produce una caída en el voltaje requerido, esto hace que si está alimentado con una fuente de voltaje constante, que no tiene ningún control sobre la intensidad más allá de la máxima que puede ofrecer, a medida que el led se calienta, la intensidad que lo atraviesa

³⁶ Thermal Management, Bridgelux Vero, and Series Led, 'Application Note AN30 Thermal Management for Bridgelux Vero Series LED Arrays', 92 5, 2013.

aumenta y esto acaba con una reducción de la vida útil del led además de perder eficacia y eficiencia.

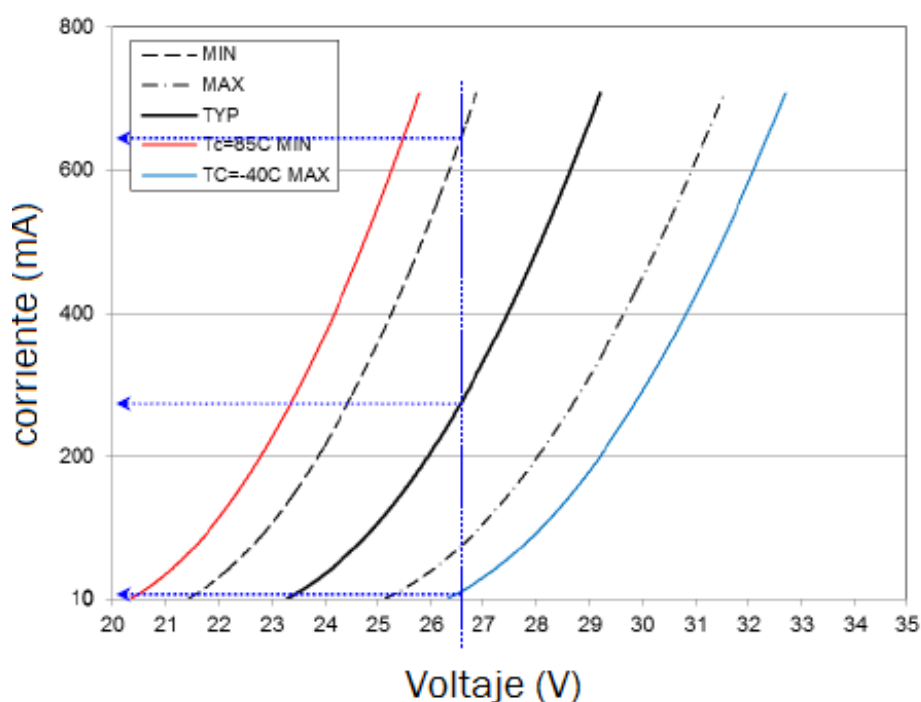


Figura 4.6 Efecto de la temperatura en led Vero 10 de Bridgelux ³⁷.

En la figura 4.6 observamos dicho efecto. Muestra como un led Vero 10 que es alimentado con 26,5 voltios (con una intensidad máxima de 650 miliamperios según especificaciones para dicho voltaje) pasa de consumir escasos 280 miliamperios con una temperatura en la cápsula 'Tc' de 25°C, a consumir más intensidad de la recomendada por el fabricante para una 'Tc' de 85°C, siendo esta última temperatura más fiel al funcionamiento real.

Para que lo anterior no ocurra se puede recurrir a poner una resistencia limitadora en serie con el led, siempre que se trabaje con fuentes de tensión constante.

Por lo tanto la mejor opción es usar fuentes de corriente constante que proporcionan el voltaje adecuado y una intensidad fija.

Ahora ya sabemos que fuente usar, también tenemos el voltaje e intensidad requeridos.

Tras un análisis de las fuentes disponibles llegamos a la conclusión que la fuente Mean Well ELG-100-c700B es la adecuada.

³⁷ Management, Vero, and Led.

Esta fuente es de las más eficientes del mercado y posee protección frente a cortocircuito, subida de voltaje y temperatura. También es adecuada para usar en ambientes húmedos (como son los invernaderos o bancales a los que está dedicado este sistema) pues tiene grado de protección IP67 lo que le protege frente al polvo y el agua.

Sus características eléctricas son:

Entrada

230 voltios de corriente alterna.

Factor de potencia de 0,95

Salida

Voltaje ajustable de forma automática de 71 a 143 voltios.

Intensidad de corriente ajustable mediante potenciómetro de 0 a 700 miliamperios.

Potencia máxima de 100,1 vatios ³⁸.

4.4 Cálculo térmico y dimensionado del disipador.

En dispositivos led de baja potencia tales como los utilizados para señales de tráfico, pilotos indicadores, decoración, etcétera, la superficie del led es suficiente para evacuar el calor generado.

Los leds que estamos utilizando manejan una potencia de cierta magnitud y su tamaño no es suficiente para disipar el calor. Por efecto Joule cualquier cuerpo al que atraviesa una corriente parte se pierde en forma de calor. En el caso de los semiconductores el calor se genera en la unión P-N y si la temperatura supera un valor límite provocaría la fusión térmica de dicha unión.

Debido a lo anterior es necesario recurrir al uso de disipadores de calor para garantizar una temperatura en la unión adecuada.

Transmisión de calor:

Existen tres formas de propagación del calor: radiación, convección y conducción.

Radiación: No necesita de un medio para propagarse. Cualquier cuerpo por encima del cero absoluto (0 Kelvin o -273,15 Celsius) emite radiación con una longitud de onda que es función de la temperatura.

³⁸ In Stock and others, 'ELG-100-C ELG-100-C', 15885 (2018).

Esta forma de transmisión no la tendré en cuenta pues las temperaturas no son elevadas.

Convección: Necesita de un fluido para propagarse ya sea aire, agua etcétera. El aire próximo que rodea un disipador se calienta y se vuelve menos denso, lo que genera un flujo de aire hacia niveles superiores.

Conducción: En dos cuerpos con diferentes temperaturas y en contacto se genera un flujo de calor del caliente al frío. Los materiales con buena conductividad térmica son usados en los disipadores, como por ejemplo aluminio, cobre, plata.

Prescindiremos del uso de ventiladores pues suponen un consumo de energía extra y estos no son adecuados para su uso en ambientes húmedos o con polvo. Por tanto nuestro disipador se basa en el fenómeno de convección natural.

Conceptos

Resistencia térmica (R): Se mide en grados Celsius o Kelvin partido vatio, C/W. Da una idea de lo eficiente que es el led, puesto que una resistencia menor resultará en temperaturas de trabajo menores y esto se traduce en mayor 'output' luminoso para el mismo consumo. Se hablará de diferentes tipos de resistencias (figura 4.7); resistencia unión-cápsula 'Rj-c', resistencia cápsula-disipador 'Rc-h', resistencia disipador-ambiente 'Rh-a'.

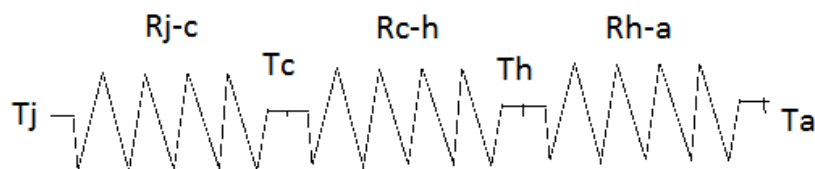


Figura 4.7 Esquema de resistencias desde la unión al ambiente.

Temperatura en la unión (T_j): 'Junction temperature' Es la temperatura más alta que se alcanza en el dispositivo (figura 4.8) y es clave en su vida útil y en su flujo luminoso. Por tanto al igual que ocurre con la intensidad, al aumentar la temperatura, la eficacia disminuye.

Temperatura en la cápsula (T_c): Es algo menor que la temperatura en la unión pero está relacionada con ella y la resistencia térmica unión-cápsula (R_{j-c}) a través de la siguiente fórmula:

$$T_j = T_c + P_d \times R_{j-c} \quad (3)$$

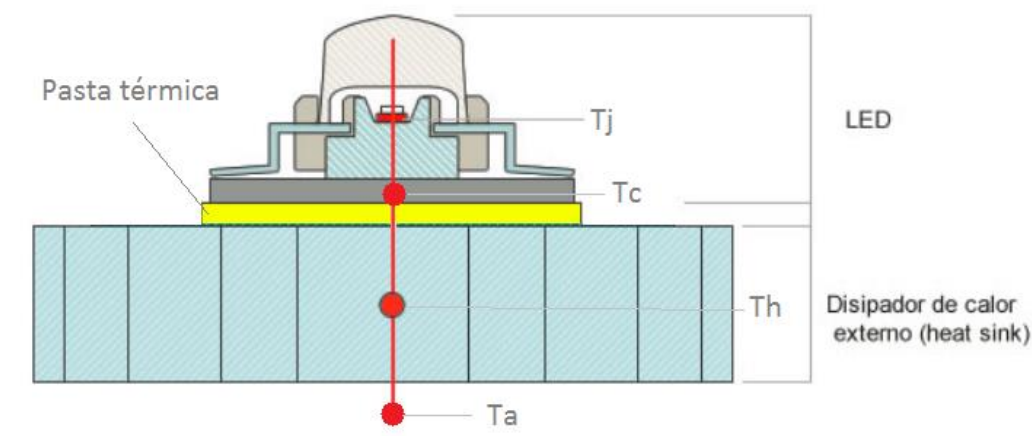


Figura 4.8 Dibujo de temperaturas sobre el sistema led-unión-disipador-ambiente ³⁹.

Aplicando la ley de Ohm como si fuera un circuito eléctrico tendríamos que:

$$R_{j-c} + R_{c-h} + R_{h-a} = (T_j - T_a) / P_d \quad (4)$$

La resistencia cápsula-disipador (R_{c-h}) es debida al hueco existente entre el led y el disipador. Es necesario aplicar pasta térmica para favorecer la conducción térmica y rellenar los huecos de aire que aumentan la resistencia. En la figura 4.9 se aprecian los huecos antes y después de ser rellenados con pasta térmica.

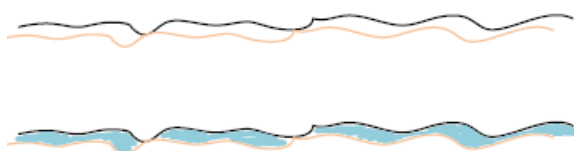


Figura 4.9 Huecos entre el led-disipador antes y después ⁴⁰.

La pasta debe ser aplicada en forma de una fina capa, podemos considerar que ' R_{c-h} ' tiene un valor de entre 0,1 K/W para una pasta

³⁹ LedBox.es and LedBox.es, 'La Gestión Térmica de Los Leds' <www.Ledbox.es> [accessed 1 August 2019].

⁴⁰ Alfoso Méndez, 'Disipadores Térmicos Para Dispositivos Electrónicos', 2016, 17.

con alta conductividad y 0,5 K/W para una pasta no tan buena conductora.

Tanto la temperatura máxima de la unión 'Tj' como la resistencia unión-cápsula 'Rj-c' y la potencia disipada 'Pd', son datos que vienen en la hoja de datos del fabricante del led.

Haciendo uso de la hoja de datos suministrada por el fabricante obtenemos los siguientes datos para los chips analizados:

- Led COB CXM-14 de Luminus:
Voltaje: 31 a 37 V
Intensidad máxima: 1440 mA
'Tj' máxima: 140 °C
Vida L₉₀B₅₀ a intensidad y 'Tj' máximas: 10000h
Rj-c: 0,27 K/W
Pd: no se indica pero asumimos un valor del 60 % de la potencia eléctrica (bastante conservador para tener cierta seguridad).
- Led COB SunPlus 1208 de Lumiled:
Voltaje: 32,5 a 37,5 V
Intensidad máxima: 1800 mA
Tj máxima: 125 °C
Rj-c: 0,29 K/W
Pd: no se indica pero asumimos un valor del 60 % de la potencia eléctrica (bastante conservador para tener cierta seguridad).

Asumimos una temperatura ambiente 'Ta' de 22 grados Celsius, pues es una temperatura común en una vivienda.

Con los datos anteriores ya podemos calcular el valor de la resistencia térmica máxima requerida, que es la finalidad de este apartado.

$$R_{h-a} = (T_j - T_a) / P_d - R_{j-c} - R_{c-h} \quad (5a)$$

$$(CXM-14) P_d = 0,6 \times (34 \times 0,7) = 14,28 \text{ W} \quad (6a)$$

$$(SunPlus 1208) P_d = 0,6 \times (33,6 \times 0,7) = 14,112 \text{ W} \quad (6b)$$

La temperatura máxima en la unión alcanza 140 y 125 °C, esta es una situación límite que no debe alcanzarse, lo adecuado es aplicar un factor

de seguridad para hacer los cálculos. En nuestro caso el fabricante ofrece los parámetros de funcionamiento del led referidos a una temperatura de 85 °C, que usaremos para los cálculos.

Quedando un valor de 'Rh-a' provisional de:

$$\begin{array}{l} \text{CXM-14} \\ \text{Rh-a} = (85 - 22)/14,28 - 0,27 - 0,5 = \mathbf{3,64 \text{ K/W}} \end{array} \quad (7a)$$

$$\begin{array}{l} \text{SunPlus 1208} \\ \text{Rh-a} = (85 - 22)/14,112 - 0,29 - 0,5 = \mathbf{3,67 \text{ K/W}} \end{array} \quad (7b)$$

Ajustes de la resistencia térmica.

La orientación, el número de focos de calor, la longitud y la potencia disipada influyen en el rendimiento del disipador.

Orientación

Según la colocación del disipador hay que aplicar un factor de corrección mostrado en la figura 4.10.

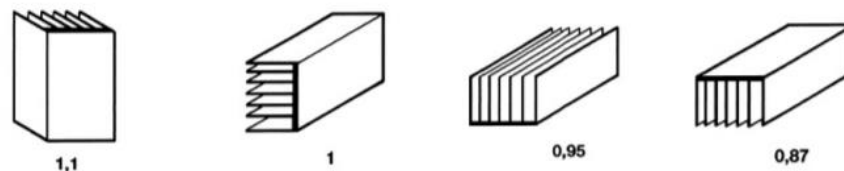


Figura 4.10 Factor de corrección según orientación ⁴¹.

