



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FINAL DE CARRERA

TITULO DEL TFC: Caracterización de mini paneles fotovoltaicos con iluminación monocromática

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad en Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: David Doménech Salgado

DIRECTOR: Sandra Bermejo Broto

FECHA: 7 de Mayo del 2008

Título: Caracterización de mini paneles fotovoltaicos con iluminación monocromática.

Autor: David Doménech Salgado.

Director: Sandra Bermejo Broto

Fecha: 15 de Abril del 2008

Resumen

En este trabajo se aborda el estudio y caracterización de células y paneles solares. El objetivo es conocer la respuesta de estos elementos fotovoltaicos al ser iluminados con luz monocromática, cuantificando los cambios en cuanto a eficiencia fotovoltaica que se producen al ser iluminados con una longitud de onda determinada.

Para llevar a cabo este objetivo se deberán obtener los conocimientos teóricos básicos sobre el funcionamiento, composición y estructura de las células solares, así como los parámetros necesarios para su estudio y caracterización. Para la iluminación de las células solares utilizamos LEDs de alta potencia de diferentes longitudes de onda, seleccionamos los LEDs monocromáticos de color verde, azul y rojo, además del color blanco. La elección de estos componentes no es trivial, hemos escogido aquellos con las características de directividad y potencia lumínica que se adecuan a nuestros requisitos. Al tratarse de elementos de alta potencia nos vemos obligados a realizar el diseño de una placa de control o driver para poder alimentar correctamente dicho dispositivo, además de diseñar la placa que contendrá al propio LED.

Se realizarán las medidas del espectro de emisión, y se cuantificará la irradiancia que emiten los LEDs. Se ha observado que la disipación que realizábamos únicamente con la placa de cobre se manifiesta insuficiente ya que se produce una significativa deriva térmica en la respuesta del LED. Finalmente, ajustando la alimentación del LED a un valor en que la temperatura del dispositivo no sea un elemento que influya en los resultados, se han realizado las medidas de la respuesta corriente-tensión de los mini paneles fotovoltaicos sometidos a la luz de los diferentes LEDs. Al tener obleas de diferente grosor podemos comprobar empíricamente como la respuesta de las células solares varía con la longitud de onda.

Title: Little photovoltaic panel characterization under monochromatic light.

Author: David Doménech Salgado

Director: Sandra Bermejo Broto

Date: May , 7th 2008

Overview

This project deals with the study and characterization of photovoltaic cells and panels by focusing on the performance of these photovoltaic devices under monochromatic light. We will measure the conversion efficiency depending on the light wavelength.

To achieve this objective we would need to get the basic theoretical knowledge about photovoltaic cells operation, composition and structure. As well as the technical parameters needed to study and characterized it.

We illuminate the photovoltaic cells by using high power Led's. We use cool white and three monochromatic Led's, which are royal blue, green and red. We choose the ones which have a specific radiation pattern and luminous performance in accordance with our requirements. Because of the high driving current Led's values we have to redesign the working point in order to minimize the heat dissipation.

At the next point of our project we have measured the spectral power distribution and determine also the Led's irradiance. We have noticed that the cooper plate is not able to dissipate heat enough in order to maintain a correct light output, which depends on the temperature.

Finally, we managed to obtain the right driving current to carry out with the voltage-current measurements of the photovoltaic mini panels. We compared cell output depending on the minipanel thickness. In conclusion, we proved that cells output changes with light wavelength.

INDICE

INTRODUCCIÓN	4
CAPITULO 1. BASES TEÓRICAS	6
1.1. El espectro solar.....	6
1.2. Introducción a los semiconductores.....	7
1.2.1. Teoría atómica clásica.....	7
1.2.2. Bandas de energía	8
1.2.3. Clasificación de materiales.....	9
1.2.4. Unión PN	10
1.3. La célula solar.....	11
1.3.1. Principio de funcionamiento	11
1.3.2. Característica corriente tensión.....	13
1.3.3. Estructura de la célula solar.....	16
1.4. Panel solar.....	17
1.4.1. Paneles UPC	18
CAPITULO 2. DISEÑO	19
2.1. LEDs.....	19
2.1.1. Requisitos	19
2.1.2. Elección	20
2.1.3. Características técnicas	21
2.2. Placa de control y del LED	22
2.2.1. Descripción y diseño	22
2.2.2. Componentes	24
2.2.3. Layout y montaje	25
CAPITULO 3. MEDIDAS.....	28
3.1. Espectro de emisión diodo LED	28
3.2. Medidas sobre diodo calibrado.....	30
3.2.1 Deriva térmica.....	30
3.2.2 Cálculos de irradiancia	32
3.3. Medidas en paneles solares.....	34
3.3.1. Procedimiento.....	34
3.3.2 Medidas de una única célula solar	35
3.3.3 Comparativa entre células de diferente grosor	38
3.3.4 Medida de paneles o células en serie.....	39
CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	45

INTRODUCCIÓN

En la constante evolución hacia la obtención de fuentes de energía renovables más eficientes y competitivas la energía fotovoltaica esta situada a la cabeza en cuanto a investigación, desarrollo e innovación. Como pequeña aportación, en este proyecto se busca cuantificar la eficiencia de mini paneles fotovoltaicos iluminados con luz monocromática de diferentes longitudes de onda. Para realizar la iluminación utilizaremos LEDs de alta potencia. Estos dispositivos se encuentran cada vez más presentes en la vida cotidiana debido al menor consumo que producen, su mayor comercialización y expansión en usos domésticos ha ido en aumento a medida que el coste de fabricación disminuía. Actualmente están presentes desde el alumbrado vial, como son semáforos y otras señales luminosas, hasta en los faros de los automóviles. Por tanto, los elementos protagonistas de nuestro proyecto, LEDs y paneles solares, son dispositivos en desarrollo y expansión, característicos del avance tecnológico del siglo XXI, que favorecen el desarrollo sostenible y el cuidado del medio ambiente.

Se ha dividido el trabajo en tres bloques. En el primer capítulo se realiza el estudio teórico de las células y paneles solares. Se inicia con una introducción a los semiconductores, siguiendo con la sucesión de conceptos necesarios para comprender el proceso por el que un semiconductor pn (estructura básica de una célula solar) es capaz de generar una corriente útil al ser iluminado. Este fenómeno denominado fotogeneración, por el cual un fotón se convierte en un par electrón-hueco, es fundamental en el estudio de las células fotovoltaicas. Además se detallarán los parámetros necesarios para la caracterización y estudio de estos dispositivos.

En el segundo capítulo se realiza el diseño de los componentes necesarios para la posterior realización de las medidas. Se buscarán fuentes de iluminación o LEDs, de alta potencia, que emitan en luz blanca y en los colores rojo, verde, azul y blanco. Deberán ser poco directivos para facilitar la homogeneidad de la iluminación. Al tratarse de elementos de alta potencia que pueden ser alimentados con corrientes del entorno de 1 amperio, nos vemos obligados a realizar el diseño de una placa de control con elementos capaces de soportar estas corrientes. Además diseñaremos también una placa individual que contendrá al LED. Ambas placas se diseñaran utilizando el software Orcad.

Finalmente, en el tercer capítulo, se realizarán las medidas del espectro de emisión, y se cuantificará la irradiancia que emiten los LEDs, proceso en el que se observarán los efectos que la temperatura tiene sobre estos dispositivos. El led monocromático de color rojo tiene una relación salida lumínica -temperatura más sensible que el resto, la cual nos limitará la corriente con la que se realizarán las medidas a 500mA. Una vez determinados estos parámetros mediremos la salida de células y paneles fotovoltaicos, enfatizando en la comparación de la respuesta de dispositivos de diferentes grosores, de 5 o 10 micras.

CAPITULO 1. BASES TEÓRICAS

1.1. El espectro solar

La distribución espectral de la energía procedente del sol se extiende en una región de longitudes de onda que abarca desde aproximadamente 300nm a 4 μ m, correspondiente a la distribución desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

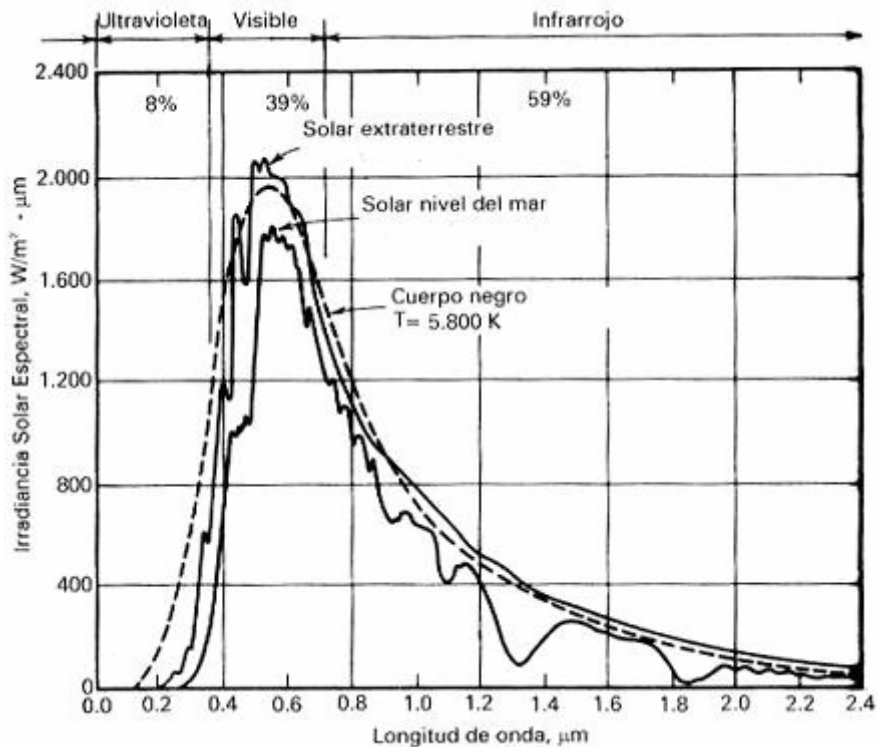


Fig. 1.1 Espectro de emisión solar.

Para el correcto estudio se diferencian dos espectros, el espectro solar extra-atmosférico, denominado AM0 y el espectro para aplicaciones terrestres, denominado AM1.5. En el gráfico también se muestra con una línea discontinua el espectro de emisión de un cuerpo negro de $T=5800^{\circ}K$, que es la temperatura aproximada de la superficie del sol. Este espectro es muy similar al espectro AM0.

El espectro AM 1.5 se utiliza para todas las medidas y calibraciones necesarias para células y módulos terrestres, mientras que el espectro AM0 es el que se usa en aplicaciones espaciales.

El gráfico nos muestra la densidad espectral de potencia, vatios por unidad de superficie y longitud de onda. Como se puede observar se concentra una mayor energía en la zona correspondiente a las longitudes de onda del espectro visible, desde los 0'38 μ m del violeta a los 0'74 μ m del color rojo.

La magnitud que mide la radiación solar como la energía por unidad de tiempo y área es la irradiancia (W/m^2), valor que obtendremos al integrar la densidad espectral de potencia respecto λ en todo el espectro.

Esta medida realizada en el exterior de la atmósfera, conocida como constante solar, indica un valor promedio de $1360 \text{ W}/\text{m}^2$, válido para el espectro AM0.

No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, es por este motivo que la irradiancia del espectro utilizada para medidas terrestres es de un valor menor que la constante solar. Al incorporar las bandas de absorción de la atmósfera el valor de irradiancia para el espectro AM1.5 es de $827 \text{ W}/\text{m}^2$, normalizada hasta $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

1.2. Introducción a los semiconductores

1.2.1. Teoría atómica clásica

Tal y como describe el modelo atómico de Bohr, los electrones se encuentran orbitando alrededor del núcleo atómico. Estos electrones tienen una energía determinada que varía dependiendo del nivel energético en el que se encuentren.

Cada electrón ocupa un estado cuántico, y dentro de cada nivel energético existe un número finito de estados cuánticos. Los electrones ocupan los estados energéticos más bajos.

El Silicio es el material semiconductor más utilizado en la fabricación de células solares, este material posee 14 electrones por átomo, estos ocupan los niveles cuánticos denominados $1s - 2s - 2p - 3s$ y parcialmente $3p$.

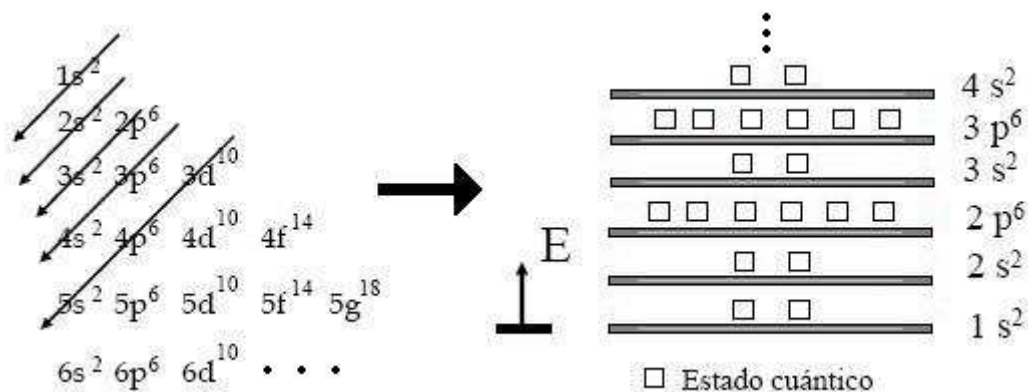


Fig. 1.2 Estados cuánticos de energía de un átomo.

La última capa, la número 3, posee cuatro electrones y faltan también cuatro electrones para completarla. Cuando los átomos de Silicio se unen unos a otros comparten los electrones de las últimas capas con los átomos vecinos formando enlaces covalentes, muy estables y fuertes. Estas agrupaciones se llevan a cabo de forma ordenada dando lugar a un sólido de estructura cristalina.

1.2.2. Bandas de energía.

Las agrupaciones de niveles en un cristal se conocen como bandas de energía. De la misma forma que los últimos niveles energéticos en un átomo definen las propiedades químicas de éste, las últimas bandas de energía definen las propiedades electrónicas de un cristal.

La última banda de energía ocupada totalmente por electrones recibe el nombre de banda de valencia, mientras que la primera banda que esta total o parcialmente vacía se conoce como banda de conducción. Estas bandas están separadas por una energía denominada energía de gap.

$$E_{GAP} = E_C - E_V \quad (1.1)$$

Denominamos E_C el borde de energía inferior en la banda de conducción y E_V el borde de energía superior en la banda de valencia.

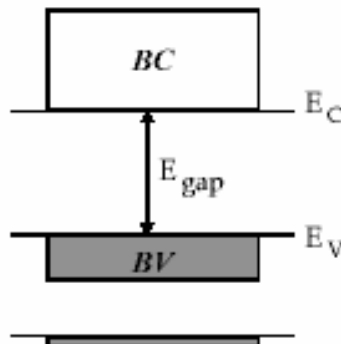


Fig. 1.3 Representación gráfica de las bandas de energía.

La unidad para cuantificar la energía de gap es el electronvolt (eV), que se corresponde con la cantidad de energía ganada por un solo electrón cuando este es sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio.

$$1eV = 1'602 \cdot 10^{-19} J$$

1.2.3. Clasificación de materiales.

No todos los cristales dan lugar a unas bandas de energía con la disposición adecuada para que el material tenga propiedades semiconductoras. Puede suceder que la energía de gap sea cero, entonces tenemos un conductor, o puede que sea tan elevada, superior a 4 eV, que el número de electrones con energía suficiente para liberarse de los átomos sea nulo en la práctica, entonces tenemos un material aislante. Para el resto de casos intermedios tenemos un semiconductor.

En la práctica, a una temperatura de 300K, la energía de gap del Silicio es de 1'12 eV, mientras que para un material aislante como es el Diamante la E_g es de 5eV.

En el material semiconductor algunos electrones tendrán energía suficiente para abandonar la capa de valencia. A estos electrones libres se les denomina electrones propiamente. A los enlaces que han dejado vacíos se les denomina huecos. Ambos son portadores de carga, mientras los electrones lo son en la banda de conducción, los huecos se comportan como partículas con cargas positivas en la banda de valencia.

Así pues, obtenemos una de las principales características de los semiconductores, ya que la conducción es debida tanto a los electrones como a los huecos que se mueven en sentido contrario.

Cuando un semiconductor se encuentra en equilibrio térmico, no está perturbado y se encuentra a una temperatura estable, la concentración de portadores no cambia con el tiempo y no existen corrientes netas de portadores. Esta concentración de portadores de carga, en equilibrio térmico, depende directamente de la E_{gap} , a menor energía de gap, mayor número de portadores, ya que la energía necesaria para que un electrón pase a la banda de conducción es menor.

Los semiconductor intrínsecos son semiconductores ideales con una estructura cristalina perfecta y constituidos únicamente por átomos de semiconductor sin perturbaciones exteriores, en estos materiales la concentración volumétrica de electrones y huecos por cm^3 es la misma.

1.2.3.1. Semiconductor extrínseco.

En un semiconductor extrínseco la concentración de electrones no es igual a la de huecos, logrando este desequilibrio gracias a la introducción de impurezas dopantes, que son átomos introducidos dentro del semiconductor expresamente. Estas impurezas pueden ser de dos tipos:

Impurezas donadoras, son aquellas que introducen un electrón más que el resto de átomos que constituyen la red, por lo que entregarán fácilmente ese

electrón a la banda de conducción ionizándose positivamente con una carga $+q$. Al dopar un semiconductor con impurezas donadoras tendremos un semiconductor **tipo N**, en el que el electrón será el portador mayoritario y el hueco el minoritario.

Impurezas aceptoras, son aquellas que introducen un electrón menos que el resto de los átomos que constituyen la red, estos átomos tendrán un hueco en la banda de valencia, por lo que serán capaces de captar un electrón ionizándose negativamente, creando la aparición de un hueco en la red, siendo estos los portadores mayoritarios. Tendremos un semiconductor **tipo P** al doparlo con impurezas aceptoras.

1.2.4. Unión PN

La unión PN consta de un único cristal de material semiconductor, que está dopado para producir material de tipo n en un lado y de tipo p en el otro, es imprescindible que no se interrumpa la red cristalina entre ambos materiales para conseguir la extracción de corriente del semiconductor. Al unir ambos cristales, se manifiesta una difusión de electrones del cristal n al p, y una difusión opuesta de huecos. Los electrones dejan tras de sí una carga fija positiva mientras que los huecos dejan tras de sí una carga fija negativa. Las cargas fijas aparecen en una zona a ambos lados de la unión, zona que se conoce como zona de carga espacial. A medida que progresa el proceso de difusión, la zona de carga espacial va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión.

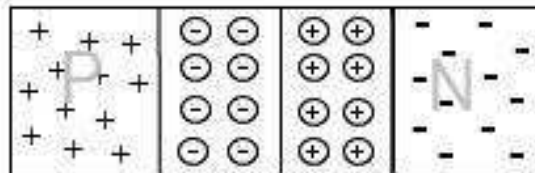


Fig. 1.4 Representación gráfica de la z.c.e de una unión PN.

En esta región de unión de los dos materiales se ha creado un campo eléctrico que se hace cada vez más grande a medida que los huecos y los electrones continúan difundándose hacia lados opuestos. El proceso continúa hasta que el potencial eléctrico alcanza un tamaño que impide la posterior difusión de electrones y huecos.

Cuando se alcanza este equilibrio se habrá creado un campo eléctrico permanente en un material sin la ayuda de campos eléctricos externos.

1.3. La célula solar

1.3.1. Principio de funcionamiento

La célula solar es básicamente una unión p-n cuya superficie es expuesta a la luz. Cuando este semiconductor es iluminado, inciden fotones con una energía que vendrá determinada por la frecuencia de estos.

$$E_f = h \cdot f \quad (1.2)$$

Al entrar en contacto con el semiconductor el fotón puede ser absorbido o propagarse a través del material dependiendo de la frecuencia del fotón y de las características del semiconductor. Será absorbido produciendo **fotogeneración** si la energía del fotón es mayor o igual a la energía de gap. En el caso de que la energía incidente sea mayor que la energía de gap, el sobrante se traducirá en calor que se disipará en el semiconductor.

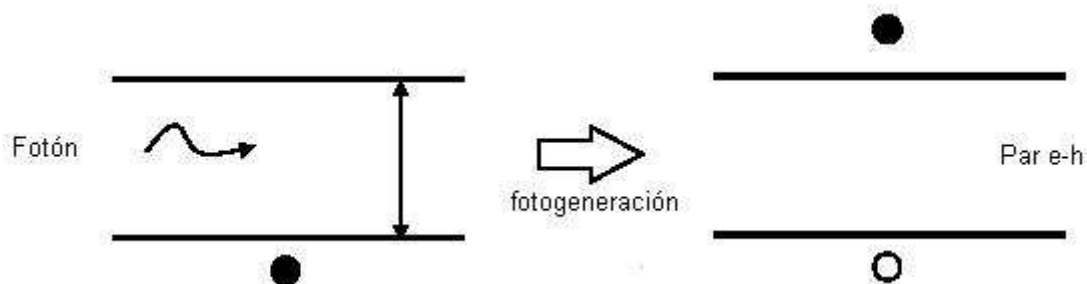


Fig. 1.5 Representación esquemática de la fotogeneración.

En la práctica, si el semiconductor tiene una energía de gap pequeña tendrá mayor parte del espectro aprovechable, pero se aprovecha de peor forma, ya que toda la energía recibida superior a la energía de gap se transformará en calor. Los semiconductores que cumplen con esta situación de compromiso optimizando el proceso de fotogeneración son aquellos que tienen una energía de gap alrededor de 1 eV.

El valor de la fotogeneración $G_L(x)$ se expresa en pares e-h/cm²·s y depende de la absorción que se produzca y del flujo de fotones incidentes.

El valor de flujo de fotones incidentes lo obtendremos a partir del valor de la densidad espectral de potencia $I(\lambda)$;

$$\Phi_0 = \frac{I(\lambda) \cdot \lambda}{19.8} 10^6 \quad (1.3)$$

Obtenemos el resultado en fotones/cm²·µm·s, con la irradiancia espectral $[I(\lambda)]$ en W/m²·µm y la longitud de onda en micras.

1.3.1.1 Coeficiente de absorción

Dentro de la estructura del material el flujo de fotones incidente $\phi_T(x=0)$ disminuye de forma exponencial a medida que se van absorbiendo.

$$\phi_T(x) = \phi_T(x=0) \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (1.4)$$

Por tanto, a una distancia x de la superficie del material el flujo de fotones dependerá del coeficiente de absorción (α), el valor del cual dependerá a su vez del material utilizado y de la longitud de onda λ de la luz incidente.