Número de focos

Si tenemos más de un foco de calor, por ejemplo 'n' focos en los que la resistencia de cada foco es menor que 'n' K/W, al sumar las resistencias en paralelo da como resultado una resistencia menor que la necesaria para un solo foco. Esto hace que el disipador necesario sea más pequeño.

Potencia

El rendimiento del disipador aumenta con la potencia disipada.

⁴¹ Disipa Heat S.L., 'Cátalogo Disipa Heat SL'.

Longitud

Al aumentar la longitud el rendimiento del disipador disminuye, es decir, un disipador con una longitud determinada, no disipa la mitad que uno con el doble de longitud.

Al usar un disipador radial en una posición vertical, necesitaremos multiplicar la resistencia inicial entre 1,1 según recomienda el fabricante.

$$\begin{array}{l} \text{CXM-14} \\ \text{Rh-a} = 3,64 \times 1,1 = 4 \text{ K/W} \end{array} \quad (8a)$$

$$\begin{array}{l} \text{SunPlus 1208} \\ \text{Rh-a} = 3,67 \times 1,1 = 4,04 \text{ K/W} \end{array} \quad (8b)$$

Con esos datos vamos al catálogo del fabricante de disipadores Mechatronix. Dentro de los disipadores radiales encontramos tres cuya resistencia es menor que el valor calculado y su forma se adapta al soporte del led:

1. Modelo ModuLED Micro 8630-C con Rh-a de 1,8 K/W.
2. Modelo ModuLED Nano 7050-C con Rh-a de 2,2 K/W.
3. Modelo CoolStar Black 6730 con Rh-a de 3,26 K/W.

Tras aplicar la corrección por potencia disipada, las resistencias anteriores cambian a:

1. Modelo ModuLED Micro 8630-C con Rh-a de 2 K/W⁴².
2. Modelo ModuLED Nano 7050-C con Rh-a de 2,4 K/W⁴³.
3. Modelo CoolStar Black 6730 con Rh-a de 3,26 K/W⁴⁴.

No es necesario realizar ajuste por longitud ni por número de focos.

El disipador adecuado sería el 'ModuLED Nano 7050-C', pero la diferencia de precio con el modelo superior 'ModuLED Micro 8630-C' es

⁴² Mechatronix, 'Modular Passive Star LED Cooler Ø86mm Modular Passive Star LED Cooler Ø86mm Product Details', 818.

⁴³ Mechatronix, 'Modular Passive Star LED Cooler Ø70mm Features & Benefits Modular Passive Star LED Cooler Ø70mm Product Details', 818.

⁴⁴ Mechatronix, 'CoolStar ® 67 Designer LED Star Cooler Ø67mm Features & Benefits', 818.

pequeña y se ha optado por usar este último y así obtener un mayor rendimiento del led.

5 Ensamblaje, calibración y ajuste del sistema.

En este capítulo mostraremos el proceso de ensamblado del prototipo y diferentes pruebas que se han realizado sobre el sistema para tratar de optimizar su funcionamiento.

5.1 Ensamblado del prototipo.

5.1.1 Materiales y herramientas utilizadas.

El prototipo consta de cuatro puntos de luz alineados en un tramo de un metro, los materiales usados son los siguientes:

- 1 unidad fuente de alimentación Mean Well ELG-100-c700B.
- 2 unidades HortiLum COB LED CXM-14 de Luminus.
- 2 unidades Luxeon SunPlus COB 1208 de Lumileds.
- 4 unidades disipador ModuLED Micro 8630-C.
- 4 unidades soporte para led Z-50.
- 4 unidades soporte de reflector para Z-50.
- 8 tornillos M3x10 mm.
- Pasta térmica Artic MX-4.
- 1 metro varilla roscada M3.
- Chapa de aluminio espesor 1 mm tamaño 90x500 mm.
- 48 tuercas y arandelas para M3.
- 1 metro perfil de aluminio ranurado 40x40 mm.
- 4 tuercas y tornillos M8 cabeza martillo.
- 3 metros cable rígido unipolar de aluminio 1mm.
- 4 conectores rápidos.
- 1 potenciómetro de 100 k Ω .
- Estaño.
- Tubo termoretráctil.
- Enchufe de 3 polos con cable de 1 metro.
- Isopropanol 99,99%.
- Papel absorbente.
- Bancal reutilizado.

También se ha hecho uso de las siguientes herramientas:

- Taladro.
- Brocas para metal diámetros 4, 5,5 y 8,5 mm.
- Lima.
- Sierra de mano para metal.

- Tijeras para chapa.
- Llave fija 12-13.
- Alicates.
- Tijeras de electricista.
- Estañador.
- Destornillador boca Philips PH1.
- Guantes de nitrilo.

5.1.2 Montaje.

Conjunto separador-disipador

Se instala un separador en el disipador para evitar que el perfil sobre el que van colocados los puntos de luz perturbe el flujo de aire generado por convección natural. Este separador consta de tres varillas roscadas y una chapa de aluminio agujereado que facilita la unión al perfil.

Conjunto separador-disipador-led-soportes

Con ayuda de guantes, papel absorbente y alcohol isopropilico se limpian las superficies del disipador y led que van a estar en contacto. A la hora de aplicar la pasta térmica hay varias formas de hacerlo, elegimos la aplicación en zigzag sobre la superficie trasera del led, evitando el uso excesivo de pasta pues empeora la disipación.

Con el led encajado en el soporte y la pasta aplicada, se une al disipador mediante un par de tornillos, quedando el conjunto como se ve en la figura 5.1.

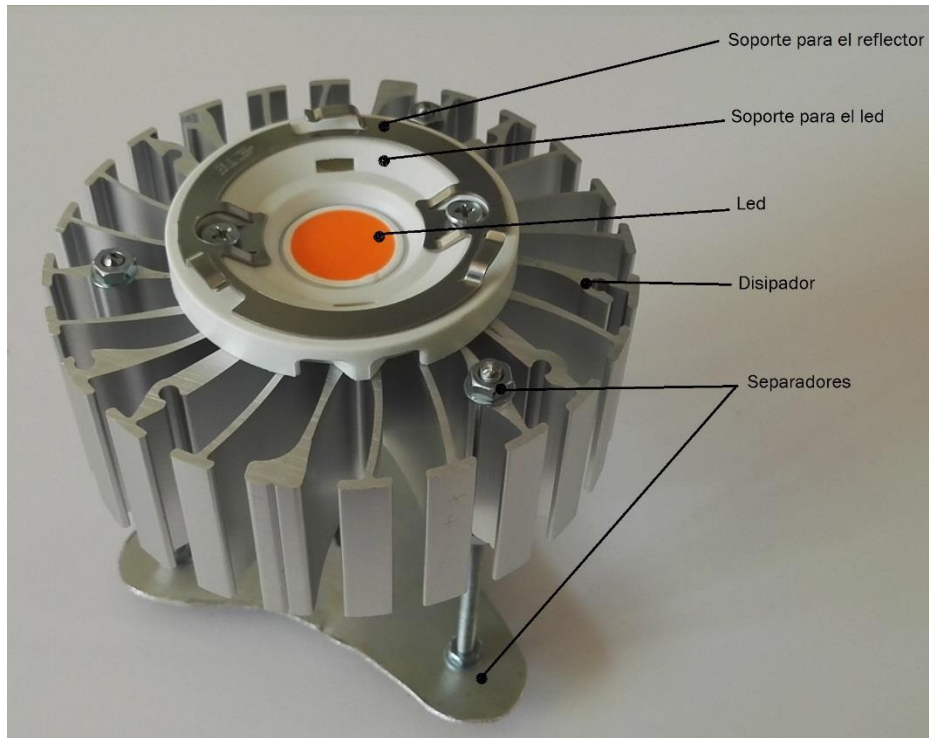


Figura 5.1 Fotografía del conjunto separadores-disipador-led-soportes.

Conjunto completo

En el perfil ranurado se colocan los cuatro focos, espaciados 30 centímetros, ayudándonos de tornillos cabeza martillo. En la figura 5.2 los dos focos de la izquierda llevan el led CXM-14, los dos de la derecha van los SunPlus 1208.



Figura 5.2 Perfil con los cuatro puntos de luz.

Los soportes del led vienen preparados para ser cableados con hilo rígido, por tanto hacemos uso de cable rígido de aluminio y conectamos en serie los focos como explicamos en el capítulo anterior.

Previamente en la fuente de alimentación, se instala un potenciómetro con el fin de regular la intensidad de corriente y por ende la radiación sobre el área de cultivo.

El perfil ranurado con los cuatro focos instalados, se coloca en un bancal procedente de un trabajo final de grado anterior de otro compañero.

5.2 Instrumentos y equipo empleado en las pruebas.

En este apartado mostramos los aparatos usados para medir la temperatura, intensidad de corriente y radiación, también una breve explicación de su funcionamiento.

Termopar UNI-T UT320D con las siguientes características:

- Doble canal para sondas tipo K o J, usando la tipo K.
- Rango de medición de -50 a 1300 °C.
- Resolución de 0,1 °C.
- Incertidumbre: 1 °C + 0,5% de la temperatura medida. Dicha incertidumbre para el rango de 0 a 1000 °C⁴⁵.

Un termopar es un dispositivo basado en el efecto termoeléctrico o efecto *Seebeck*, en dicho efecto se produce una conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico. Dicha diferencia de voltaje se produce entre dos metales distintos en contacto⁴⁶.

En nuestro caso, la sonda tipo K esta compuesta por una aleación de alumel Ni-Al o Ni-Cr cromel.

Multímetro Amprobe 34XR-A BEHA

Este dispositivo mide varias magnitudes; voltaje, intensidad y resistencia. Lee en corriente continua y en alterna.

Entre todas las especificaciones que tiene, mencionar las que vamos a usar:

- Rango de voltaje AC: 400 mV, 4 V, 40V, 400 V, 1000 V con 100 μ V de resolución.
- Rango de voltaje DC: 400 mV, 4 V, 40 V, 400 V, 750 V con 100 μ V de resolución.
- Rango de corriente AC 400 μ A, 4 mA, 40mA, 300mA, 10 A.

⁴⁵ LTD UNI-TREND TECHNOLOGY CO., 'UT320D-English-Manual'.

⁴⁶ E Müller and others, 'Precision Thermal Conductivity Measurements of Materials', in *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*, 2006, pp. 26-8-26-29.

- Rango de corriente DC 400 μ A, 4 mA, 40mA, 300mA, 10 A ⁴⁷.

Sensor PAR Apogee MQ-510

- Incertidumbre de calibración: \pm 5%.
- Rango de medida: 0 a 4000 μ mol \cdot s⁻¹ \cdot m⁻².
- Repetibilidad: menor que 0.05%.
- Campo de visión: 180°.
- Rango espectral: de 389 a 692 nm \pm 5 nm.
- Detector: foto diodo de silicio azul mejorado ⁴⁸.

Un sensor PAR se basa en el efecto fotovoltaico. La radiación sobre un fotodiodo sensible a un intervalo del espectro genera un voltaje proporcional a ella misma.

Cabe indicar que ante un fotón de cualquier longitud de onda el sensor ofrece la misma respuesta, es decir, un fotón verde cuantifica igual que uno rojo, azul etcétera.

5.3 Medición de la radiación fotosintética activa.

En este apartado mediremos la radiación fotosintética activa en cuatro casos:

- Con reflector instalado y 3 intensidades de corriente distintas: 350, 525 y 700 miliamperios. Que corresponden a una potencia consumida de 50, 75 y 100 vatios respectivamente.
- Sin reflector instalado para una intensidad de 700 mA.

5.3.2 Toma de datos.

En un bancal cuya superficie útil de cultivo es de 136x51 centímetros, se instala el sistema led a una altura de 60 centímetros.

La superficie anterior se dividirá en una cuadrícula rectangular, en cada intersección se colocará el sensor para realizar una lectura. Saliendo en total dieciocho lecturas por ensayo como en la figura 5.3.

⁴⁷ Amprobe Test Tools, '34XR-A Digital Multimeter Data Sheet'.

⁴⁸ Apogee Instruments, 'OWNER ' S MANUAL UNDERWATER QUANTUM METER Models MQ-510', 435, 2020.

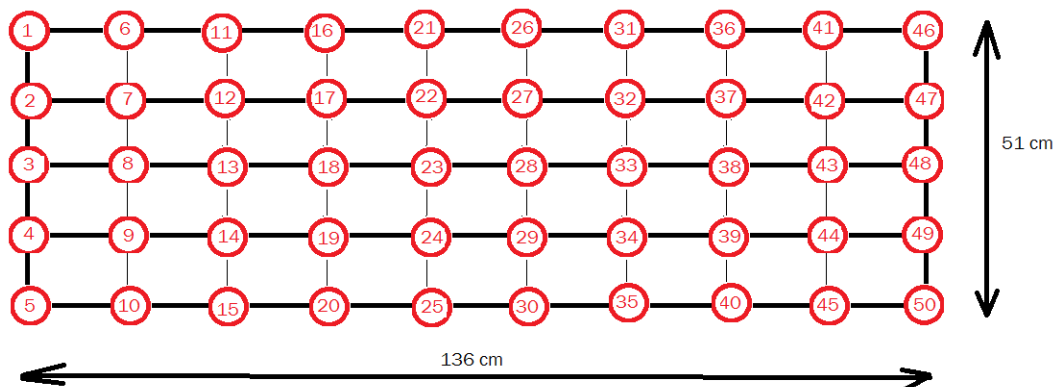


Figura 5.3 Cuadrícula para lectura de la radiación.

El sensor debe colocarse con su eje de revolución perpendicular a la superficie de cultivo, la cual es paralela a la fuente de luz.

Para regular la intensidad acoplamos el multímetro en serie con los leds y con el potenciómetro ajustamos al valor deseado.

A continuación se presentan los datos obtenidos en los cuatro ensayos realizados, cada celda representa la medición en su punto correspondiente con la figura 5.3:

La tabla 5.1 muestra los valores en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ con reflector a una intensidad de 700 mA sin reflector:

64	71	80	90	91	92	84	80	70	58
65	74	87	94	94	95	89	85	70	60
72	78	90	98	98	98	92	89	78	67
65	75	86	95	96	96	89	84	74	62
62	70	83	89	92	85	78	79	67	57

Tabla 5.1 Valores en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ para una intensidad de 700 mA sin reflector.