Es por esta razón que el grosor necesario para obtener un mismo porcentaje de absorción variará dependiendo del material semiconductor que estemos utilizando y de la longitud de onda incidente.

Las longitudes de onda menores presentan un mayor coeficiente de absorción, por lo que el flujo de fotones será absorbido totalmente en la parte superior del material, mientras que para longitudes de onda largas, como por ejemplo la del color rojo (620-740nm), se necesitará un mayor grosor del mismo material para que se absorba el mismo número de fotones.

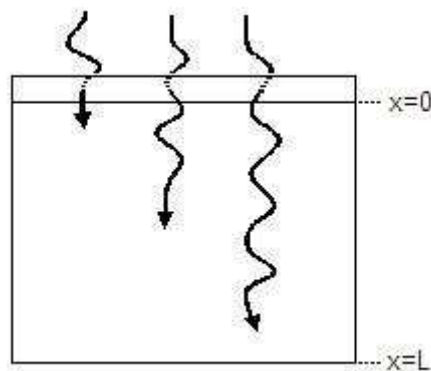


Fig. 1.6 Absorción para longitud de onda corta, media y larga.

Por ejemplo, para un haz de luz monocromática de color rojo, longitud de onda de 627nm, cuyo coeficiente de absorción para el Silicio es de $3'55 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$, el grosor del sustrato semiconductor necesario para obtener una absorción del 50% es de:

$$\frac{\phi_T(x=L)}{\phi_T(x=0)} = \frac{\phi_T(x=0) \cdot e^{-\alpha \cdot L}}{\phi_T(x=0)} = e^{-\alpha \cdot L} = 0'5 \rightarrow L = -\frac{\ln(0'5)}{\alpha} \text{ (cm)} \quad (1.5)$$

Luego una célula de silicio deberá tener un grosor mínimo de $0,2 \mu\text{m}$ para que se produzca una absorción del 50% de fotones procedentes de una luz monocromática de color rojo.

Si deseamos un 99% de absorción de luz roja el grosor necesario de la célula de silicio deberá ser el siguiente:

$$L = -\frac{\ln(0'01)}{3'55 \cdot 10^3} = 13 \mu\text{m} \quad (1.6)$$

En el caso del color verde, con una longitud de onda de 530nm y un coeficiente de absorción de $9'27 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$, tendremos una absorción del 99% para un grosor de $4'95 \mu\text{m}$. Por último para el caso de la luz de color azul, con una longitud de onda de 470nm y un coeficiente absorción para el silicio de $2'18 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$, conseguiremos un 99% de absorción para un grosor de $2'10 \mu\text{m}$.

1.3.2. Característica corriente tensión

La célula solar completa tiene una característica que es el resultado del comportamiento en oscuridad e iluminación de las diferentes regiones del dispositivo.

La característica de una célula en oscuridad coincide con la de un diodo de unión, ya que la principal diferencia entre ambos dispositivos es el contacto metálico superior que en el caso de célula presenta forma de rejilla, diseñada de tal forma que la luz pueda penetrar en el semiconductor.

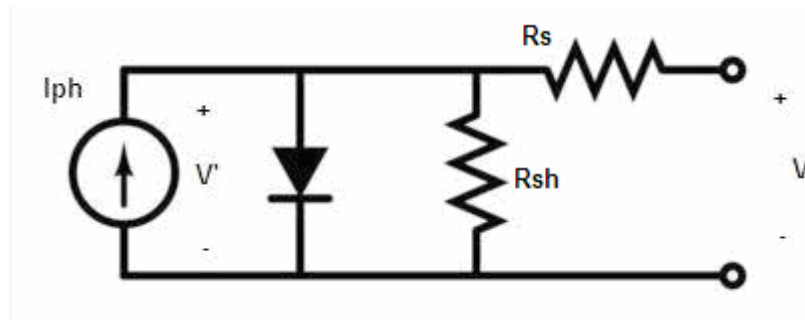


Fig. 1.7 Circuito equivalente de una célula solar.

Del análisis del circuito equivalente simplificado, considerando una célula solar ideal con resistencia serie (R_s) nula y resistencia paralelo (R_{sh}) infinita, la expresión de corriente de salida resulta,

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (1.7)$$

Donde I_{sc} corresponde a la corriente de cortocircuito, en sustitución de la corriente fotogenerado I_{ph} , las cuales coinciden en el caso ideal. El término negativo corresponde a un diodo ideal con una corriente inversa de saturación

I_{sc} , es la corriente saliente de la célula solar por el lado p en condiciones de cortocircuito, se conoce simplemente como corriente de cortocircuito y es una magnitud fundamental en las características de una célula solar.

La característica corriente-tensión de una célula solar iluminada, representada en el primer cuadrante, es la siguiente:

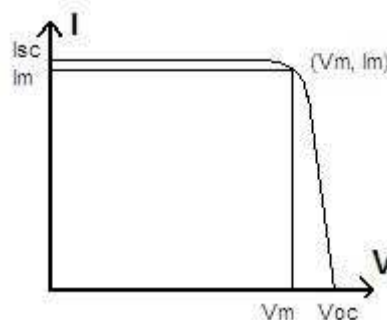


Fig. 1.8 Característica corriente-tensión de una célula iluminada

Considerando la figura anterior se presentan tres puntos de interés: cortocircuito, circuito abierto y punto de máxima potencia.

En cortocircuito obviamente no tenemos diferencia de potencial. $V=0$ y $I=I_{sc}$. La corriente será nula en circuito abierto, $I=0$. Despejando la fórmula de la corriente de salida mostrada al inicio obtenemos la tensión de circuito abierto, que es otra magnitud fundamental para el estudio de la célula solar.

$$V_{oc} = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad (1.8)$$

1.3.2.1 Parámetros fotovoltaicos.

Punto de máxima potencia. El producto corriente por tensión es positivo en todo el primer cuadrante, el valor máximo de este producto es un parámetro característico de las células solares.

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (1.9)$$

Fill-Factor (FF). El factor FF es un número sin dimensiones que cuantifica la relación que hay entre la potencia máxima y la potencia que sería generada por una hipotética célula solar cuya característica corriente-tensión fuera un rectángulo perfecto de lados I_{sc} y V_{oc} .

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1.10)$$

Eficiencia de conversión. La eficiencia o rendimiento de conversión es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica capaz de hacer operar un circuito, se define como el cociente entre la potencia máxima entregada por la célula solar y la potencia recibida del sol. Se indica la potencia incidente (P_{in}) en w/m^2 , y el área de la célula (A) en m^2 .

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot P_{in}} \quad (1.11)$$

Respuesta espectral (RE). Es el cociente entre la densidad de corriente de cortocircuito y la densidad espectral de potencia incidente para una longitud de onda determinada. Esta magnitud indica en qué longitudes de onda es más eficiente la célula solar en términos absolutos.

$$SR(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (\text{A/W}) \quad (1.12)$$

Eficiencia cuántica (QE). Es el cociente entre el número de portadores colectados y el número de fotones incidentes para una longitud de onda determinada. Es una magnitud sin dimensiones. La eficiencia cuántica se corresponde también con la eficiencia de colección de las diferentes longitudes de onda en términos relativos.

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)} \quad (1.13)$$

Se relaciona la eficiencia cuántica con la respuesta espectral de la siguiente manera.

$$SR(\lambda) = q \frac{\Phi_0(\lambda)}{I(\lambda)} QE(\lambda) \quad (1.14)$$

1.3.3. Estructura de la célula solar.

La célula solar es una unión pn, que hace posible la aparición de un campo eléctrico que separa los pares eh: los huecos los dirige hacia el contacto del lado p lo que provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto metálico inferior; los electrones los dirige hacia el contacto del lado n. Esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior, haciendo de la célula un generador fotovoltaico.

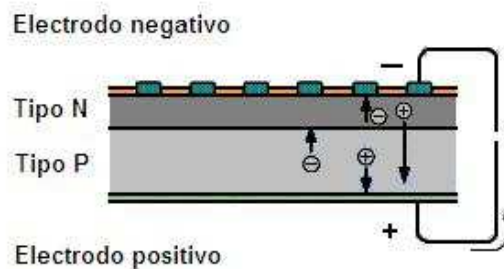


Fig. 1.9 Estructura de una célula solar.

Los contactos metálicos superficiales, conocidos como malla de metalización frontal, son necesarios para extraer la corriente eléctrica de la célula. El metal es un material opaco a la luz, por lo que el contacto frontal no puede cubrir totalmente la superficie de la célula. Puede pensarse entonces que el contacto frontal debe ser lo más pequeño posible, pero si se hace excesivamente pequeño la resistencia serie (R_s) aumenta y esto significa una pérdida de eficiencia de la célula. Ha de llegarse a una solución de compromiso para que la superficie del contacto frontal sea lo suficientemente baja para permitir el paso de la luz del Sol y lo suficientemente alta para que la resistencia serie de la célula sea tolerable.

La resistencia serie es un parámetro a tener en cuenta en el estudio de las células solares, ya que además de condicionar el rendimiento individual de un solo dispositivo, lo hará cuando asociemos en serie varias células (Ver [1]).

1.4. Panel solar

Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células. Estas células se conectan en serie si el objetivo es aumentar la tensión de salida, para aplicaciones domésticas usualmente se utilizan 12V o 24V. Si en vez de tensión queremos obtener una mayor corriente de salida en el dispositivo se conectan las células solares en paralelo.

Silicio cristalino y Arseniuro de Galio (compuesto de galio y arsénico) son la elección típica de materiales para células y paneles solares. Los cristales de Arseniuro de galio son creados especialmente para uso fotovoltaico, mientras que los cristales de silicio se utilizan principalmente para el consumo de la industria microelectrónica. El silicio policristalino tiene una menor eficacia de conversión pero también menor coste.

1.4.1. Paneles UPC

Los paneles solares utilizados en las medidas realizadas en este proyecto han sido fabricados por el grupo MNT. Estos paneles son de reducido tamaño ($<1\text{cm}^2$) porque están diseñados para ser utilizados, entre otras cosas, como generadores de energía de sistemas autónomos. Estos mini paneles utilizan tecnología SOI (Silicon on insulator), que es una tecnología de fabricación microelectrónica en la que se sustituye el sustrato tradicional compuesto de silicio monocristalino por otro compuesto de capas de silicio-aislante-silicio. Esta técnica reduce la capacidad parásita, mejorando las prestaciones de los circuitos integrados. El aislante empleado suele ser típicamente dióxido de silicio.

Se han fabricado paneles solares con un grosor de 5 y 10 micras.



Fig. 1.10 Foto de una oblea de mini paneles solares.

CAPITULO 2. DISEÑO

2.1. LEDs

2.1.1. Requisitos

Para someter a los paneles solares a luz monocromática utilizaremos dispositivos LED, Light Emitter Diode, pero deberemos elegir aquellos que más se adecuen a nuestros requerimientos.

Los LEDs tradicionales, como los mostrados en la imagen inferior, utilizados en electrónica básica, tienen un reducido tamaño, el envoltente de plástico oscila entre los tres y cinco milímetros. Es por esta razón que sería necesario un pequeño array de estos semiconductores para cubrir toda la superficie de los paneles fotovoltaicos. En caso de utilizar un array es imprescindible que los LEDs sean poco directivos para garantizar la homogeneidad de la luz incidente sobre los paneles. Encontramos en este punto una primera condición a la que no se adecua este modelo de LED, ya que el ángulo de visión se encuentra entre los 30° del diagrama de radiación de la imagen, hasta los 60° en algunos casos. Consideramos que con las características expuestas podríamos encontrar puntos del panel solar con una iluminación menor, suponiendo un inconveniente a la hora de realizar las medidas.