Las tablas siguientes muestran los valores obtenidos para intensidades de 700 mA a 350 mA todas con reflector instalado:

82	95	148	127	132	127	114	106	89	71
92	107	124	147	145	140	131	123	103	81
102	128	136	166	161	161	139	134	124	94
92	120	130	147	154	147	124	124	104	77
83	95	108	117	133	121	113	100	87	70

Tabla 5.2 Valores en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ para una intensidad de 700 mA con reflector.

61	69	83	96	101	96	92	79	73	58
67	77	92	110	111	107	103	92	79	63
80	96	100	125	122	123	110	105	97	71
70	85	101	112	117	110	102	94	83	61
59	73	84	97	102	98	92	80	68	56

Tabla 5.3 Valores en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ para una intensidad de 525 mA con reflector.

43	49	61	65	65	69	65	56	51	41
47	55	65	77	77	77	75	64	57	45
55	67	72	87	86	86	77	73	69	48
48	61	70	78	83	83	75	65	58	42
41	48	61	67	69	72	64	55	48	36

Tabla 5.4 Valores en $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ para una intensidad de 350 mA con reflector

5.3.2 Conclusiones del ensayo.

Comparando la tabla 5.1 con la 5.2 observamos que al añadir un reflector los valores obtenidos en el sensor aumentan entre un 22% y un 64% para la misma potencia (100 W).

Incluso comparando la tabla 5.1 con la 5.3 (los leds van a 525 mA en ésta última) podemos decir que aún consumiendo menos potencia y con un reflector instalado, las medidas obtenidas son mayores que para una potencia mayor sin reflector.

A la vista de los datos obtenidos de los ensayos anteriores, se puede afirmar que es necesario añadir un reflector al led para evitar las fugas de luz sobre zonas distintas al bancal.

5.4 Gestión térmica. Test de temperatura.

Con el fin de comprobar si la gestión térmica es la esperada tras los cálculos realizados en el apartado 4.4, vamos a realizar test de temperatura alrededor de la superficie del disipador.

5.4.1 Toma de datos.

Primero encendemos el sistema led y dejamos una hora para que se alcance una situación estacionaria en la cual la temperatura ya no varía más.

Haciendo uso del termopar UNI-T UT320D y la sonda tipo K, tomamos lecturas de temperatura en las zonas del disipador más representativas, como son el centro, la base superior, aristas, zonas próximas al led y sobre el led mismo en el punto facilitado por el fabricante para su medida.

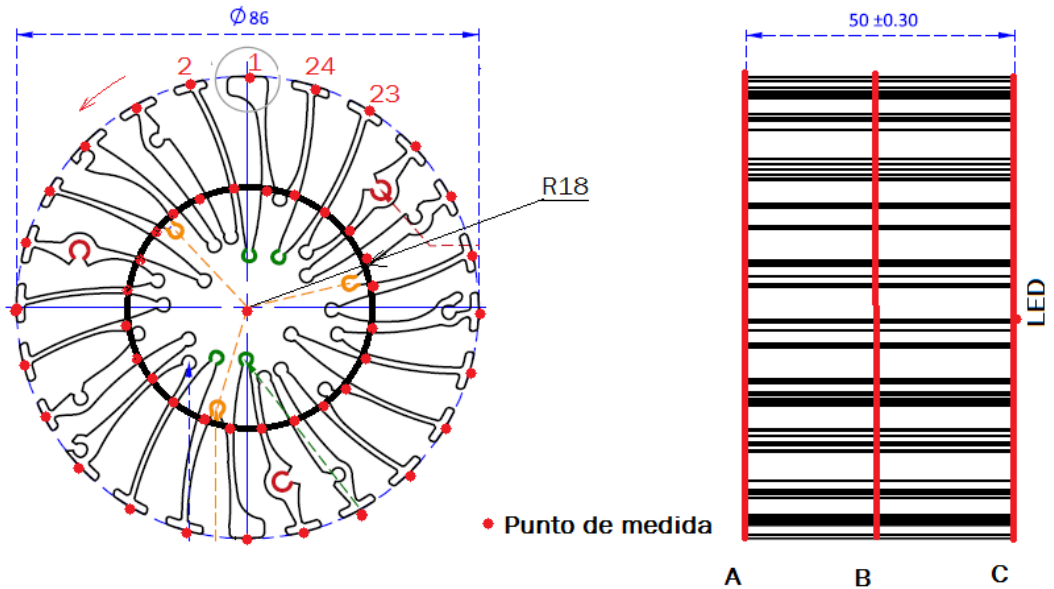
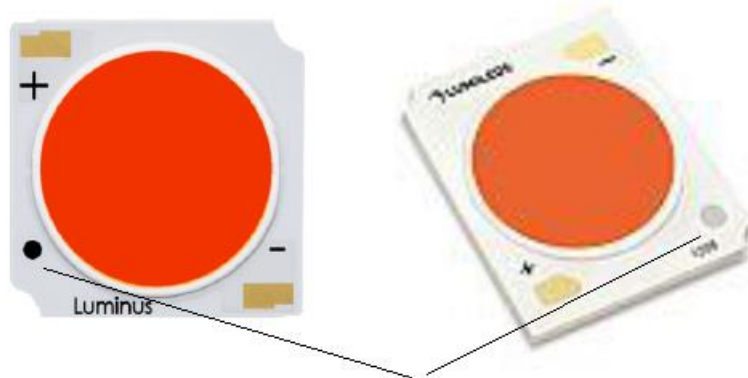


Figura 5.4 Mapa de puntos donde se ha medido la temperatura.

Por tanto tenemos 3 niveles (líneas rojas paralelas de la figura 5.4) y en cada nivel tomamos 24 valores. Además en la parte superior del disipador tomaremos otros 24 valores correspondientes a una corona de 36 mm de diámetro.

El valor se obtiene por contacto de la sonda K con la superficie a medir. Con ayuda de un material aislante, en nuestro caso un trozo de papel doblado, realizamos una ligera presión con la sonda sobre el disipador y tras unos segundos para que se estabilice el valor, lo anotamos.

Para medir la temperatura en la cápsula (T_c), que es clave para conocer a que temperatura funciona la unión (T_j), tenemos que hacer contacto con la sonda en el punto de medida del led que nos indica el fabricante, en nuestro caso es un punto metálico que difiere del resto de la carcasa cerámica.



Punto de medida de temperatura de cápsula (T_c)

Figura 5.5 Punto de medida de la temperatura del Luminus CXM-14 ⁴⁹(izq.) y Lumiled SunPlus 1208 ⁵⁰(dcha.)

Tenemos dos leds de distintos fabricantes, realizaremos un test para cada uno y veremos si existen diferencias entre los cálculos y el ensayo.

Luminus CXM-14:

Además de las medidas de la tabla 5.5, tenemos una temperatura en el centro de la base superior del disipador de 50,3 °C y la temperatura medida en la cápsula (T_c) ha sido de 56 °C.

Haciendo uso de la ecuación número 3, de la potencia disipada calculada en 6a del apartado 4.4 y el valor de la resistencia térmica de la unión a la cápsula 'Rj-c' dada por el fabricante e indicada en el apartado 4.2 podemos calcular la temperatura en la unión 'Tj'.

El valor de 'Tj' una vez hechos los anteriores cálculos para este led es; $T_j = 59,9$ °C.

⁴⁹ Luminus Decives.

⁵⁰ B.V.

Medida nº	Nivel			
	A (R = 18 mm)	A (h = 30mm)	B (h = 15mm)	C (h = 0 mm)
1	50,1	48,7	48,9	48,5
2	50,1	48,4	48,4	49,1
3	50	48,3	48,9	49,4
4	49,9	48,4	48,6	49
5	49,9	48,7	49,1	49,1
6	49,9	48,5	48,7	49,1
7	50	48,9	49,1	49,1
8	50	48,3	49,1	49,1
9	49,9	48,9	48,6	48,6
10	49,9	48,4	48,5	48,9
11	49,9	48,9	48,5	49,1
12	50	48,5	49,1	49,2
13	50,1	48,3	48,5	48,9
14	50	48,9	49	48,9
15	50	48,4	48,8	48,9
16	50	48,9	49,2	49,1
17	50,1	48,3	48,5	49,2
18	50,1	48,6	48,5	48,7
19	50,1	48,6	48,9	49,1
20	50,1	48,7	48,7	49
21	49,9	48,5	48,9	48,8
22	49,9	48,5	49,1	48,8
23	49,9	48,5	48,9	49,2
24	49,9	48,8	48,7	48,6

Tabla 5.5 Medidas de temperatura sobre el disipador con led Luminus.

Lumiled 1208:

Además de las medidas de la tabla 5.6, tenemos una temperatura en el centro de la base superior del disipador de 51,2 °C y la temperatura medida en la cápsula (Tc) ha sido de 57,5 °C.

De nuevo, haciendo uso de la ecuación número 3, de la potencia disipada calculada en 6b del apartado 4.4 y el valor de la resistencia térmica de la unión a la cápsula 'Rj-c' dada por el fabricante e indicada en el apartado 4.2 podemos calcular la temperatura en la unión 'Tj'.

El valor de 'Tj' una vez hechos los anteriores cálculos para este led es; Tj = 61,6 °C.

Medida nº	Nivel			
	A (R = 18 mm)	A (h = 30mm)	B (h = 15mm)	C (h = 0 mm)
1	50,4	49,8	50,1	50,5
2	51,1	50	50,4	50,8
3	50,5	49,6	50	50,4
4	50,9	49,7	50,4	50,7
5	51	49,6	50,1	50,6
6	50,7	49,9	50,4	50,7
7	51	49,9	50,3	50,7
8	50,9	50	50,1	50,7
9	50,9	49,8	50,4	50,6
10	50,9	49,7	50	50,8
11	50,9	49,9	50,2	50,7
12	51	50	50,4	50,8
13	50,8	49,8	50,1	50,4
14	50,8	49,9	50	50,4
15	50,9	49,8	50	50,8
16	51,1	49,6	50,3	50,6
17	50,9	49,6	50,4	50,6
18	50,9	49,9	50,4	50,5
19	50,8	49,7	50,3	50,4
20	51	49,6	50	50,8
21	50,5	49,9	50	50,4
22	50,6	49,9	50,3	50,4
23	50,6	49,7	50,1	50,6
24	50,9	49,6	50	50,5

Tabla 5.6 Medidas de temperatura sobre el disipador con led Lumiled.

5.4.2 Conclusiones del ensayo.

Comparando las temperaturas en la unión y las tablas 5.5 y 5.6 se aprecia que el led CXM-14 de Luminus es un poco más eficiente que el SunPlus de Lumiled, de forma empírica lo hemos demostrado al obtener unas temperaturas menores en el disipador del led CXM-14 aún consumiendo éste último unos mili-vatios más.

Si vamos a los datos del fabricante comprobamos que la afirmación anterior es correcta pues tenemos una resistencia térmica menor en el led CXM-14.

Observando la temperatura obtenida en la unión en ambos leds, podemos afirmar que la vida útil de estos será superior a la dada por el fabricante pues ambos trabajan por debajo de los 85°C a los que se establece el ensayo del fabricante. Esto es normal pues he elegido un disipador con una resistencia térmica mucho menor a la requerida por el led para trabajar con holgada seguridad.

6 Estudio viabilidad de energía solar

Puesto que el coste actual de baterías es elevado, ya sean de plomo o litio, no es rentable hacer una instalación ad-hoc para uno o varios de nuestros banales. Por ello vamos a estudiar el ahorro económico que se produciría al instalar uno o varios banales led en una residencia en la que ya exista una instalación fotovoltaica.

6.1 Ejemplo de estudio

Para realizar el estudio tomaremos como ejemplo una instalación de 4,6 kW pico instalados, enmarcada dentro del supuesto de autoconsumo sin excedentes de la reciente normativa de energías renovables. El campo solar está orientado al sur y con una inclinación fija de 35 ° sobre la horizontal.

Tomaremos la tarifa de luz 2.0 sin discriminación horaria con un precio de kWh de 0,152 € con impuestos incluidos. Con una potencia contratada de 4,6 kW.

Suponemos que instalamos un banal, cuyo consumo es conocido y de 100 W, también supondremos que vamos a cultivar con un fotoperiodo de 12 horas.

La siguiente figura es nuestro ejemplo y hace referencia al consumo de una vivienda de 180 metros cuadrados con 4 personas viviendo y una instalación solar de 4,6 kW pico, en el día más negativo en cuanto a producción solar como es el 21 de Diciembre. Los meses de Enero y Noviembre presentarían una gráfica muy parecida a la de Diciembre.

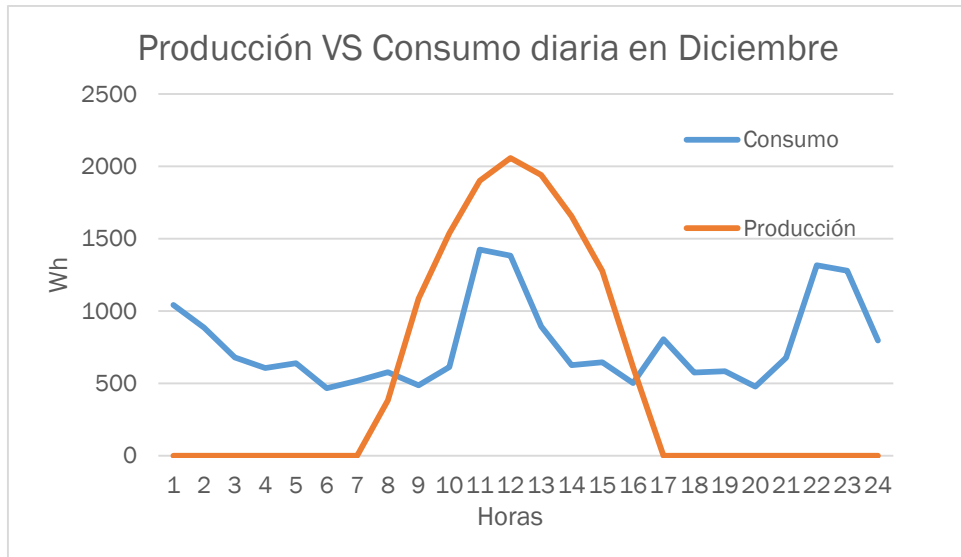


Figura 6.1 Gráfico consumo vs producción diaria Diciembre.

En la figura 6.1 observamos que en las horas centrales del día se produce más energía de la que se consume, para conseguir mayor ahorro es necesario ‘aplanar’ la curva de consumo, una de las maneras de hacerlo es aumentando el consumo en esas horas centrales.

Nuestro bancal consume 100 Wh, con los datos de consumo y producción del día más crítico podríamos alimentar durante 8 horas con energía solar. Las 4 horas restantes tendríamos que pagar.

Durante los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero (figura 6.2) hay 4 horas al día que tendremos que alimentar de la red.

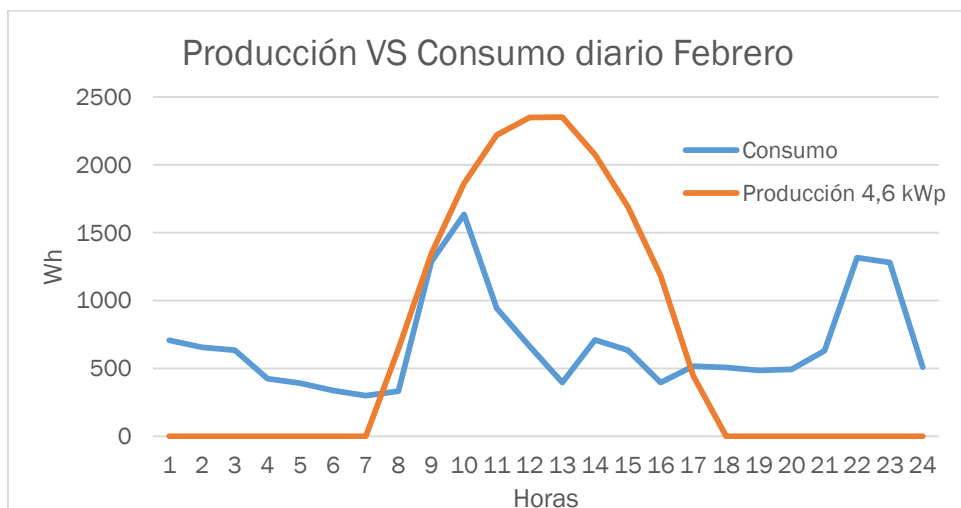


Figura 6.2 Gráfico consumo vs producción diaria Febrero.

En Marzo, Abril (figura 6.3), Septiembre y Octubre, son 3 las horas al día no cubiertas por las placas.

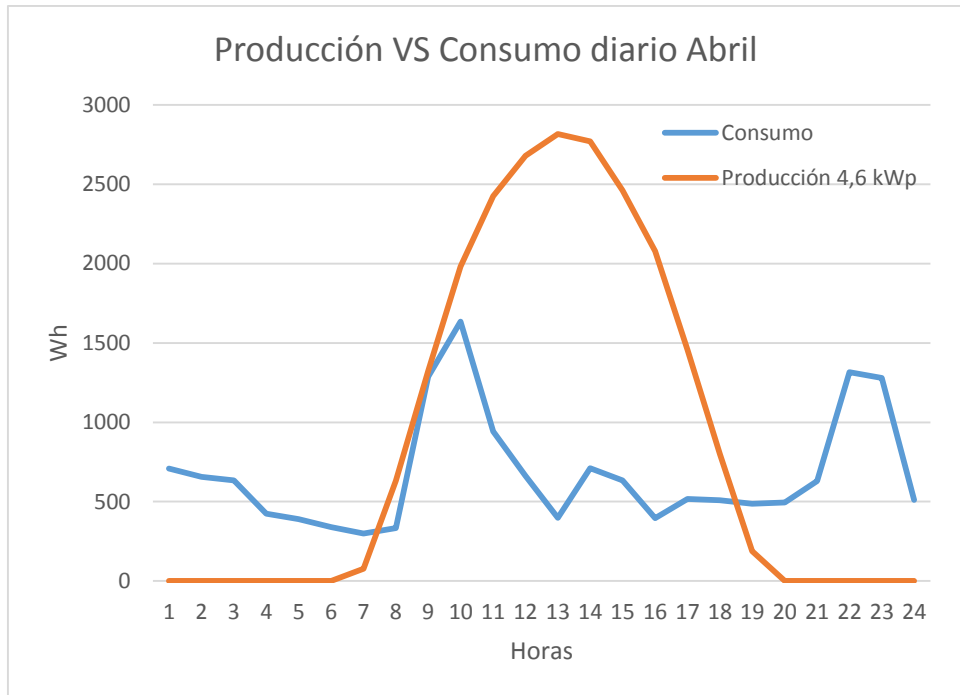


Figura 6.3 Gráfico consumo vs producción diaria Abril.

En Mayo (figura 6.4), Junio, Julio y Agosto necesitarán 2 horas de electricidad al día.

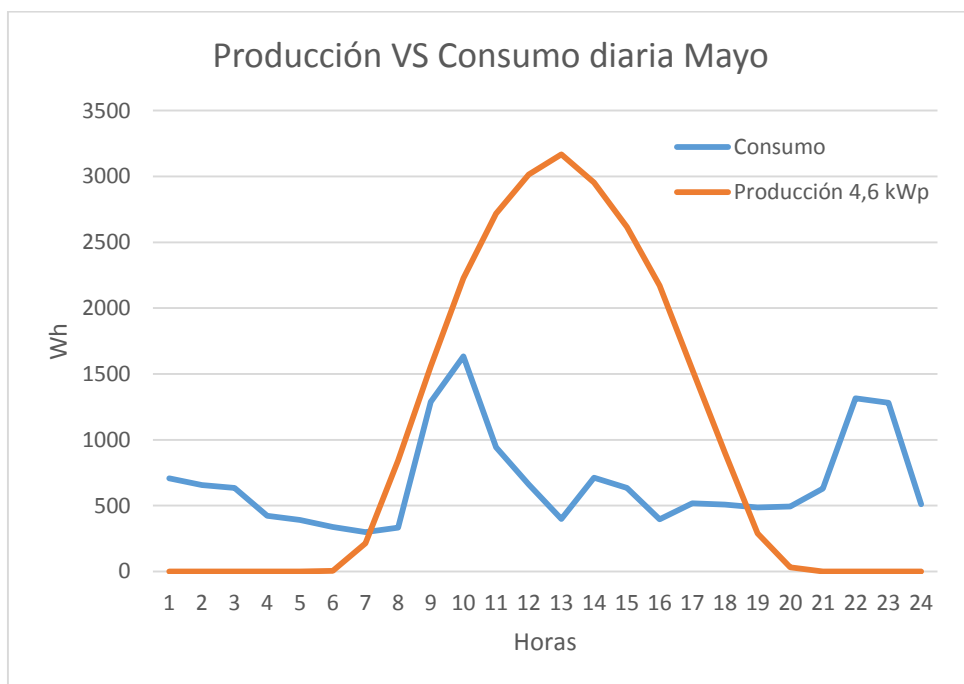


Figura 6.4 Gráfico consumo vs producción diaria Mayo.

He llegado a estos resultados después de comparar las horas de producción media diaria mes a mes para nuestro ejemplo estudiado.

Para nuestra vivienda de ejemplo existe un ahorro y coste de la energía consumida en función del número de bancales que instalemos, en las siguientes tablas calculo el abanico de posibilidades.

Nº Bancales	1	2	3	4	5
Ahorro Año (€)	49,25	100,32	146,38	184,22	223,44
Coste Año (€)	16,42	31,01	50,62	78,43	104,88

Tabla 6.1 Ahorro y coste de energía consumida de las placas y red respectivamente (parte1).

6	7	8	9	10
248,98	271,32	299,14	320,11	328,32
145,01	188,33	226,18	270,86	328,32

Tabla 6.1 Ahorro y coste de energía consumida de las placas y red respectivamente (parte2).

6.2 Conclusiones

Para nuestra vivienda ejemplo estudiada, el aumento del ahorro y coste se mantienen parejos hasta el tercer bancal, a partir de ahí vemos que el ahorro no aumenta en la misma medida que lo hace el número de bancales pero el coste sí crece en mayor medida.

Sí miramos desde el punto de vista de amortizar la instalación solar, la solución sería aquella en la que la diferencia entre lo que ahorramos en electricidad y lo que pagamos por mantener el bancal sea mayor, esa solución sería instalar cinco bancales. Éstos 5 bancales nos darían 118,56€ de amortización anual para nuestra instalación solar que de otra manera se perderían debido a que son excedentes de producción.

Pero debido al tamaño de los bancales, coste de adquisición y al espacio en la vivienda creo que una opción adecuada sería elegir entre 1 o 3 bancales, de esta forma se podría cultivar sin tener que mezclar especies y poder tener variedad.

7 Maceta 3D FDM Led

7.1 Introducción

Análogo al proceso de desarrollo del sistema led para el bancal, vamos a desarrollar una maceta con ayuda de la impresión 3D con la tecnología de modelado por deposición fundida 'MDF', integrando los leds en ella.

Ésta idea surge tras la problemática de espacio en la mayoría de las viviendas, pues no en todas hay sitio para instalar un bancal.

Al tener el tamaño de una maceta mediana, es evidente que no podremos comparar la producción a la del bancal, pero sí tendremos el beneficio en bienestar y sentirnos realizados al llevar adelante cualquier cultivo en ella.

Además otra idea es que el montaje de la maceta lo realicen personas en riesgo de exclusión social o algún otro problema como un proyecto social.

Sin perder de vista el medio ambiente intentaremos reducir la huella de carbono buscando fuentes de filamento reciclado.

7.2 Objetivos

A parte de las ideas mencionadas en la introducción, los objetivos hablando de forma técnica serían:

- Maceta impresa en 3D de forma íntegra (incluyendo disipador) a excepción del led y el circuito eléctrico, si no es posible buscar alternativa adecuada.
- Conseguir que la maceta sea estanca en la parte de la base para evitar fugas de agua con los riegos.
- Conseguir un diseño vistoso.
- Equilibrio entre luz adecuada para las plantas y de forma simultánea no moleste al ojo humano.

7.3 Impresión 3D MDF.

De forma breve explicaremos de qué trata ésta tecnología.

El modelado por deposición fundida 'MDF' es un proceso de fabricación que se basa ir creando capas de material. Las partes principales del 'hardware' son 3: la cama de impresión en la que se va añadiendo material para crear la pieza, el filamento del material que queremos

hacer la pieza y el cabezal de extrusión que se encarga de fundir el material y depositarlo sobre la cama⁵¹.

Los materiales imprimibles son termoplásticos tales como PLA, ABS, PET, PETG y muchos otros.

La temperatura de impresión o extrusión varía en función del material utilizado, para los materiales anteriores tienen un rango de 190 °C a 250 °C.

Para poder imprimir son necesarios 2 elementos atribuibles al 'software': un programa de 'CAD' para poder diseñar las piezas y un 'slicer' o cortador que se encarga de transformar la geometría de la pieza en trayectorias y coordenadas para que la impresora funcione. Con éste último programa podemos modificar los parámetros fundamentales de impresión como son: temperatura de impresión, temperatura de cama, altura de capa, grosor de pared, flujo del filamento, relleno, generación de soporte y refrigeración del extrusor.

Ésta tecnología puede imprimir cualquier geometría sin verse afectada por huecos o formas complejas y eso es una ventaja frente a otras tecnologías.

⁵¹ 3dz, 'Tecnologías de Impresión 3D', pp. 1-7 <<https://www.3dz.es/tecnologias-materiales/tecnologias-de-impresion-3d>> [accessed 22 March 2020].

8 Caracterización térmica de mezcla PLA-Cobre

8.1 Materiales

Uno de nuestros objetivos es fabricar la maceta utilizando impresión 3D sin recurrir a otros métodos para alguna parte de la pieza. Para ello en éste capítulo vamos a estudiar el comportamiento del filamento formado por una mezcla de PLA y cobre al 80 % que según el fabricante es apto para disipar calor.

El material en concreto es 'HTPLA cobre' de la empresa estadounidense Proto-Pasta.

Debido a que el fabricante no proporciona valores de conductividad térmica, vamos a realizar ensayos comparando con un disipador de aluminio cuyas características son:

- Disipador tipo peine.
- Resistencia térmica 'Rh-a' de 5,5 K/W
- Geometría cuadrada con 50 mm de lado y 15 mm de altura

Nota: aplicando la corrección por la orientación del disipador según la figura 4.10, la resistencia térmica corregida sería, $R_{h-a} = 6,32$ K/W.

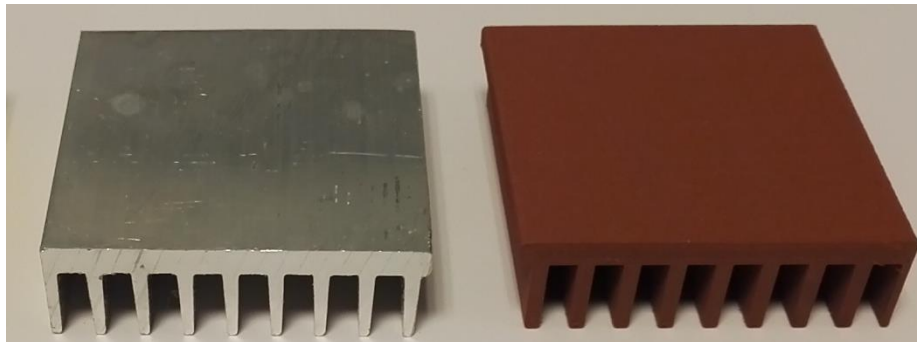


Figura 8.1 Comparativa disipador de aluminio extruido y de cobre PLA impreso.

Usando un led de eficiencia conocida, en este caso un led azul 455 nm modelo golden dragon de Osram, mostrado en versión rojo en la figura 2.7 de la página 19.