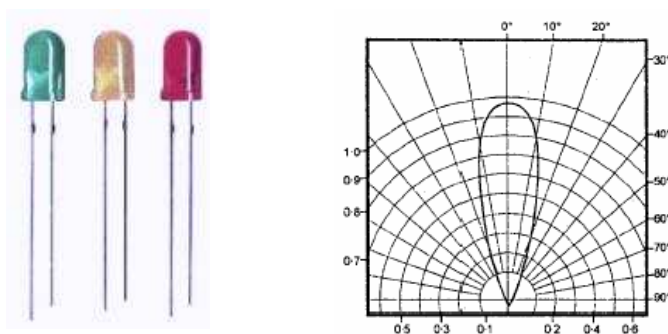


Fig. 2.1 Imagen y diagrama de radiación de LEDs tradicionales

El LED seleccionado debe ser poco directivo, bien para no dejar espacios con menor luz incidente en la utilización conjunta dentro de un array, o bien para cubrir todo el área del panel fotovoltaico con igual intensidad lumínica, si utilizamos una única unidad con tamaño suficiente. Este es el primer requisito fijado en nuestra búsqueda.

Además, para optimizar los resultados necesitaremos la mayor potencia lumínica posible, para satisfacer esta condición centraremos la búsqueda en la

variedad de LEDs de alta potencia, *high power led*, cuyas aplicaciones y usos se encuentran en plena expansión y desarrollo.

También queremos escoger diferentes longitudes de onda para comparar la variación de la eficiencia de los mini paneles fotovoltaicos. Buscaremos LEDs de color rojo, verde, azul y blanco.

2.1.2. Elección

En Philips Lumileds encontramos una amplia gama de LEDs de alta potencia, además hemos comprobado que son pioneros en la aparición de nuevas fuentes con mayor potencia lumínica que sus rivales. Philips Lumileds es el principal fabricante del mundo de LEDs a gran escala y empresa pionera en soluciones de iluminación para aplicaciones de uso cotidiano, tales como alumbrado de automoción, flashes para cámaras, televisores LCD, iluminación portátil y alumbrado general.

Encontramos en las fuentes de luz Luxeon K2 de alta potencia el producto que se adecua a las condiciones marcadas anteriormente. Tal como la misma compañía promociona son las primeras que combinan la intensidad del alumbrado con el tamaño reducido, la prolongada vida útil y el resto de ventajas asociadas a los LEDs. Además estos LEDs proporcionan un ángulo de visión de 140° donde como mínimo encontraremos más de la mitad de la intensidad máxima.

Sorprende la elevada intensidad a la que pueden trabajar estas fuentes de luz, que será un factor clave a la hora de diseñar la placa de control. El Luxeon K2 es el primero que se somete a prueba y catalogación a 1.000 mA sin perjuicio del mantenimiento lumínico permitiendo desarrollar aplicaciones con una luminosidad hasta ahora desconocida. Hasta el lanzamiento de Luxeon K2, los LEDs de alta potencia podían trabajar como máximo a 350 mA si no se quería reducir significativamente la vida útil del emisor.



Fig 2.2 Imagen del Luxeon K2 de Philips lumileds.

2.1.3. Características técnicas

Para la realización de las medidas hemos elegido los siguientes LEDs:

El modelo *Cool-White L XK2-PW14-U00*, el modelo *green L XK2-PM14-U00*, cuya longitud de onda se encuentra entre 520 y 550nm, con el valor de pico situado en 530nm. Modelo *royal-blue L XK2-PR14-Q00*, con el que nos encontramos entre 440 y 460nm con el valor máximo de energía situado en los 455nm. Por último el modelo *L XK-PD12-R00 red* se encuentra en un rango que va desde los 620nm a los 645nm, teniendo el nivel de pico en los 427nm. Estos datos son características proporcionadas por el fabricante, que serán comprobados midiendo el espectro de emisión en el laboratorio.

Table 1.

Performance at Test Currents					Typical Performance at Indicated Current	
Color	Part Number	Minimum Luminous Flux (lm) or Radiometric Power (mW) $\Phi_{V, R(P)}$	Typical Luminous Flux (lm) or Radiometric Power (mW) $\Phi_{V, R(P)}$	Test Current (mA)	Typical Luminous Flux (lm) or Radiometric Power (mW) $\Phi_{V, R(P)}$	Drive Current (mA)
Cool-White	LXK2-PW12-R00	39.8	45	350	75	700
	LXK2-PW12-S00	51.7	60	350	100	700
	LXK2-PW14-T00	80	95	1000	110	1500
	LXK2-PW14-U00	87.4	100	1000	130	1500
	LXK2-PW14-V00	113.6	120	1000	140	1500
Green	LXK2-PM12-R00	39.8	45	350	75	700
	LXK2-PM12-S00	51.7	60	350	100	700
	LXK2-PM14-U00	87.4	100	1000	130	1500
Royal Blue	LXK2-PR12-L00	175 mW	200 mW	350	390 mW	700
	LXK2-PR12-M00	225 mW	290 mW	350	480 mW	700
	LXK2-PR14-C00	435 mW	475 mW	1000	620 mW	1500
	LXK2-PR14-R00	515 mW	575 mW	1000	750 mW	1500
Red	LXK2-PD12-Q00	30.6	35	350	60	700
	LXK2-PD12-R00	39.8	45	350	75	700
	LXK2-PD12-S00	51.7	60	350	100	700

Fig. 2.3 Imagen del datasheet con los LEDs seleccionados

Según características del fabricante la caída de tensión en el LED se encuentra en los 3'42 voltios para cool-white, royal blue y green y 2'95V para el color rojo cuando se alimentan con una corriente de 350mA. Siendo estos valores de 3'60V y 3'40V cuando la corriente es de 700mA.

Los LEDs seleccionados nos proporcionarán una mayor homogeneidad lumínica en el momento de iluminar los paneles solares, lo que optimizará el resultado de las medidas.

De los cuatro seleccionados, el LED que proporciona luz blanca es el más directivo. Los LEDs de luz verde y azul comparten el mismo diagrama de radiación, mucho menos directivo que el *cool-white*, con lo que cumplirá ampliamente con las especificaciones requeridas. Por último, en un punto intermedio en cuanto a directividad, tenemos el diagrama de radiación del color rojo.

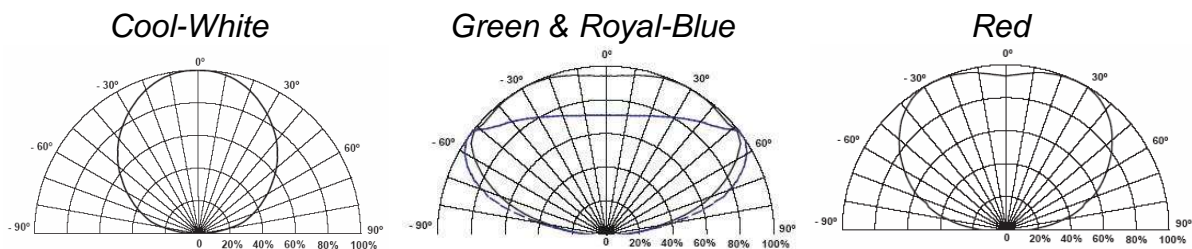


Fig. 2.4 Diagrama de radiación de los LEDs seleccionados.

2.2. Placa de control y del LED

2.2.1. Descripción y diseño

Las fuentes que encontramos en los laboratorios son fuentes de tensión, la intensidad que suministra es la que el circuito demanda, es por este motivo que necesitamos diseñar un driver o circuito de control para conseguir que nuestra fuente de tensión nos proporcione una intensidad suficiente para trabajar con el LED al máximo rendimiento, los valores de corriente deben estar en el orden de un amperio. Este circuito sería innecesario si se utilizase una fuente de corriente de valor adecuado en la que se pudiese regular la intensidad suministrada.

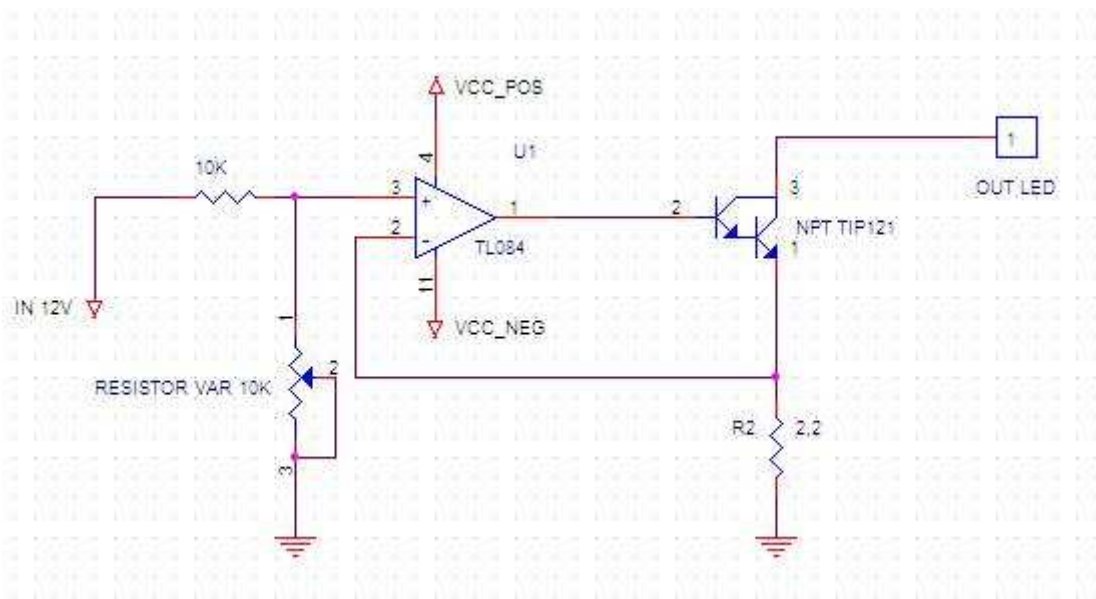


Fig. 2.5 Captura del diseño realizado con Orcad Schematic.

Es importante destacar que el LED no estará integrado en la placa de control ya que esta se utilizara para cuatro LEDs diferentes que necesitaremos intercambiar.

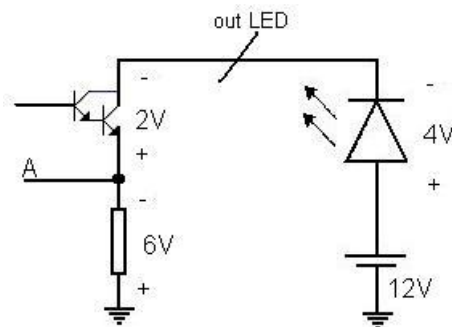


Fig. 2.6 Unión de la placa de control con la placa del LED

El valor de la Resistencia R2 ha sido fijado suponiendo las condiciones más adversas en cuanto a caída de tensión en los componentes. De esta manera aseguramos que la corriente no estará limitada por este módulo del circuito. Seleccionando un valor de 2'2 Ohmios para la resistencia de la figura estamos determinando que la corriente que circulará por el circuito es de más de dos amperios. Con lo que cumplimos sobradamente con el amperio y medio, al que como máximo puede trabajar un LED.