Siendo las características del led:

- Voltaje nominal 3,2 V
- Corriente nominal 350 mA
- Eficiencia a corriente nominal 40 %
- Resistencia térmica del led 'Rj-c' de 11 K/W

La idea es comparar ambos disipadores funcionando con el led a su potencia nominal (figura 8.2) y despejar la resistencia térmica del disipador de cobre y PLA. Para ello usaremos las ecuaciones 3 y 4 del apartado 4.4 (página 37).

Nota: Hay que tener en cuenta que el disipador impreso en cobre y PLA no debe acercarse en ningún punto los 60 °C pues es la temperatura de transición vítrea del PLA.

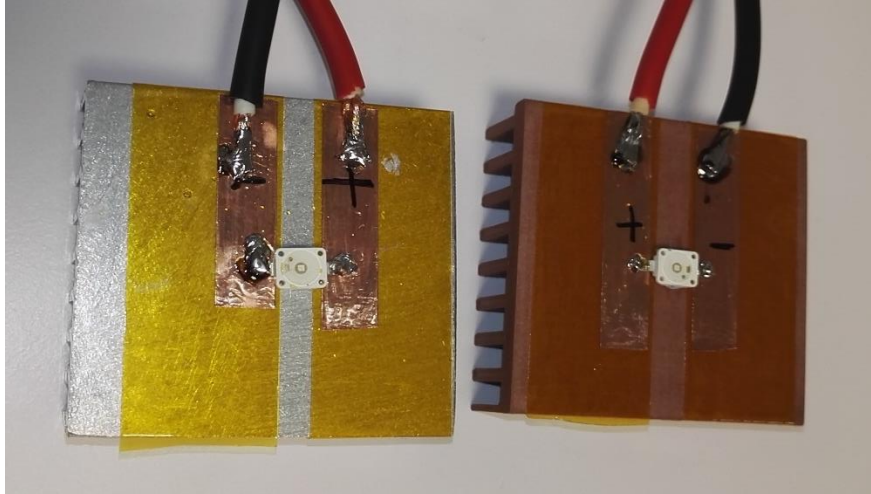


Figura 8.2 Disipadores de aluminio y de cobre-PLA impreso con led montado.

La fabricación del disipador impreso se ha encargado a una empresa externa, pues debido al alto coste del filamento de cobre hemos preferido diseñar y mandar imprimir la pieza, después tras hacer los ensayos correspondientes proceder o no a la compra del filamento.

El disipador impreso es una pieza maciza, no presenta huecos en su interior tan característicos de otras impresiones.

8.2 Toma de temperaturas ,cálculos y conclusiones.

De forma análoga al apartado 5.4.1 en el que hicimos un test de temperatura sobre distintos puntos del disipador, procedemos a encender el led y dejamos que la temperatura alcance una temperatura estacionaria, la cual se alcanza en 45 minutos.

- Para alimentar el led usaremos una fuente de laboratorio Velleman.
- Nos apoyaremos en una termo cámara para un mejor análisis térmico.
- Usaremos el mismo termopar del apartado 5.4.1 con una sonda tipo k, siguiendo el mapa de puntos de la figura 8.3.

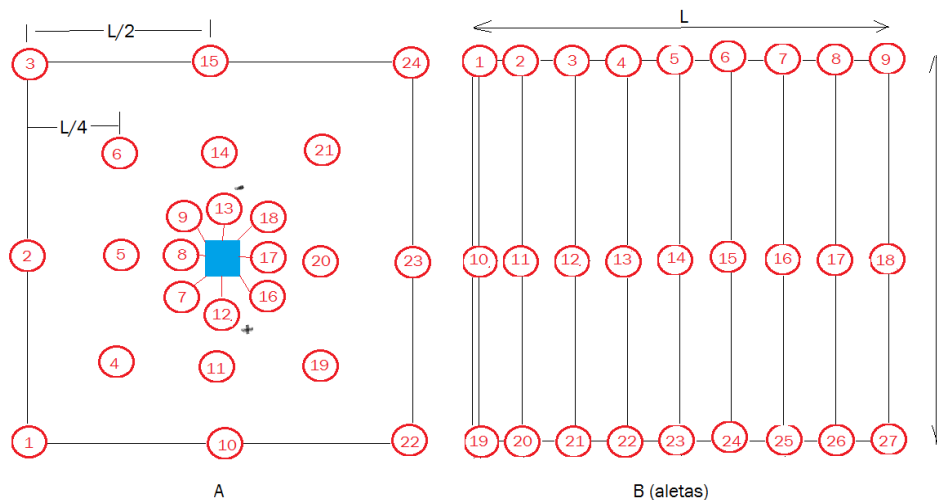


Figura 8.3 Mapa de medidas de temperatura dissipador tipo peine cuadrado.

Cálculos

Quedando recogidas las temperaturas en el caso del dissipador de aluminio en la tabla 8.1 y el del cobre-PLA en la tabla 8.2, con una temperatura ambiente 'Ta' de 23 °C y una temperatura en la unión calculada según la ecuación 3 adjunta en las tablas.

Usando la eficiencia conocida a potencia nominal, calculamos la potencia disipada 'Pd' igual que hicimos en la ecuación 6 a, con una 'Pd' de 0,672 W y éste valor es común para los dos casos comparados.

Por tanto las resistencias térmicas que intervienen en la ecuación 4 comunes a ambos dissipadores son: resistencia debida a la adhesión del led al dissipador ' R_{c-h} ' = 5 K/W (es un valor alto pero es normal viendo el montaje hay que ser conservadores) y resistencia del led ' R_{j-c} ' 11 K/W.

Por otro lado la resistencia del dissipador de aluminio es conocida y mencionada hace 2 páginas.

Aplicando la ecuación 4 nos queda una ' T_j ' teórica de 38 °C para el dissipador de aluminio y si la comparamos con la ' T_j ' calculada con la ecuación 3 a partir de las medidas de la tabla 8.1 vemos que casi es clavada a la teórica.

En el caso del dissipador de cobre debemos hacer los cálculos a la inversa para hallar el valor de ' R_{h-a} ' que es lo que estamos buscando en este ensayo, por tanto tomando la ecuación 3 y el valor de ' T_c ' tomado de la tabla 8.2 calculamos ' T_j ', esto da 58,9 °C. Ahora en la ecuación 4, de nuevo, ya solo tenemos una incógnita, calculando ' R_{h-a} ' del dissipador cobre-PLA da R_{h-a} = 37,42 K/W.

A	T (°C)	B (aletas)	T (°C)
1	28	1	30,1
2	28,4	2	30,2
3	28,6	3	30,2
4	28,8	4	30,1
5	29	5	30,1
6	29,1	6	30,2
7	29,4	7	30,1
8	29,8	8	30,1
9	30,1	9	30,1
10	28,4	10	29,6
11	29	11	29,7
12	30,5	12	29,8
13	31,5	13	29,9
14	29	14	29,9
15	29,3	15	30
16	29,5	16	29,9
17	29,6	17	29,8
18	29,6	18	29,7
19	29,3	19	29,3
20	29,7	20	29,6
21	29,5	21	29,5
22	28,4	22	29,6
23	29,1	23	29,4
24	28,9	24	29,5
Tj = 37,9 °C		25	29,6
		26	29,4
		27	29,5

Tabla 8.1 Temperaturas para disipador de aluminio.

A	T (°C)	B (aletas)	T (°C)
1	27,3	1	27,3
2	29,1	2	27,3
3	27,8	3	27,4
4	30,1	4	28,2
5	33	5	28,1
6	31,5	6	28,1
7	45	7	27,8
8	49	8	27,6
9	43,5	9	27,5
10	29,6	10	30
11	32	11	32,8
12	51,5	12	37,2
13	40	13	42,1
14	29,6	14	40
15	27,8	15	36
16	48	16	33
17	48,5	17	31
18	43,3	18	29,5
19	34	19	29,6
20	35,2	20	30
21	30,4	21	30,8
22	29,6	22	30
23	29,6	23	29,2
24	28,8	24	30
T _j = 58,9 °C		25	29,2
		26	29,2
		27	28,2

Tabla 8.2 Temperaturas para disipador impreso cobre-PLA

La celda de color amarillo es la temperatura del ánodo del led y es la que tomamos como temperatura de cápsula 'T_c' para hacer los cálculos de 'T_j'.

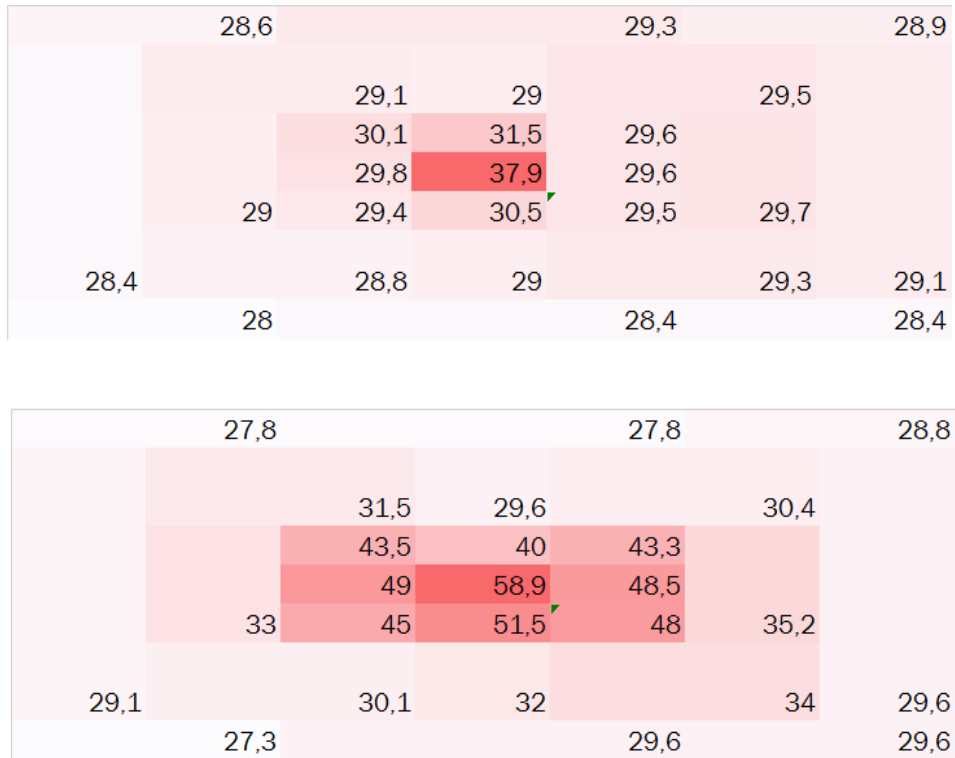


Figura 8.3 Mapa de temperaturas del dissipador de aluminio (arriba) y de cobre-PLA (abajo). Nota: todos los lados son iguales, es un cuadrado aunque se vea como un rectángulo.

Conclusiones

Todos estos cálculos anteriores se han explicado de forma rápida ya que al realizar el test de temperatura en el dissipador impreso se aprecia que no es apto para usarlo como dissipador, pues presenta características del PLA en mayor medida y eso es un material 'aislante'.

Podemos afirmar que tiene un comportamiento aislante por lo siguiente:

- Temperaturas cerca del led elevadas en comparación con el dissipador de aluminio (figura 8.3).
- Temperaturas en todo el dissipador de cobre-PLA nada uniformes, si nos fijamos en los extremos (figura 8.3) de éste dissipador la temperatura es menor que en el dissipador de aluminio, de ahí la no uniformidad de temperaturas.

Habíamos dicho que no tenemos que acercarnos a 60 °C en el dissipador de cobre-PLA y hemos estado cerca, otro punto negativo.

Debido a todo lo anterior, nos vemos obligados a desechar la opción de imprimir un dissipador, puesto que necesitaríamos un volumen demasiado grande para acercarnos al resultado del aluminio.

9 Caracterización de la estructura interna de impresión

Las piezas impresas están formadas 'churros' finos de material, en función de los parámetros de impresión existirán o no huecos entre esos cilindros.

9.1 Porosidad en impresiones 3D

Nuestro objetivo es imprimir una maceta en la que podamos introducir la tierra sin otro recipiente entre medias o con otra maceta pero con agujeros de drenaje, de tal forma que la maceta impresa actúa como cubeta para recoger el agua de riego sobrante.

Las piezas impresas están formadas por capas unas encima de otras, a parte de la porosidad que pueda tener los propios cilindros que forma cada una de esas capas, existe una porosidad debida a lo juntos que estén esos cilindros. Si damos un corte transversal a la dirección del cilindro, veremos algo parecido a circunferencias tangentes como en la figura 9.1.

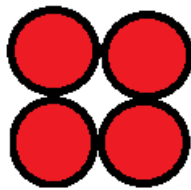


Figura 9.1 Dibujo de lo que sería un corte perpendicular a los cilindros.

La adherencia entre esos cilindros se produce en el punto de tangencia de las circunferencias y no es suficiente para garantizar que el agua fugue entre ellos. Esto daría como resultado una maceta que estaría perdiendo agua en forma de pequeñas gotas.

Para evitar fugas, modificaremos algunos parámetros de impresión o aplicaremos algún acabado en forma de resina o pintura.

9.2 Ensayo y solución propuesta

Una forma de tratar de poner freno a las fugas es aumentando la 'barrera' que se crea en cada tangencia de los cilindros, para ello tenemos que pasar de un punto a una línea.

Los parámetros que actúan sobre el tamaño y forma de los ‘churros’ son la ‘altura de capa’, ‘ancho de línea’ ambos en milímetros y ‘flujo de material’.

Nosotros nos centramos en el flujo.

Para hacer el ensayo vamos a imprimir tres probetas con forma de ‘L’ con 25 mm de lado y 4 mm de espesor cada una de ellas con un flujo del 100% 102% y 104%, con el resto de parámetros de impresión comunes:

- Altura de capa 0,2 mm
- Ancho de línea 0,4 mm
- Grosor de pared 1,2 mm
- 20 % de relleno
- Temperatura de impresión 205 °C
- Temperatura de cama 60 °C
- Velocidad de impresión 60 mm/s

Con los mismos parámetros que las probetas se imprimen tres recipientes (figura 9.2) de 35 mm de alto, 20 mm de diámetro y 2 mm de espesor de pared. Éstos serán llenados con agua para comprobar durante una semana si tiene fugas.



Figura 9.2 Recipiente impreso para pruebas.

Tras imprimir las probetas procederemos a su rotura con ayuda de alicates. Para observar mejor la estructura de impresión, es mejor que la rotura sea lo más frágil posible y evitar la fluencia, pues ésta deformaría los cilindros y dificultaría el análisis.



Figura 9.3 Foto del microscopio observando una probeta.

Para realizar la comparación usamos un microscopio digital de 200 aumentos con posibilidad de captura de imagen (figura 9.3).

En el caso del 100 % al hacer un corte transversal y observar al microscopio nos saldría una figura parecida a la 9.1 cuya correspondencia real se aprecia en figura 9.4.



Figura 9.4 Fotografía de una probeta con flujo de pared del 100 % y 0,4 mm ancho de línea.

En la anterior fotografía se aprecia como los ‘churros’ tienen una sección circular. En paralelo, el recipiente impreso con 100 % de flujo de pared comienza a ‘gotear’ agua a los pocos minutos.

Al aumentar el flujo de pared al 102 % tenemos el siguiente resultado:

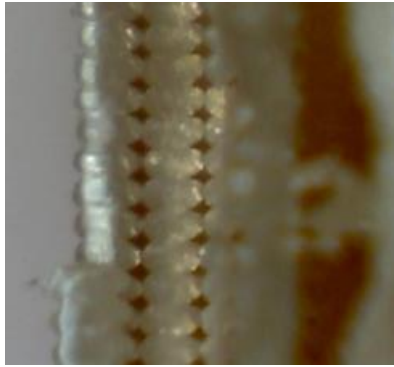


Figura 9.5 Fotografía de una probeta con flujo de pared del 102 % y 0,4 mm de ancho de línea.

En este caso observamos que la sección ya no es circular sino que es oval-achatada pasando de tener un punto de tangencia a un segmento que abarca casi toda la dimensión transversal del chorro. El recipiente impreso pasa la prueba y no pierde agua durante los 7 días de prueba.

Al aumentar el flujo de pared al 104 % tenemos el siguiente resultado:

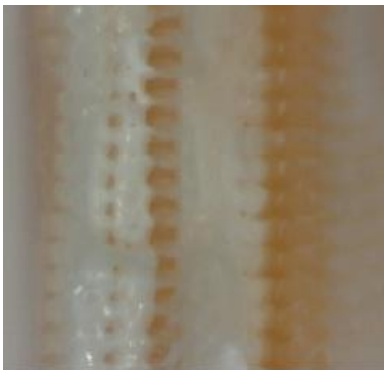
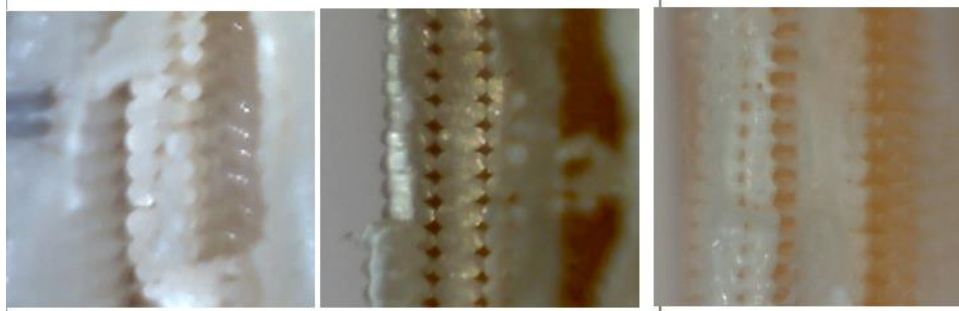


Figura 9.6 Fotografía de una probeta con flujo de pared del 104 % y 0,4 mm de ancho de línea.

Ahora apenas podemos distinguir los churros de impresión debido a que los huecos se han llenado del material extra. Los churros están más achatados que en el caso del 102 % aportando una seguridad extra. Como era esperado el recipiente también ha pasado la prueba y no pierde agua.

Juntando las tres imágenes para tener una idea mejor:



100 % a.l. 0,4 mm

102 % a.l. 0,4 mm

104 % a.l. 0,4 mm

Figura 9.7 Comparación distintas probetas.

A la vista de los resultados una solución válida sería imprimir con 104 % de flujo en la parte baja de la maceta para evitar fugas.

10 Desarrollo parte eléctrica y elección del led

10.1 Concepto inicial

Nuestra idea es alimentar la maceta con una fuente que proporcione de 5 a 10 vatios, a partir de ahí buscamos el circuito que se adapte a las fuentes existentes.

Se usará la tecnología de '*Surface mount device*' o SMD por varios motivos:

- Tamaño reducido.
- Recientes mejoras en eficiencia de este tipo de leds.
- Simplicidad de montaje, pueden adquirirse en grupos o '*array*' soldados a un circuito impreso de aluminio
- Posibilidad de montaje a medida del espectro pues existen desde monocromáticos hasta leds de espectro completo.
-

10.2 Búsqueda y selección del led adecuado.

En esta ocasión, en contra de lo que hablamos en el apartado 4.2, aquí no primará tanto el espectro del led sino el equilibrio entre la necesidad espectral de las plantas y la asimilación de esa luz por el ojo humano, esto es pensando en que la maceta puede estar colocada en un lugar en el que haya gente habitualmente, oficina, cocina, dormitorios y que esa luz sea molesta por los tonos rojizos o azulados.

Hay cuatro leds que usan la tecnología SMD y se ajustan a nuestras necesidades espectrales:

- Osram Duris S5 Púrpura.
- Osram Duris S5 Blanco 4000 K CRI 90.
- Osram OSOLON SSL 80 Rojo profundo 660 nm.
- Samsung lm301b Blanco 2700 K, 3000 K, 3500 K en CRI 80 o 90.

La potencia varía desde 0,3 vatios del primer led a los 0,7 vatios de los dos últimos.

Los criterios para seleccionar uno u otro serán:

- Equilibrio entre espectro fotosintético y espectro visible al ojo humano.
- Eficiencia térmica del chip.
- Disponibilidad a la hora de adquirir el led.

Espectro del led:

El Osram Duris S5 en la versión púrpura (figura 10.1) tiene un espectro similar al usado en los leds del bancal, dando como resultado una luz púrpura como se apreciaba en la figura 5.2, el espectro es adecuado para las plantas pues tiene máximos en las zonas más importantes para la fotosíntesis, pero al ojo humano resulta molesto, por ese motivo para la maceta no lo usaremos.

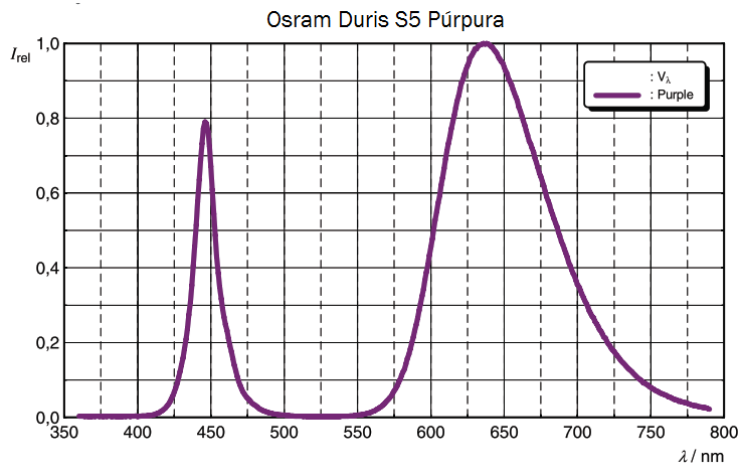


Figura 10.1 Curva espectral Osram Duris S5 púrpura⁵².

Comparando los Osram duris s5 4000 K 90 CRI (figura 10.2) con los Samsung LM301B en su versión 3500 K 90 CRI (figura 10.3) vemos que ambos tienen un máximo en la zona de rojo 630 nm y el Osram tiene máximos mayores en la zona azul 450 nm, que es positivo, y en la zona de amarillo 550 nm, lo que para el ojo humano es adecuado, por tanto ambos leds están equilibrados entre espectro fotosintético y visibilidad. En las siguientes páginas, para descartar uno u otro nos centraremos en su eficiencia.

⁵² OSRAM Opto Semiconductors, 'Gp Pslm31.14 Duris S5 Datasheet', 2018.

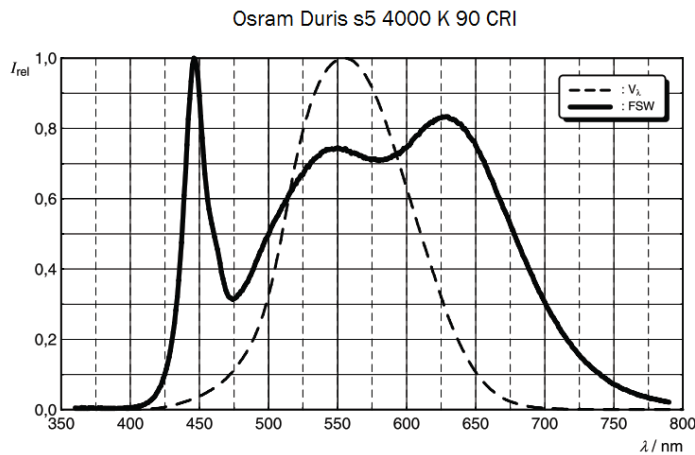


Figura 10.2 Curva espectral Osram Duris S5 púrpura⁵³.

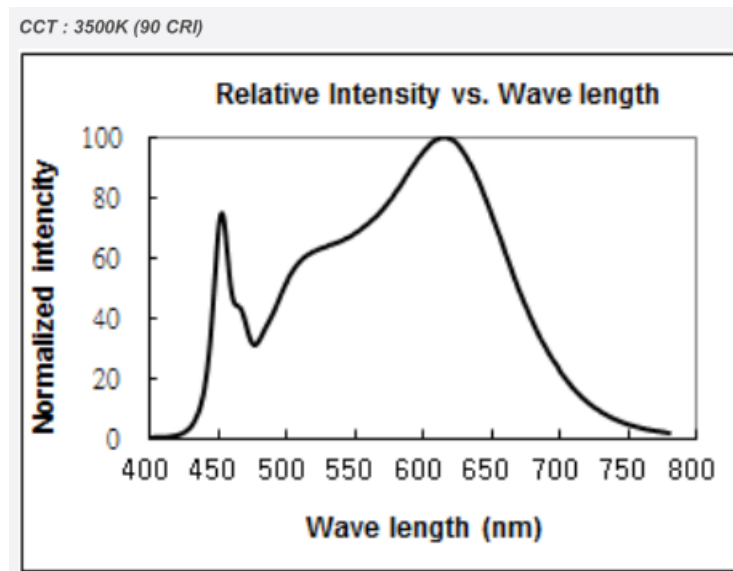


Figura 10.3 Curva espectral Samsung LM301B 3500 K 90 CRI⁵⁴.

Ante la posibilidad de no encontrar stock disponible de las versiones anteriores, pues es algo normal en leds con alto índice de reproducción cromática o CRI, vamos a plantear alternativas.

Podemos ir a versiones con valores de 80 CRI con temperaturas del color desde 2700 a 3500 Kelvin mostrados de la figura 10.4 a 10.6. Estos leds también tienen máximos en la zona de azul 450 nm pero tienen los máximos de la zona roja muy próxima a los 600 nm, que es rojo anaranjado, para suplir éstas carencias de rojos haremos uso de leds monocromáticos con máximos en la zona de rojo lejano o profundo con 660 nm figura 10.4.

⁵³ OSRAM Opto Semiconductors, 'Gw PsIr31.Fm Duris S5 Datasheet', 2018.

⁵⁴ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B CRI 90 Datasheet', 2020, 1-26.

Entre las tres versiones de 80 CRI presentadas a continuación elegiremos la temperatura de 3500 Kelvin, pues presenta un máximo en azul 450 nm mayor que las otras dos versiones. Por lo que la opción principal sería mezclar leds de 3500 Kelvin y monocromáticos de 660 nm.

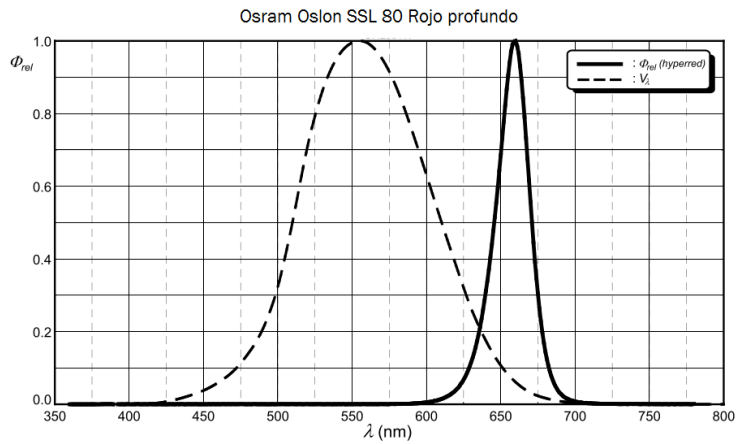


Figura 10.3 Curva espectral Osram Oslon SSL 80 Rojo profundo y curva de respuesta del ojo humano⁵⁵.