El divisor de tensión formado por una resistencia de 10K y un potenciómetro, logarítmico o lineal, del mismo valor máximo nos determinará la tensión que encontraremos en el punto A mediante cortocircuito virtual. Así que no necesariamente tendremos una diferencia de potencial de 6 voltios en la

resistencia. Tendremos un valor menor de intensidad disminuyendo el valor del voltaje en este punto.

2.2.2. Componentes

En los componentes mostrados en la figura 2.6 la intensidad que circulará puede ser del orden de un amperio, es por este motivo que el transistor Darlington y la resistencia R2 serán componentes de potencia.

El Darlington seleccionado debe permitir la circulación de elevadas corrientes en el emisor. En este caso tenemos I_c máxima de 5A, cumpliendo ampliamente con la condición requerida.



Fig. 2.7 Transistor NPN Darlington TIP121 (izquierda) y resistencia 22Ω de 20W (derecha). Ambos con encapsulado T0220.

La resistencia de 22Ω es una resistencia de potencia de 20W. Con encapsulado T0220. Utilizaremos, de la misma manera que para el darlington, disipadores de mordaza diseñados especialmente para este encapsulado. La potencia máxima disipada en la resistencia suponiendo una corriente de $1.5A$ es de:

$$P = R \cdot I^2 = 22 \cdot 1.5^2 = 49.5W \quad (2.1)$$

El resto de componentes del circuito no necesitarán soportar altas corrientes, por lo que ni las resistencias que forman el divisor de tensión ni el amplificador operacional serán componentes de potencia.

Utilizaremos un potenciómetro logarítmico o lineal para crear el divisor de tensión variable, ambos con el mismo encapsulado, que se muestra en la imagen.



Fig. 2.8 Encapsulado del potenciómetro

2.2.3. Layout y montaje

2.2.3.1 Placa de control

Realizaremos el layout de la placa de control pasando el diseño de Orcad Schematic a Orcad Layout Plus, indicando en cada caso la máscara a la que se corresponde cada componente. Al tratarse de componentes relativamente nuevos en muchos casos modificaremos o crearemos la máscara para que los componentes encajen correctamente.

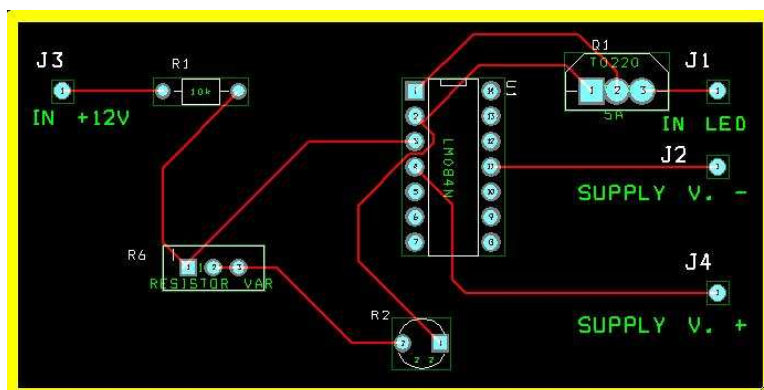


Fig. 2.9 Captura del diseño de la placa de control con Orcad Layout

Una vez realizados los últimos ajustes, en la imagen siguiente se muestra el diseño que recibirá la máquina taladradora, y que en la práctica es el aspecto de la placa de control.

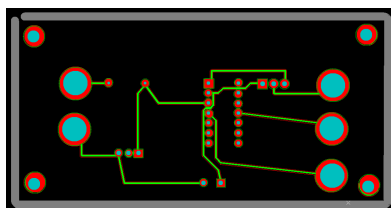


Fig. 2.10 Placa de control

El aspecto final de la placa del driver, una vez hemos soldado los componentes, es el que se muestra en las fotografías. Como ya hemos comentado anteriormente, utilizaremos disipadores de mordaza, diseñados para actuar en componentes con encapsulado T0220, como son el darligton y la resistencia de potencia.

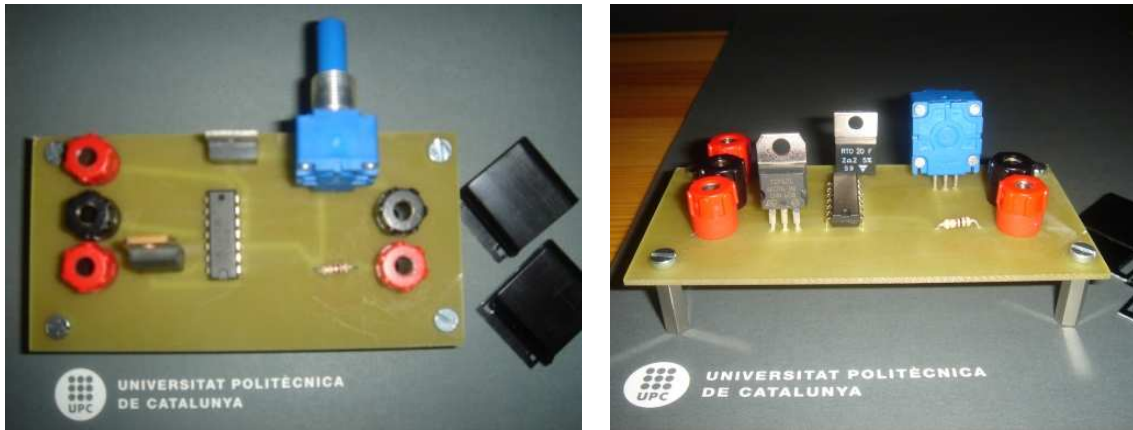


Fig. 2.11 Aspecto final de la placa de control

2.2.3.2 Placa del LED

La placa del LED, mucho más simple, estará formada por el mismo LED y dos conectores, uno de entrada que se conectará a la fuente de alimentación, y el de salida que conectará con la placa de control. El layout para crear la placa se muestra a continuación.

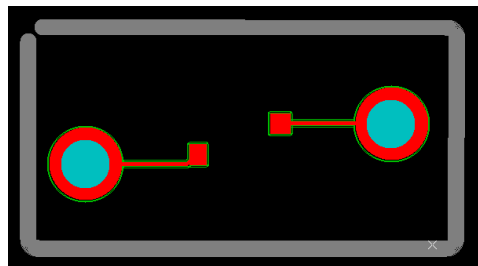


Fig. 2.12 Layout de la placa del LED

Para conseguir la máxima disipación de calor necesitaremos que se produzca un contacto total entre la superficie de cobre de la placa y el disipador integrado en el LED, situado en la parte inferior tal como se muestra en la imagen. Ambas superficies estarán en contacto mediante la utilización de silicona conductora.

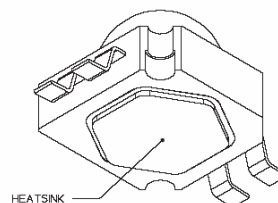


Fig 2.13 Imagen del LED desde abajo, mostrando el disipador.

El aspecto final de la placa del LED se muestra en la fotografía. La placa esta diseñada para que el LED ilumine desde arriba, situada sobre un soporte, por lo que se conectara por la cara opuesta a la iluminación de LED.



Fig. 2.14 Aspecto final de la placa del LED

CAPITULO 3. MEDIDAS

3.1. Espectro de emisión diodo LED

Mediremos el espectro de emisión de los cuatro LEDs. Realizaremos una medida relativa, ya que normalizaremos a un valor unitario el nivel de energía, el objetivo de esta medida es conocer con exactitud la longitud de onda a la que emite cada LED.

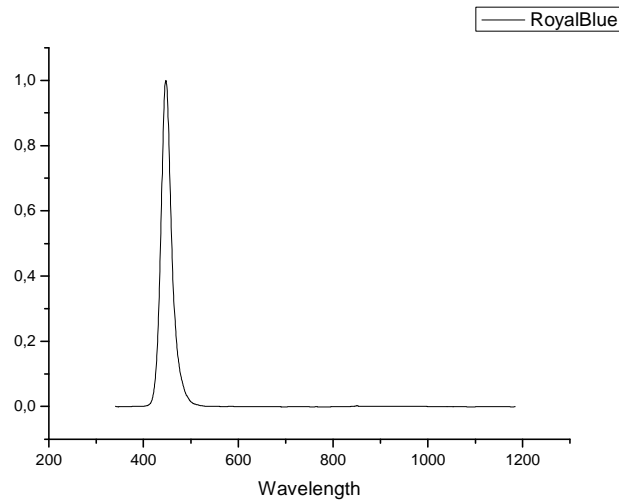


Fig. 3.1 Espectro de emisión del LED Royal-Blue

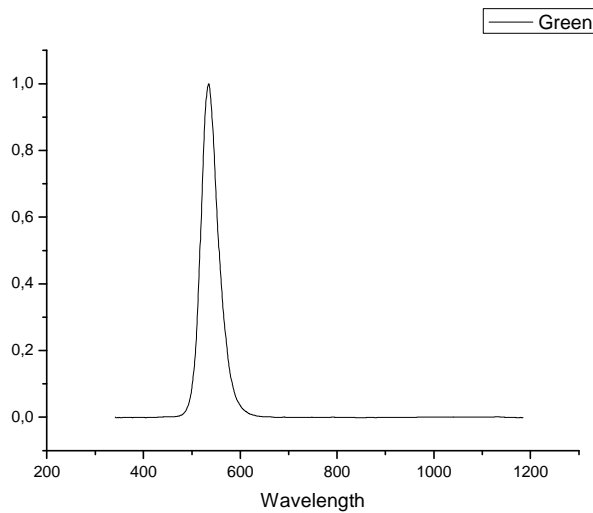


Fig. 3.2 Espectro de emisión del LED Green

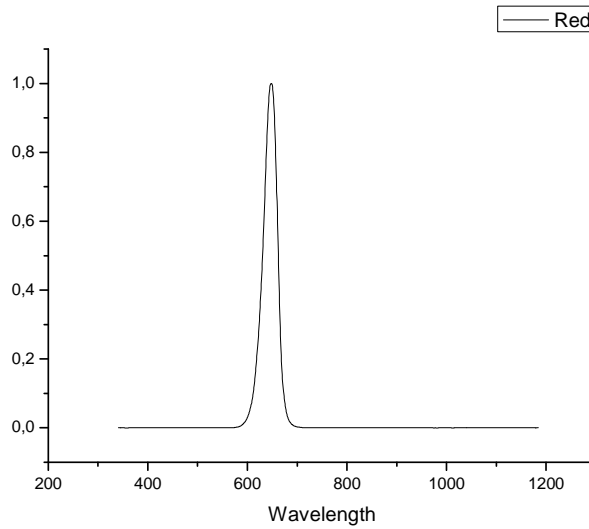


Fig. 3.3 Espectro de emisión del LED Red

Encontramos el pico de energía en 447nm para el azul, el nivel máximo de energía para el color verde se encuentra en 534-535nm, y entre 613 y 617nm para el color rojo.

El espectro de la luz blanca es más amplio, esta formada por diferentes longitudes de ondas, encontramos dos niveles de energía importantes, el primer pico situado en 453nm, que se correspondería con una luz azul, y otro lóbulo más ancho con nivel máximo de energía entre 564 y 566nm.