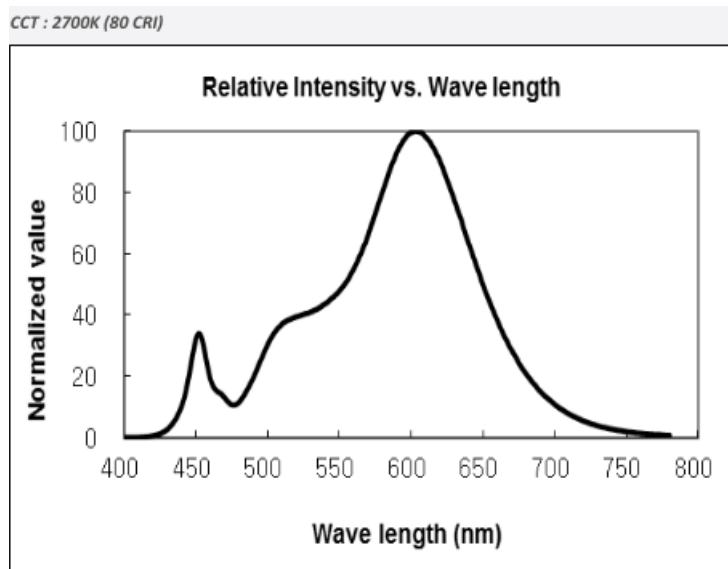


Figura 10.4 Curva espectral Samsung LM301B 2700 K 80 CRI⁵⁶.

⁵⁵ OSRAM Opto Semiconductors, 'Datasheet Version 1 . 4 LH CP7P Oslon Ssl 80 660 Nm', 2015.

⁵⁶ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B CRI 80 Dataasheet', 1-26.

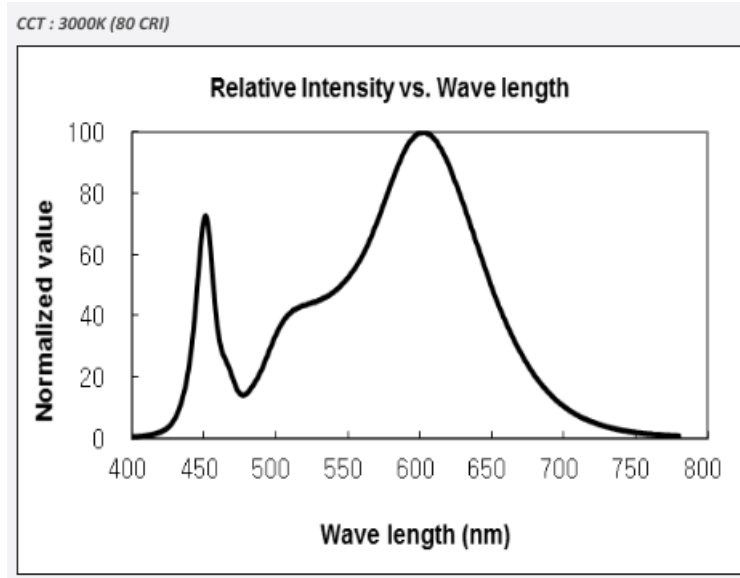


Figura 10.5 Curva espectral Samsung LM301B 3000 K 80 CRI⁵⁷.

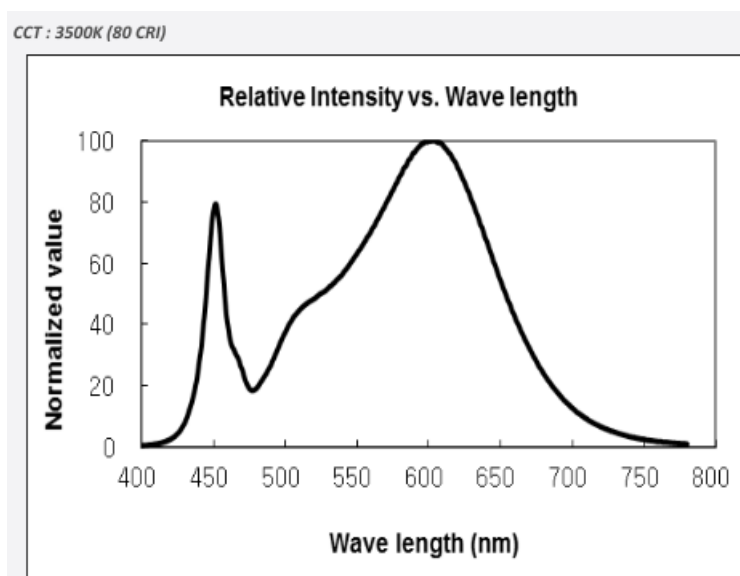


Figura 10.6 Curva espectral Samsung LM301B 3500 K 80 CRI⁵⁸.

Eficiencia térmica del chip:

Está ligada a la resistencia térmica, cuanto menor sea esta, mayor será la eficiencia.

Es un dato proporcionado por el fabricante conocido como 'Rj-c', los valores para los chips analizados son los siguientes:

- Osram Duris S5 Púrpura Rj-c: 9,1 K/W
- Osram Duris S5 Blanco 4000 K CRI 90 Rj-c: 9,9 K/W

⁵⁷ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B CRI 80 Dataasheet'.

⁵⁸ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B CRI 80 Dataasheet'.

- Osram OSOLON SSL 80 Rojo profundo 660 nm Rj-c: 9,6 K/W
- Samsung lm301b Blanco 2700 K, 3000 K, 3500 K en CRI 80 o 90 Rj-c: 7,5 K/W

El primer led ya lo descartamos por su espectro molesto. Como observamos los Samsung son más eficientes que los Osram, por tanto usaremos Samsung en su versión de 3500K 90 CRI y de no encontrar suministros iremos a la misma temperatura del color pero 80 CRI con mezcla de rojo profundo 660 nm de Osram.

10.3 Diseño parte eléctrica y fuente de alimentación.

Para los Samsung LM301B tenemos un voltaje de 2,7 a 2,8 V y una corriente de 65 a 200 mA⁵⁹.

En el caso del Osram de 660 nm tenemos un voltaje de 2,1 a 2,6 V y una corriente de 100 a 1000 mA⁶⁰.

Nos queremos ajustar a una potencia de 5 a 10 vatios. Consultando las fuentes disponibles en el catálogo del fabricante Mean Well para ese rango tenemos las fuentes APC-8 que cuentan con protección frente al polvo y ligeras salpicaduras pues es de grado IP-42⁶¹.

Sus características eléctricas son:

Entrada

230 voltios de corriente alterna.

Salida

Voltaje ajustable de forma automática de 6 a 11 V.

Intensidad de corriente 700 mA.

Potencia máxima de 7,7 vatios⁶².

Debido a que la corriente de alimentación es pequeña, en el mercado existen opciones de circuitos impresos o 'arrays' con los leds de Samsung montados en paralelo, de ésta forma se suma la intensidad hasta conseguir un valor estándar para las fuentes de alimentación.

⁵⁹ Samsung Opto-Electronics, 'LM301B CRI 90 Datasheet'.

⁶⁰ OSRAM Opto Semiconductors, 'Datasheet Version 1 . 4 LH CP7P Oslon Ssl 80 660 Nm'.

⁶¹ MEAN WELL EUROPE B.V., 'APC-8 Datasheet', 15885 (2020), 3-5.

⁶² Stock and others.

Para nuestra fuente necesitamos un circuito con 7 leds en paralelo y así cada uno recibiría 100 mA.

Una opción es montar 3 módulos, de 7 leds cada uno, en serie (figura 10.7). Nos quedaría un voltaje requerido de 3 veces el valor nominal, en total 8,1 V con una intensidad de 700 mA. Ajustándose al rango de la fuente y nuestra potencia deseada.

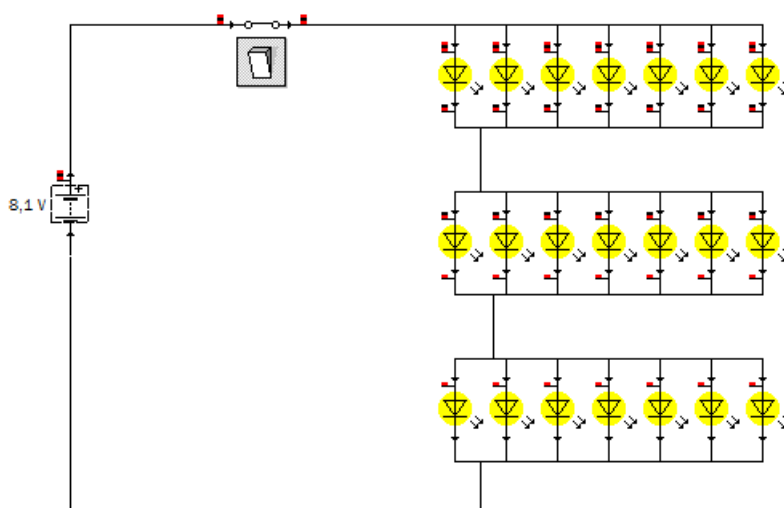


Figura 10.7 Esquema eléctrico circuito serie-paralelo (A) realizado con Crocodile v3.5.

Hay dos posibles circuitos en función de los leds utilizados. El circuito A con 3 módulos Samsung (figura 10.7) y el B con mezcla de 2 Samsung y 2 Osram rojos (figura 10.8). En el último el voltaje se reduce ya que el led rojo de Osram necesita 2,3 V y no 2,7 V como los Samsung.

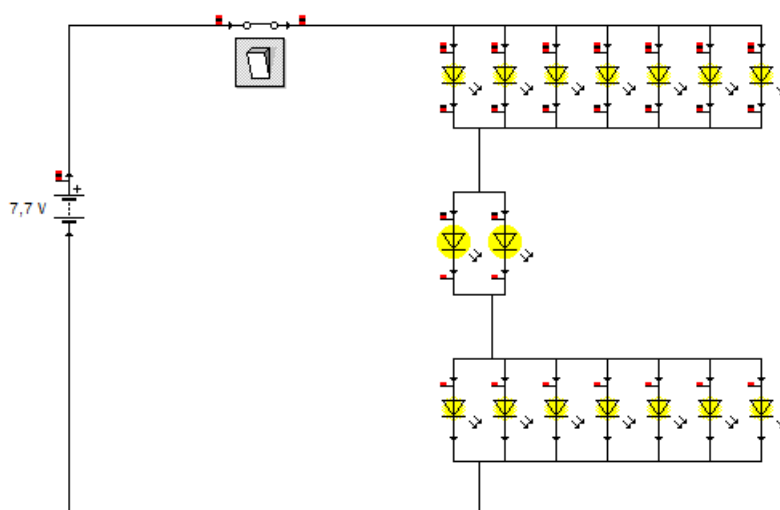


Figura 10.8 Esquema eléctrico circuito serie-paralelo (B) realizado con Crocodile v3.5.

10.4 Dimensionado del disipador.

En este caso el dimensionado del disipador se hará de manera distinta al apartado 4.4, ahora usamos las tablas proporcionadas por fabricantes de disipadores para elegir uno en función de la potencia disipada.

La eficiencia de los Samsung ronda el 60 % y la del Osram el 50 %, la potencia disipada en forma de calor sería:

$$Pd = 0,4 \times 2,7 \text{ (V)} \times 700 \text{ (mA)} \times 3 = 2,268 \text{ W} \quad (9a)$$

$$Pd = 0,4 \times 2,7 \text{ (V)} \times 700 \text{ (mA)} \times 2 + 0,5 \times 2,3 \text{ (V)} \times 700 \text{ (mA)} = 2,317 \text{ W} \quad (9b)$$

Para el circuito A corresponde la ecuación 9a y para el B la 9b.

El disipador va montado dentro de una parte de la maceta, por eso tenemos que sobredimensionarlo para compensar el efecto de tapón que hace la maceta sobre éste.

Elegimos un disipador de aletas tipo peine, en concreto con unas dimensiones de 80x36x15 mm que según el fabricante es capaz de disipar 16 vatios⁶³.

⁶³ Shoptronica S.L., 'Disipador Peine 100x15' <<https://www.shoptronica.com/>> [accessed 5 February 2020].

11 Diseño 3D, prototipos, ensamblaje y ajustes.

En éste apartado vamos a mostrar capturas de pantalla de los modelos diseñados en Inventor y fotografías de los distintos prototipos.

11.1.1 Versión 1.0

La primera versión llega tras desechar bastantes otras por temas estéticos, consta de 3 partes principales: cubeta, brazo, foco.

La cubeta (figura 11.1) sólo tiene un componente y se encarga de alojar la maceta y de soportar el brazo que sostiene el foco led.

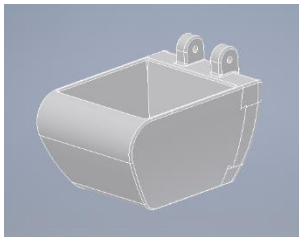


Figura 11.1 Cubeta versión 1.0.

El brazo se compone de 2 piezas similares, una parte corta (figura 11.2^a) y otra larga (figura 11.2b).

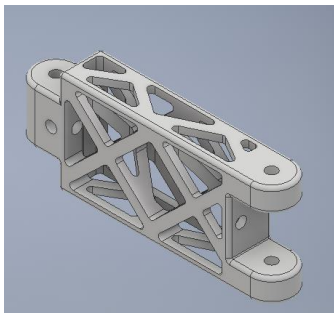


Figura 11.2^a Brazo parte 1.

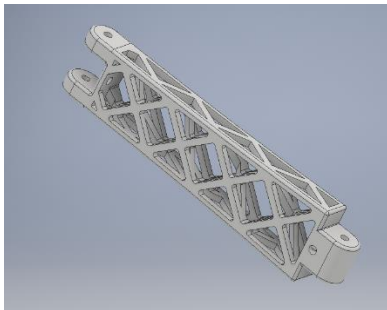


Figura 11.2b Brazo parte 2.

El conjunto con el foco incluido se ve en la figura 11.3:

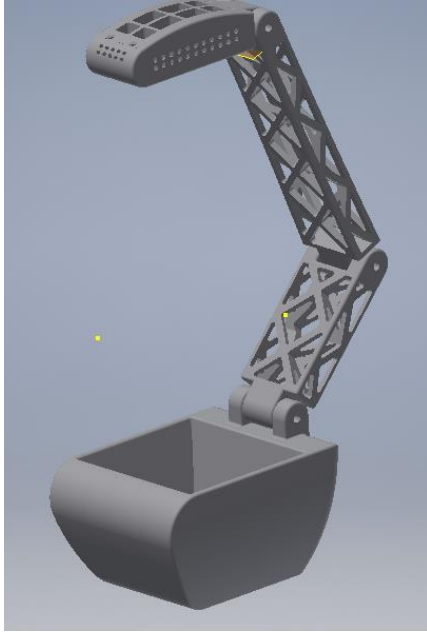


Figura 11.3 Diseño maceta v1.0.

11.1.2 Versión 1.1

Esta versión solo cambia el tamaño de la cubeta (figura 11.4) para poder introducir una maceta cuadrada estándar

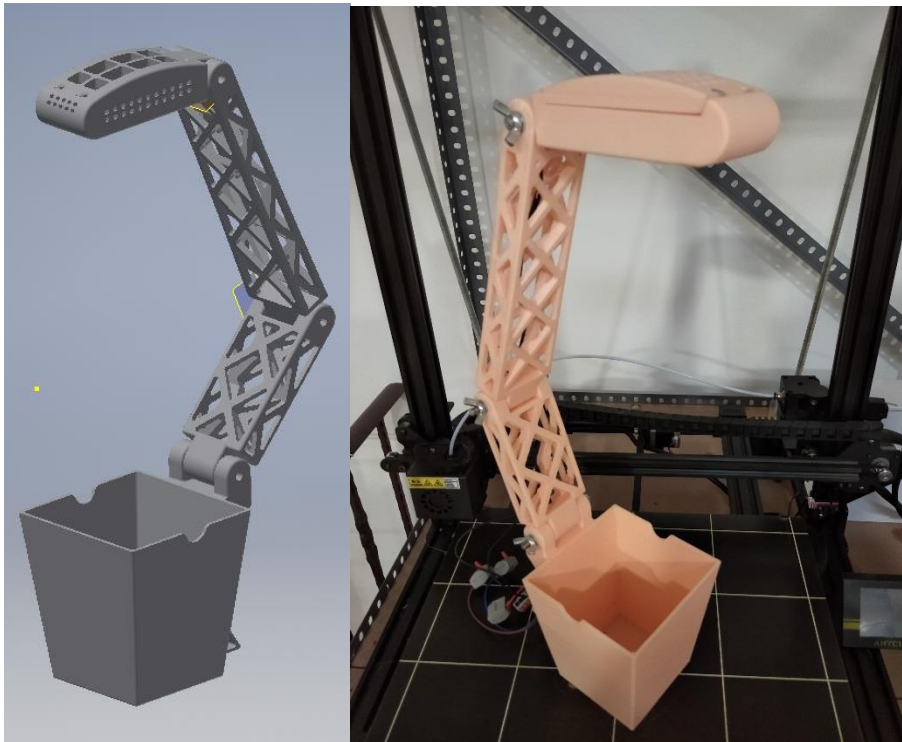


Figura 11.4 Maceta v1.1.

11.1.3 Versión 2.0

La segunda versión presenta una estética nueva, contando de 4 partes; cubeta, poste o pilar, soportes y el foco.

El ensamblaje de las distintas partes se hace con tornillos M5x20 cabeza avellanada, atornillados en los insertos roscados de las piezas.

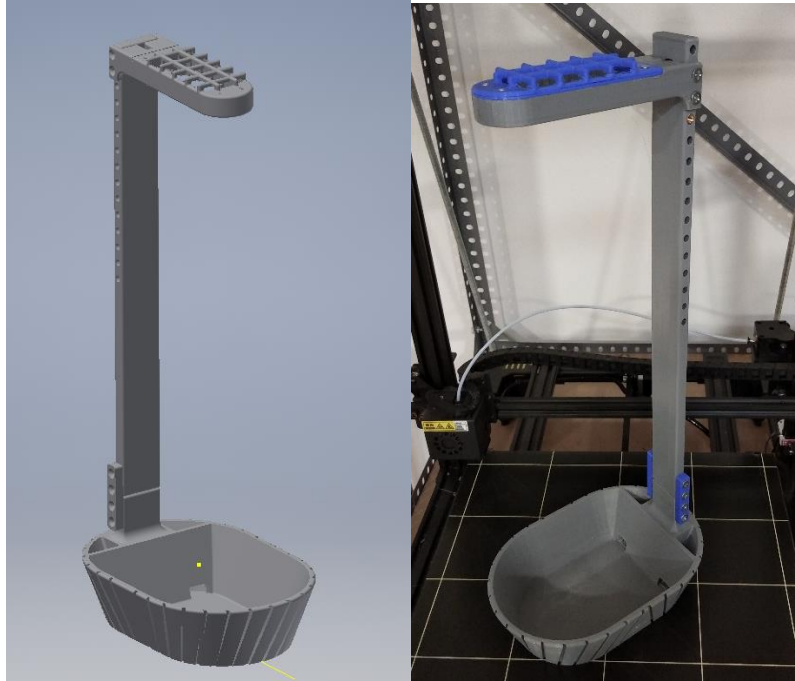


Figura 11.5 Maceta v2.0.

En esta versión (figura 11.5), la cubeta tiene dos agujeros para regar, comunicados con el fondo, con la idea de poner un material poroso en éste, que absorba el agua y después la planta por capilaridad tome lo necesario.

El material poroso puede ser gomaespuma, es un material que forma parte de muchos tipos de sofás, cojines, colchonetas etcétera. Este material puede obtenerse de la reutilización de los anteriores objetos nombrados como forma de contribuir a la limpieza del medio ambiente.

11.2 Ensamblaje del led

El prototipo de maceta montará encajado dentro de ella un disipador con tantos leds como aparecen en la figura 10.7 ó 10.8.

11.2.1 Materiales y herramientas utilizadas.

- 1 unidad Mean Well APC-8-700.
- 2 unidades 7 Samsung LM301B 3500 K 80 CRI.
- 1 unidad Osram Oslon SSL 80 660 nm.
- 3 almohadilla térmica autoadhesiva.

- 50 cm varilla roscada M6.
- 2 metros cable rígido unipolar de aluminio 1mm.
- 4 conectores rápidos.
- Estaño.
- Tubo termoretráctil.
- Enchufe de 3 polos con cable de 1 metro.
- Isopropanol 99,99%.
- Papel absorbente.

También se ha hecho uso de las siguientes herramientas:

- Lima.
- Sierra de mano para metal.
- Alicates.
- Tijeras de electricista.
- Estañador.
- Guantes de nitrilo.

11.2.3 Ensamblaje

Procedemos de forma análoga al apartado 5, ésta parte es común a todas las versiones de maceta.

En este caso el montaje se simplifica en comparación al led del bancal, pues ahora los chips son muy pequeños y para su anclaje al disipador solo usamos una almohadilla térmica autoadhesiva.

Después del pegado, procedemos a montar las conexiones eléctricas. En los chips de Samsung solo hay que pelar el cable e introducir, pues tienen unos conectores a presión. Para los chips de Osram tenemos que dar un punto de estaño para soldarlo.

Cableamos la maceta por los huecos dejados con la impresión y conectamos la fuente de alimentación que está en el exterior.

11.3 Ajustes

Debido al efecto aislante que ejerce el material impreso sobre el disipador, tras realizar mediciones de temperatura, nos hemos visto obligados a realizar ajustes en la geometría de la pieza que encaja el disipador.

Estos ajustes se basan en practicar diversos agujeros en las zonas que están en contacto con el disipador para facilitar el flujo de aire o crear ranuras rodeándolo.

En los apartados 11.1.1 a 11.1.3 se muestran las macetas con los ajustes en la parte del foco.

12 Conclusiones

Hemos conseguido diseñar y fabricar una luminaria led con un espectro adaptado a la fotosíntesis, que estimula los principales pigmentos de las hojas, como son la clorofila a, b y los carotenoides.

Haciendo un dimensionado adecuado del disipador de calor, hemos solucionado la parte más crítica que afecta a la duración del led como es la gestión térmica. Usando los datos y simuladores que los fabricantes ponen a nuestra disposición, hemos podido seleccionar el led más eficiente.

Conseguimos fabricar dos prototipos impresos con tecnología 3D, en este caso nos hemos enfrentado a la porosidad resultante del proceso de impresión. Mediante un análisis, descartamos materiales calificados como aptos (por el fabricante) para disipar calor, ello llevó a tener que ajustar la geometría de la pieza para alojar un disipador de aluminio en su interior.

Nuestra maceta puede imprimirse con PLA o PET-G indistintamente, pudiendo hacer uso de PLA que provenga del reciclaje de piezas fallidas o PET-G de botellas de bebidas recolectadas en el campus.

Ha quedado demostrado que el uso de bancales en viviendas o centros con energía solar puede ser una para aprovechar los excedentes de producción.

13 Líneas de futuro

En la parte de la luminaria led, las líneas de investigación futura podrían ir enfocadas a montar otros chips más eficientes que los actuales. Durante la realización del trabajo, el fabricante Osram ha anunciado una nueva gama de leds monocromáticos, los cuales en algunas variantes de rojo lejano (660nm) alcanzan el 80 % de eficiencia. Al mejorar la eficiencia no solo reducimos el consumo energético sino que requerimos un disipador menor y por tanto más barato.

También centrados en la parte del led, se podría desarrollar una luminaria igual pero cambiando los chips actuales, que son específicos de horticultura, por otros con una temperatura del color de 4000 K y CRI 97, ya que los fabricantes están centrándose en mejorar los espectros en estos leds para que se comporten mejor en horticultura y así no tener el problema de molestias con la luz púrpura.

Si se dispusiera de recursos suficientes, sería adecuado probar los bancales con distintos leds y cultivar mismas variedades para poder hacer una comparativa más práctica.

En cuanto a la parte de impresión 3D, las líneas futuras irán enfocadas a probar materiales que puedan cumplir la función del aluminio en los disipadores y así poder imprimir de forma íntegra la maceta.

Uno de nuestros objetivos era realizar una labor social, mediante el uso de los bancales en residencias de mayores o aprovechar el montaje de las macetas en centros de reinserción. Finalmente, este objetivo le dejaremos para trabajos futuros de otros compañeros, colaborando en cualquier problemática que pudiera surgir.

Bibliografía

- 3dz, 'Tecnologías de Impresión 3D', pp. 1–7 <<https://www.3dz.es/tecnologias-materiales/tecnologias-de-impresion-3d>> [accessed 22 March 2020]
- B.V., Lumileds Holding, 'LUXEON SunPlus', 2018
- Carr, W. N., and G. E. Pittman, 'One-Watt GaAs p-n Junction Infrared Source', *Applied Physics Letters*, 1963 <<https://doi.org/10.1063/1.1753837>>
- Citiled, 'CLU058-3618C4', 2017, 1–15
- Co, Citizen Electronics, 'Horticulture Series PRB and PW COB', pp. 1–14
- , 'Horticulture Series PW', pp. 1–14
- Instruments, Apogee, 'OWNER ' S MANUAL UNDERWATER QUANTUM METER Models MQ-510', 435, 2020
- Kroemer, Herbert, 'The Double-Heterostructure Concept: How It Got Started', *Proceedings of the IEEE*, 2013 <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2274914>>
- 'LED', *The American Heritage Science Dictionary*, 2005
- LedBox.es, and LedBox.es, 'La Gestión Térmica de Los Leds' <www.Ledbox.es> [accessed 1 August 2019]
- LEDgrowLightsHQ, 'Chlorophyll & Other Photosensitives', 2015 <<http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>> [accessed 3 August 2019]
- Luminus Decives, Inc., 'Generation 1 HortiLum COB LED Series', 2018, 1–12
- Management, Thermal, Bridgelux Vero, and Series Led, 'Application Note AN30 Thermal Management for Bridgelux Vero Series LED Arrays', 92 5, 2013
- MEAN WELL EUROPE B.V., 'APC-8 Datasheet', 15885 (2020), 3–5
- Mechatronix, 'CoolStar ® 67 Designer LED Star Cooler Ø67mm Features & Benefits', 818
- , 'Modular Passive Star LED Cooler Ø70mm Features & Benefits Modular Passive Star LED Cooler Ø70mm Product Details', 818
- , 'Modular Passive Star LED Cooler Ø86mm Modular Passive Star LED Cooler Ø86mm Product Details', 818
- Méndez, Alfoso, 'Disipadores Térmicos Para Dispositivos Electrónicos', 2016, 17
- Moreno, Ivan, and Ching-Cherng Sun, 'Modeling the Radiation Pattern of LEDs', *Optics Express*, 2008 <<https://doi.org/10.1364/oe.16.001808>>
- Müller, E, C Stiewe, D Rowe, and S Williams, 'Precision Thermal Conductivity

- Measurements of Materials', in *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*, 2006, pp. 26-8-26–29
- Nannini, Jessica B., *The Nobel Prize in Physics 2014 – Press Release* (nobelprize, 2014)
- OSRAM Opto Semiconductors, 'Datasheet Version 1 . 4 LH CP7P Oslon Ssl 80 660 Nm', 2015
- , 'Gp Pslm31.14 Duris S5 Datasheet', 2018
- , 'Gw Pslr31.Fm Duris S5 Datasheet', 2018
- , 'Lr W5sm', 001 (2018), 1–22
- Round, H. J., and H. J. Round, 'A Note on Carborundum', *Electrical World*. 19: 309
- S.L., Disipa Heat, 'Cátalogo Disipa Heat SL'
- S.L., Shoptronica, 'Disipador Peine 100x15' <<https://www.shoptronica.com/>> [accessed 5 February 2020]
- Samsung Opto-Electronics, 'LM301B', *LM301B Datasheet*, 2018, 1–27
- , 'LM301B CRI 80 Dataasheet', 1–26
- , 'LM301B CRI 90 Datasheet', 2020, 1–26
- Schubert, E. Fred., *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, 2003)
- Segura, César, 'PFC_cesar_segura_antunez', *Proyecto Final de Carrera*, 2014
- Shoptronica.com, 'LED MULTICHIP 100W', 2010 <www.shoptronica.com> [accessed 3 August 2019]
- Stock, In, In Stock, In Stock, In Stock, In Stock, and In Stock, 'ELG-100-C ELG-100-C', 15885 (2018)
- Success in Research: First Gallium-Nitride LED Chips on Silicon in Pilot Stage*
- Tools, Amprobe Test, '34XR-A Digital Multimeter Data Sheet'
- UNI-TREND TECHNOLOGY CO., LTD, 'UT320D-English-Manual'
- www.osram.com, 'Horticulture Lighting with LEDs', November, 2016, 42