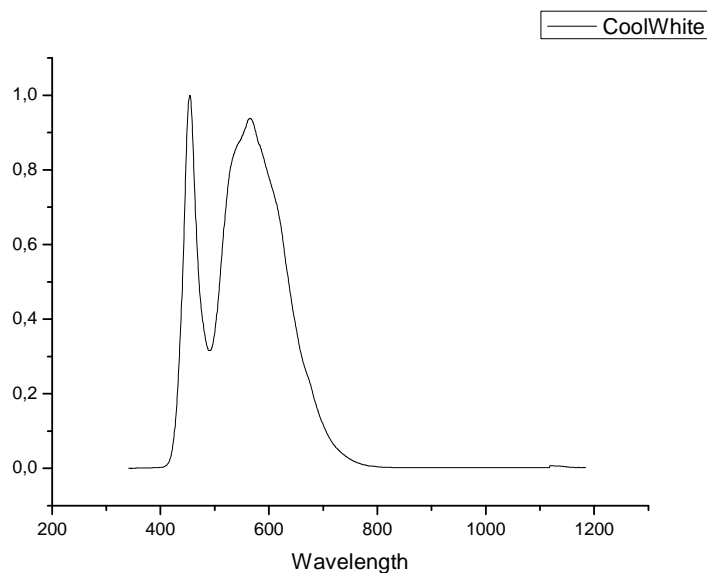


Fig. 3.4 Espectro de emisión del diodo LED Cool-White

3.2 Medidas sobre diodo calibrado

Queremos determinar la irradiancia de nuestros LEDs empíricamente, para ello utilizaremos un fotodiodo calibrado. Obtendremos un valor de corriente, a partir del cual calcularemos el valor de irradiancia siguiendo la relación que se muestra en la tabla.

Tabla 3.1. Relación corriente-potencia recibida por longitud de onda

Wavelength nm	S mA/w	Wavelength nm	S mA/w	Wavelength nm	S mA/w	Wavelength nm	S mA/w
200	127	330	149	520	273	780	422
210	132	340	153	540	284	800	432
220	133	350	152	560	295	820	441
230	139	360	152	580	309	840	453
240	141	370	153	600	319	860	464
250	133	380	162	620	331	880	476
260	120	390	177	640	345	900	488
270	102	400	186	660	354	920	498
280	103	420	204	680	365	940	508
290	117	440	220	700	375	960	517
300	131	460	233	720	388	980	510
310	138	480	245	740	399	1000	488
320	141	500	259	760	410	1020	435

3.2.1 Deriva térmica

Al iniciar las medidas observamos una variación de la corriente a la salida del diodo calibrado para un mismo LED. Obtenemos un punto máximo de corriente en el momento del encendido, después la corriente va descendiendo progresivamente a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento y la temperatura del LED.

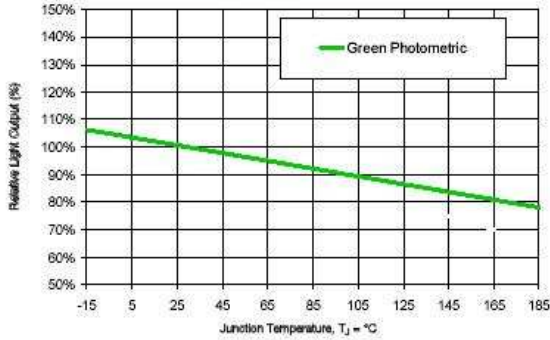
Tenemos una *deriva por temperatura*, la cual viene cuantificada en el datasheet del fabricante.

Para realizar correctamente las medidas deberemos esperar a que se estabilice la temperatura y así mismo la corriente saliente del fotodiodo calibrado. El tiempo en el que se realizaron las siguientes medidas oscila entre los tres y cinco minutos posteriores al encendido del LED, cuando la variación del resultado era mínima.

En la siguiente tabla figura un gráfico en el que se observa la variación porcentual de la respuesta lumínica del LED para una temperatura determinada. Esta característica varía dependiendo de la longitud de onda, por lo que tendremos cuatro graficas diferentes, ordenadas de menor a mayor sensibilidad, o de mayor a menor estabilidad.

Relative Light Output - Temperature

Green at Test Current

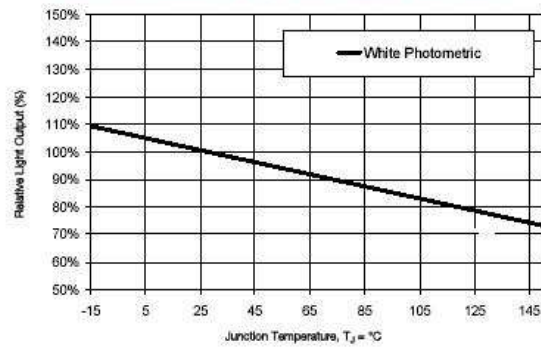


Green

Alimentación LED 500 mA.
Corriente salida del diodo 165 μ A.

Alimentación LED 750 mA.
Corriente salida del diodo 201 μ A.

Cool-White, Neutral-White and Warm-White at Test Current

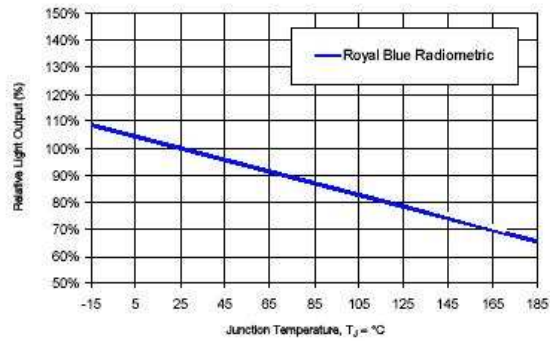


Cool White

Alimentación LED 500 mA.
Corriente salida del diodo 371 μ A.

Alimentación LED 750 mA.
Corriente salida del diodo 473 μ A.

Royal Blue at Test Current

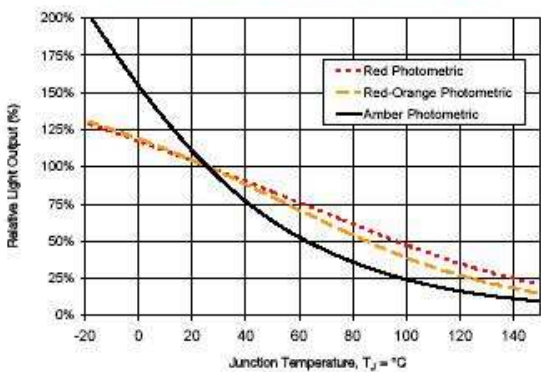


Royal Blue

Alimentación LED 500 mA.
Corriente salida del diodo 320 μ A.

Alimentación LED 750 mA.
Corriente salida del diodo 405 μ A.

Red, Red-Orange and Amber at Test Current



Red

Alimentación LED 500 mA.
Corriente salida del diodo 570 μ A.

Alimentación LED 750 mA.
Corriente salida del diodo 520 μ A.

Del estudio de las diferentes medidas podremos extraer el punto óptimo de funcionamiento. Una mayor corriente de alimentación no tiene porque ser proporcional a una mayor irradiancia, ya que la respuesta del LED puede verse afectada negativamente por una mayor temperatura de funcionamiento.

Es por este motivo que las medidas realizadas sobre los paneles y células solares se realizarán a 500mA ya que el color rojo pierde eficiencia a mayor corriente de excitación como consecuencia de la deriva térmica.

3.2.2 Cálculos de irradiancia

Realizaremos los cálculos de irradiancia con los datos obtenidos excitando los LEDs a 500mA. En el apartado anterior se muestra la intensidad de salida del diodo calibrado por wattio recibido, a una determinada longitud de onda. Siguiendo los valores expuestos en la tabla característica del diodo calibrado calculamos la potencia que recibimos.

Green - Para el color verde, con el nivel máximo de energía a una longitud de onda de 534 nm, la relación intensidad potencia es de 278 mA/W. La medida realizada nos da una salida del diodo de 165 uA. Por tanto tenemos un valor de potencia recibida de 0'6 mW.

Royal Blue - Con el nivel máximo de energía a una longitud de onda de 450 nm, la relación intensidad potencia es de 230 mA/W. La medida realizada nos da una salida del diodo de 320 uA. Por tanto tenemos un valor de potencia de 1'4 mW.

Red - Con el nivel máximo de energía a una longitud de onda de 615 nm, la relación intensidad potencia es de 330 mA/W. En la medida realizada tenemos una corriente de salida de 570uA. Por tanto tenemos un valor de potencia de 1'72 mW.

Cool White – Consideraremos el lóbulo principal aquel con pico en 565 nm, la relación intensidad potencia es de 295 mA/W para esta longitud de onda. En la medida realizada tenemos un valor de 360 uA, por lo que el valor de potencia es de 1'22 mW.

Para obtener el valor de la irradiancia debemos conocer el área del fotodiodo calibrado. Según el datasheet del modelo utilizado, *hamamatsu s2281*, el área activa tiene un diámetro de 11'3mm. Tenemos, por tanto, un área circular de 0'95 cm².

Únicamente debemos dividir el valor de potencia obtenido en el diodo entre el área de este, para calcular el valor de la irradiancia.

En la siguiente tabla se muestra de manera resumida los datos de esta medida junto con los valores de irradiancia obtenidos.

Tabla 3.2. Resultado de los cálculos de irradiancia

LED	Alimentación	Longitud onda	Salida diodo	Relación mA/W	Irradiancia
Green	500 mA	534 nm.	165 uA	278 mA/W	0,63 mW/cm ²
Royal Blue	500 mA	450nm.	320uA	230mA/W	1,47mW/cm ²
Red	500mA	615nm	570uA	330mA/W	1,81mW/cm ²
CoolWhite	500mA	~565nm	360uA	295mA/W	1,15mW/ cm ²

3.3. Medidas en paneles solares.

3.3.1. Procedimiento

La respuesta de las células solares dependerá de la distancia a la que se encuentren del LED, por ello para todas las medidas realizadas en adelante se considera una distancia entre el panel y el LED de entre 5'5 y 6cm. El diodo LED estará situado en el soporte diseñado para realizar esta función.



Fig. 3.5 Soporte fijo del LED

Con la ayuda de un microscopio uniremos los electrodos de una célula, o varias conectadas en serie, con el equipo Hp4142B, "modular DC source", que a su vez transmitirá los datos al PC para su visualización.



Fig. 3.6. Imágenes del procedimiento de interconexión.

3.3.2 Medidas de una única célula solar

Para la realización de las siguientes medidas se ha alimentado el LED con 500mA. El código del panel solar es SOI 5 1 70, lo que nos indica que pertenece a la oblea de paneles de cinco micras de grosor. Las medidas pertenecen a una única célula solar de 1mm² de área.

3.3.2.1 Green LED

A continuación se muestran los resultados de la medida para Green LED. En la que se detallan los parámetros fotovoltaicos descritos en el apartado 1.3.2.1, utilizando las fórmulas 1.9, 1.10 y 1.11.

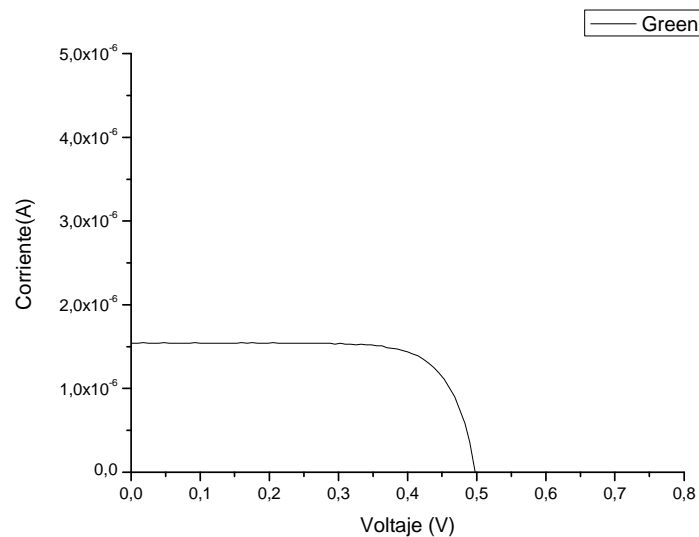


Fig. 3.7 Característica corriente-tensión una célula del panel SOI_5_1_70 para el LED de luz verde.

En este caso tenemos una corriente de cortocircuito I_{sc} de 1'54uA y una tensión de circuito abierto V_{co} de 0'497V.

Potencia máxima.

$$P_m = V_m \cdot I_m = 0'415V \cdot 1'39\mu A = 0'575\mu W \quad (3.1)$$

Fill-Factor.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{0,415V \cdot 1,39\mu A}{0,497V \cdot 1,54\mu A} = \frac{0,575\mu W}{0,765\mu W} = 0,75 \quad (3.2)$$

Eficiencia de conversión. Para el cálculo de este parámetro es necesario el valor de irradiancia obtenido en el apartado 3.2.2. Para el color verde este valor es de 0'63 mW/cm². El área de la célula es de 1mm² o 0'01cm², en concordancia con las unidades de irradiancia.

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot P_{in}} = \frac{0'575 \cdot 10^{-3} mW}{0'01 cm^2 \cdot 0'63 mW / cm^2} = 9'12\% \quad (3.3)$$

3.3.2.2 Royal-Blue LED

Se ha medido una corriente fotogenerada en la que se observa una corriente de cortocircuito I_{sc} de 2'71uA, así como una tensión de circuito abierto V_{co} de 0'527V.

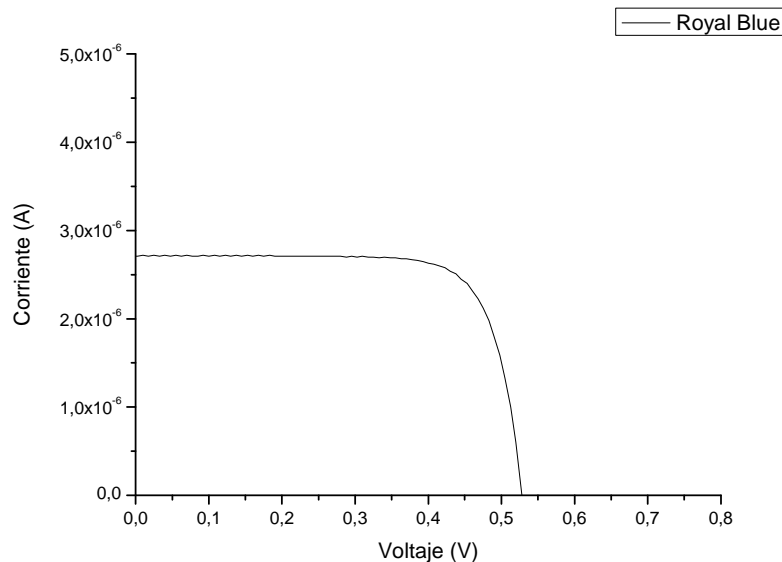


Fig. 3.8 Característica corriente-tensión una célula del panel SOI_5_1_70 para el LED de luz azul.

La potencia máxima medida es de 1'1uW y el Fill-Factor resulta 0'77. Calculamos el valor de la eficiencia con un valor de irradiancia para el LED azul de 1'47 mW/cm².

$$\eta = \frac{1'10 \cdot 10^{-3} mW}{0'01 cm^2 \cdot 1'47 mW / cm^2} = 7'48\% \quad (3.4)$$

3.3.2.3 Red LED

Las medidas son de 4'81uA para la corriente de cortocircuito I_{sc} , y de 0'535V para la tensión de circuito abierto.

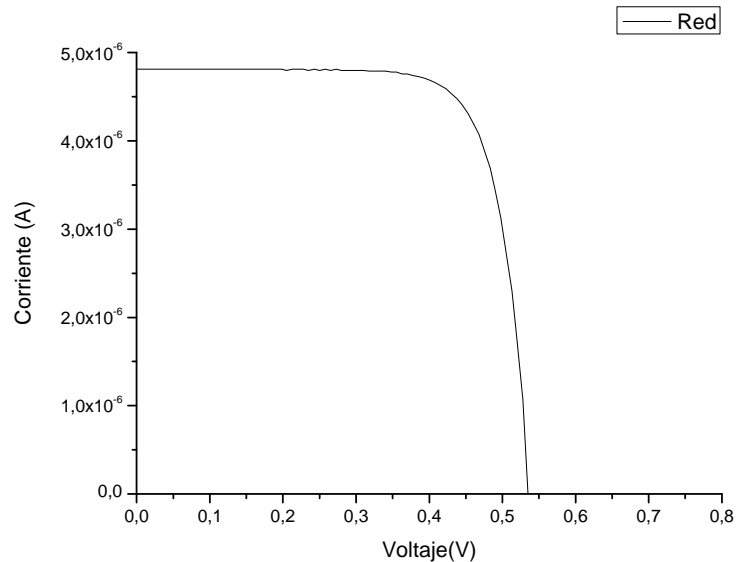


Fig. 3.9 Característica corriente-tensión una célula del panel SOI_5_1_70 para el LED de luz roja.

La potencia máxima medida es de 1'96uW y el Fill-Factor de 0'76. Calculamos el valor de la eficiencia conociendo que la irradiancia para el LED rojo es de 1'81 mW/cm².

$$\eta = \frac{1'96 \cdot 10^{-3} \text{ mW}}{0'01 \text{ cm}^2 \cdot 1'81 \text{ mW} / \text{cm}^2} = 10'8\% \quad (3.5)$$

3.3.2.4 Cool-White LED

Las medidas son de 3'28uA para la corriente de cortocircuito I_{sc} , y de 0'527V para la tensión de circuito abierto.

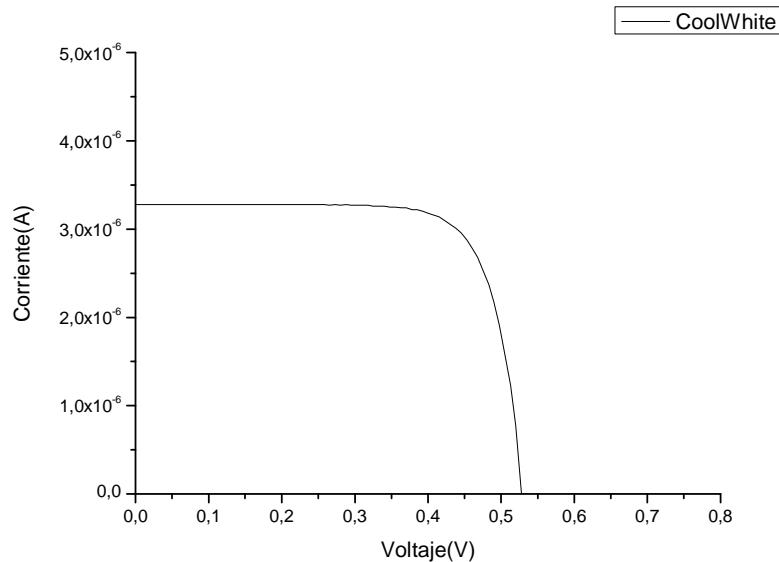


Fig. 3.10 Característica corriente-tensión una célula del panel SOI_5_1_70 para el LED de luz blanca.

La potencia máxima medida es de 1'32uW. Calculamos el valor de la eficiencia con un valor de irradiancia para el LED de luz blanca de 1'15 mW/cm².

$$\eta = \frac{1'32 \cdot 10^{-3} \text{ mW}}{0'01 \text{ cm}^2 \cdot 1'15 \text{ mW} / \text{cm}^2} = 11'5\% \quad (3.6)$$

3.3.3 Comparativa entre células de diferente grosor

Mediremos la respuesta del mismo panel fotovoltaico para la oblea de cinco y diez micras, para comprobar la variación de la respuesta de las células dependiendo del grosor de estas. Para estas medidas utilizaremos el panel número 79, con el código SOI_5_1_79 para el de cinco micras y SOI_10_1_79 para el panel de diez micras.

Se ha medido una sola célula solar de 1mm². Para todas las medias se ha utilizado una corriente de alimentación de Led de 500mA. Se muestran los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 3.1. Medidas de una célula del panel 79 de cinco micras de grosor

	SOI 5 1 79			
	$I_{sc} (\mu A)$	$V_{co}(V)$	$P_m(\mu W)$	η
Green	1'65	0'30	0'23	3'6%
Royal –Blue	3'04	0'31	0'40	2'7%
Red	4'61	0'33	0'74	4%
Cool-White	3'55	0'31	0'51	4'4%

Tabla 3.2. Medidas de una célula del panel 79 de diez micras de grosor

	SOI 10 1 79			
	$I_{sc} (\mu A)$	$V_{co}(V)$	$P_m(\mu W)$	η
Green	1'52	0'28	0'18	2'8%
Royal –Blue	2'42	0'33	0'33	2'3%
Red	5'64	0'42	1'09	6'0%
Cool-White	3'33	0'36	0'52	4'5%

Como se puede observar solo existe una mejora significativa en cuanto a eficiencia en el caso Led de luz roja, ya que como vimos en la parte teórica necesita 12 micras de grosor de una célula de silicio para que los fotones sean absorbidos completamente, por lo que al pasar de cinco a diez micras el porcentaje de absorción aumenta.

En el caso del Led de luz blanca, un pequeño porcentaje de la energía de su espectro de emisión se encuentra entorno a la longitud de onda del color rojo, aunque en las medidas vemos que la eficiencia se mantiene prácticamente invariable.

Para los Leds de luz azul y verde teóricamente no deberían existir excesivas variaciones, ya que el 100% de la absorción se produce en la célula de cinco micras. Los resultados de las medidas nos muestran que al aumentar el grosor no aumenta la eficiencia, sino que disminuye ligeramente. En estos casos se producen pérdidas de eficiencia por cambios en la estructura de la célula, ya que la capa antirreflectante tiene un peor comportamiento para bajas frecuencias en la oblea de diez micras.

3.3.4 Medida de paneles o células en serie.

Teóricamente al alinear varias células en serie, el resultado debería ser un aumento lineal de la tensión de circuito abierto, pero al tener unas corrientes de fotogeneración pequeñas, vemos como la respuesta de la célula a la iluminación con LEDs es muy dependiente del punto de trabajo en oscuridad de la misma como se observa en la figura 3.12.

Las variaciones del comportamiento intrínseco de una célula son más influyentes cuanto menor es la corriente de esta al ser iluminada, ya que para corrientes de salida elevadas el comportamiento es más homogéneo para la totalidad de las células de un panel.

Así pues al iluminar una célula con un sol de potencia (1000 W/m^2), la corriente fotogenerada tendrá un valor entorno a los $100 \mu\text{A}$, siendo una zona en la que todos los paneles tienen una respuesta en oscuridad similar, y por tanto el aumento de la tensión de circuito abierto será lineal a medida que añadimos células en serie.

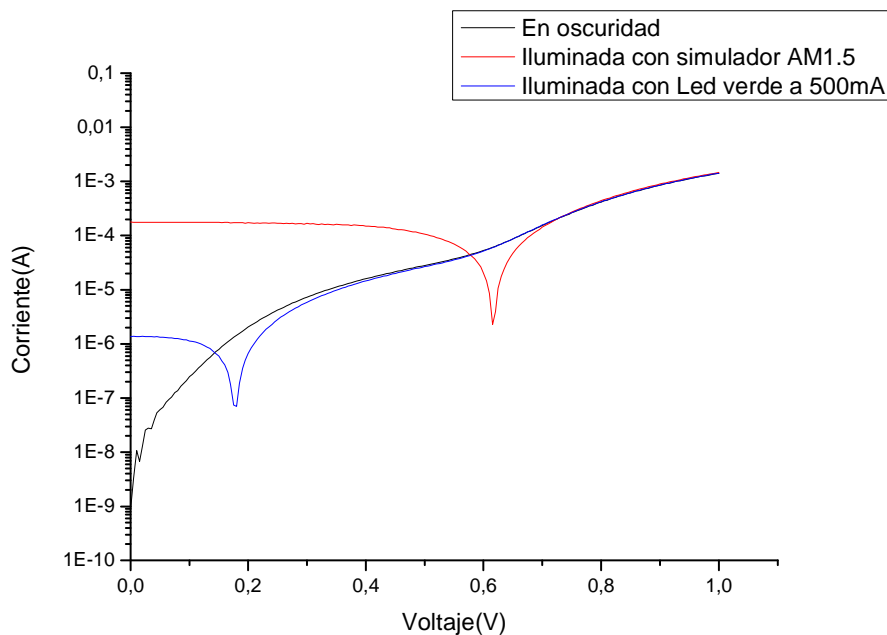


Fig. 3.11 Comparativa de la respuesta de una misma célula, en oscuridad, bajo la iluminación del simulador AM1.5 y bajo la iluminación del LED verde.

Mientras que bajo la iluminación de los LEDs las variaciones intrínsecas de la célula harán que el valor de la tensión de circuito abierto varíe drásticamente al pasar de una célula a otra.

En el siguiente gráfico tenemos la respuesta en oscuridad de tres células contiguas de un mismo panel, en el que si trazamos una línea horizontal a la altura correspondiente a la corriente de salida de la célula bajo la iluminación del LED verde ($1,5 \mu\text{A}$), tenemos valores aproximados de V_{co} de $0,310 \text{ V}$, $0,1 \text{ V}$ y $0,410 \text{ V}$ para las células 1, 2 y 3 respectivamente.

Este comportamiento de las células es producto del proceso de fabricación de estas, el cual es totalmente externo a nuestro proyecto.

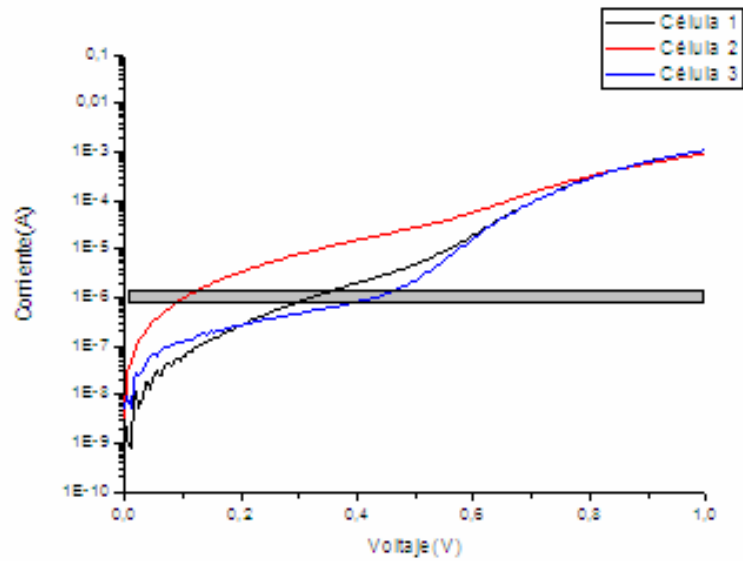


Fig. 3.12 Respuesta en oscuridad de tres células contiguas de un mismo panel (SOI_5_1_60).

Mediremos la respuesta de células en serie del panel SOI_10_1_78 bajo la iluminación del LED monocromático de luz roja, que es el que proporciona mayor corriente de salida y por tanto será el menos sensible a las variaciones intrínsecas de la célula.

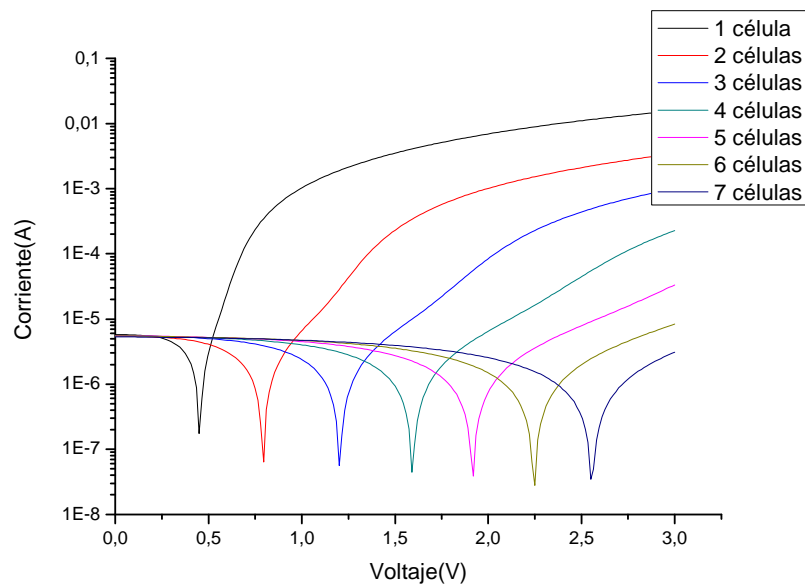


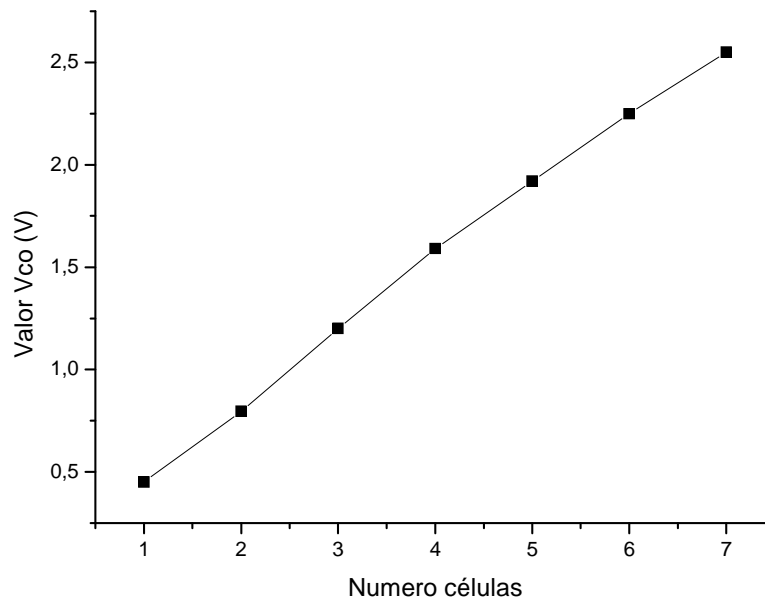
Fig 3.13 Respuesta de hasta siete células en serie iluminadas con el LED de luz roja a 500mA.

Tabla 3.3 Resultados de la medida de hasta siete células en serie.

Nº células serie	Isc (μ A)	Vco total (V)	Vco célula (V)
1	5'73	0'45	0'45
2	5'58	0'795	0'345
3	5'56	1'20	0'405
4	5'50	1'59	0'39
5	5'50	1'92	0'34
6	5'50	2'25	0'33
7	5'33	2'55	0'3

El valor de Isc se mantiene prácticamente invariable, aunque disminuye ligeramente a medida que aumenta el número de células conectadas en serie. Este parámetro vendrá limitado por la célula con menor corriente, y es lógico que disminuya a medida que tenemos más células conectadas ya que es difícil mantener el máximo nivel de iluminación en todas ellas.

Como vemos en la tabla el aumento no es completamente lineal pero es un resultado óptimo, que se aproxima al que tendría la célula bajo una iluminación de mayor potencia.

**Fig 3.14** Variación Vco en función del número de células en serie.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han diseñado, montado y caracterizado cuatro fuentes de luz monocromáticas (LEDs) para la caracterización de paneles fotovoltaicos de tamaño reducido ($<1 \text{ cm}^2$). Se ha comparado la característica corriente - tensión de dos paneles de diferente grosor de base, cinco y diez micras, situados en la misma posición dentro de la oblea, por lo que las características de fabricación son similares.

Al someter a ambos a la iluminación de los tres Leds monocromáticos, verde, azul y rojo, además del blanco, se ha comprobado, tal y como analizamos en la parte teórica, que se produce una mejora de la eficiencia y por tanto una mayor absorción al medir la respuesta de una célula de diez micras, respecto a la célula de cinco micras, únicamente cuando utilizamos el LED de luz monocromática correspondiente al color rojo.

La eficiencia máxima de las células solares bajo la iluminación de nuestros Leds se sitúa entorno al 10% en un caso óptimo. Este caso vendrá determinado por el comportamiento intrínseco de la propia célula.

La respuesta en oscuridad no es la misma para todas las células de un mismo panel debido al proceso de fabricación, esto provoca que no tengamos una Voc con un aumento lineal al añadir células en serie. Cuanto menor es la corriente fotogenerada la salida será más sensible al propio comportamiento de la célula. Siendo con la utilización del LED de color rojo, que proporciona una mayor corriente, con el que obtendremos los resultados más homogéneos.

Para todas las medidas se necesita un valor estable de la irradiancia emitida por el Led, por lo que desde su encendido se necesita alrededor de dos minutos para que se estabilice el valor. Se produce una deriva térmica que se traduce en una disminución de la potencia lumínica del Led a medida que aumenta la temperatura.

Conclusiones. Líneas futuras.

La disipación de calor ha sido un factor que nos ha impedido trabajar al máximo rendimiento con las fuentes de energía luminosa Luxeon K2. Creemos que un mejor control de la temperatura es un factor que se debería mejorar en un caso de una nueva versión o continuación de este trabajo.

La utilización de un radiador de grandes proporciones se sugiere como primera medida a tomar, ya que como se ha comentado la utilización únicamente de una placa de cobre resulto insuficiente cuando trabajábamos con el LED a corrientes entorno a 1 amperio. Como complemento se debería incorporar al sistema un ventilador o túnel de viento para optimizar la disipación.

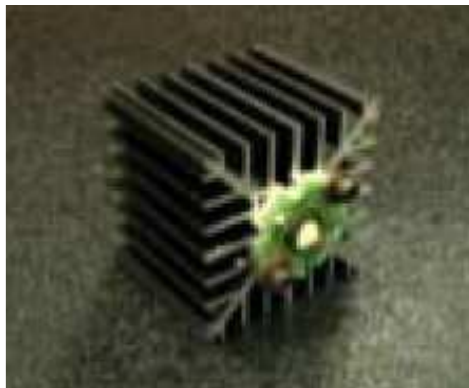


Fig. 4.1 Imagen de un Led con un radiador incorporado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Castañer Muñoz, L., *Energía solar fotovoltaica*, Edicions UPC, Barcelona, 1994.
- [2] Ortega, Pablo. *Curso de Células Solares y Sistemas Fotovoltaicos*, Apuntes y Transparencias CSIF, 2007.
- [3] www.solarpedia.es