



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto  
Ingeniería  
Energética



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**  
**TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA DESARROLLO SOSTENIBLE**

**“Recuperación de la degradación de  
módulos instalados en huertos  
solares”**

**AUTOR: YAGUANA GALLEGOS, NANCY VICTORIA**

**TUTOR: SANCHEZ PLAZA, GUILLERMO**

**CO-TUTOR: ESCRIVA CASTELLS, ALBERTO**

**Curso Académico: 2017-18**

**“Fecha: 07/2018”**

## **AGRADECIMIENTOS**

“Aprovechar la oportunidad para agradecer a quienes han hecho posible no sólo este trabajo sino también esta experiencia. Primero a mi familia, que son mi corazón e inspiración, no hay nada que no sea capaz de enfrentar con su apoyo. A los nuevos amigos que he hecho, que son la razón por la que he disfrutado tanto el estar aquí. A los profesores que han compartido no sólo su conocimiento sino un poco de su experiencia, ellos han contribuido a hacer de mí una mejor profesional. A mi tutor, que ha sido un gran apoyo para la elaboración de este trabajo, gracias por la paciencia, los conocimientos compartidos y la oportunidad de trabajar en este campo. También agradecer a las personas que me han ayudado en el Centro de Nanofotónica, y en especial al área de fotovoltaica que han contribuido para que este trabajo se desarrolle de una mejor manera.”

## **RESUMEN**

El presente documento hace una recopilación de los métodos de pasivación para la mitigación de la degradación LID producida por defectos B-O presentes en el silicio cristalino. La degradación LID, provoca pérdida de eficiencia en 0.5% anual en módulos de silicio por lo que es un tema en investigación y desarrollo. Se realizan estudios y pruebas para corroborar que mediante la inyección de portadores de carga minoritarios ya sea por iluminación o corriente, y la aplicación de temperatura para liberar hidrógeno presente en la capa dieléctrica de la célula, se logra la recuperación de potencia en células solares fotovoltaicas de silicio monocristalino. Este tipo de célula está instalado en un 10% de los huertos solares, por lo que se ha calculado que la potencial ganancia de la recuperación de la degradación y su mitigación permanente en las instalaciones fotovoltaicas que están operando y operarán en España hasta 2020 es de 20MW que representaría 2 millones de euros por producción de electricidad. Finalmente se propone el diseño de un dispositivo que permita realizar el proceso de pasivación en módulos solares instalados en huertos solares mediante iluminación LED de alta potencia.

**Palabras Clave:** Solar Fotovoltaica; Paneles Solares; Degradación; recuperación; eficiencia; Silicio monocristalino.

## **ABSTRACT**

This document compiles passivation methods for LID mitigation produced by BO defects present in crystalline silicon. The LID is object of interest and research because it causes loss of efficiency in 0.5% per year in silicon modules. Studies and tests were made to corroborate that through the injection of carriers, by illumination or current, and the application of the temperature to release hydrogen from the cell, the process of recovery in monocrystalline silicon modules is reached. This cell technology is installed in 10% of solar farms, therefore the potential for recovery of degradation and its permanent mitigation in photovoltaic installations operating in Spain up to 2020 has been calculated to be 20MW, representing 2 million euros for electricity production. Finally, the design of a device is proposed for the passivation process to be carried out in modules of solar farm installations through high power LED lighting.

**Keywords:** Solar photovoltaic; Solar panels; Degradation; Recovery; efficiency; Monocrystalline silicon.

## Contenido

MEMORIA .....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	13
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	13
1.4. ANTECEDENTES .....	14
2. ESTADO DEL ARTE .....	17
2.1. DEGRADACIÓN INDUCIDA POR LUZ RELACIONADA CON B-O.....	17
2.2. MÉTODOS PARA TRATAR LID EN CÉLULAS .....	20
2.2.1. TRATAMIENTO NO PERMANENTE: RECOCIDO SIN LUZ (DARK ANNEALING).....	22
2.2.2. TRATAMIENTOS PERMANENTES .....	22
2.3. PASIVACIÓN POR ILUMINACIÓN LOCALIZADA .....	30
2.4. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE PANELES SOLARES .....	30
2.5. RESUMEN CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....	34
3. EXPERIMENTACIÓN.....	35
3.1. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN.....	35
3.1.1. DEFINICIÓN DE MUESTRAS, PRUEBAS Y VARIABLES.....	35
3.1.2. INSTRUMENTACIÓN.....	36
3.1.3. PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN DE LAS CÉLULAS .....	38
3.1.4. ANÁLISIS DE DATOS .....	39
3.2. TEST EN CÉLULAS SOLARES.....	41
3.2.1. CARACTERIZACIÓN CORRIENTE-VOLTAJE (I-V) DE LAS CÉLULAS .....	41
3.2.2. TEST DE DEGRADACIÓN EN CÉLULAS (Light Soaking) .....	42
3.3. PRUEBAS DE RECUPERACIÓN.....	44
3.3.1. TEST DE RECUPERACIÓN POR RECOCIDO SIN LUZ (Dark Anneal).....	44
3.3.2. TEST DE RECUPERACIÓN POR INYECCIÓN DE CORRIENTE .....	45
3.3.3. TEST DE RECUPERACIÓN POR ILUMINACIÓN .....	51
3.3.3.1. A BAJAS TEMPERATURAS .....	51
3.3.3.2. TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN POR ILUMINACIÓN A <150 °C .....	52

3.4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
4.	DISEÑO DE UN EQUIPO PROTOTIPO DE RECUPERACIÓN INDUSTRIAL .....	60
4.2.	DISEÑO ELECTRÓNICO .....	61
4.2.2.	MATRIZ LEDS LUZ INFRARROJA .....	62
4.2.3.	DRIVER DE LEDS .....	62
4.2.4	CIRCUITO DE CONTROL.....	63
4.3.	DISEÑO DE LA PCB .....	64
4.4.	PROGRAMACIÓN .....	66
5.	ANÁLISIS DE COSTE .....	69
5.2.	COSTE DEL EQUIPO.....	71
5.3.	COSTE DEL TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN .....	73
6.	CONCLUSIONES .....	76
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- 1 Ilustración de una lámina (a) monocristalina y (b) policristalina de Silicio.....	15
Figura 1- 2 Estructura cristalina del silicio (izq.), y silicio dopado con boro y fósforo (dcha.) .....	15
Figura 1- 3 Esquema de una célula cSi.....	16
Figura 2 - 1 Estados del defecto LID.....	21
Figura 2 - 2 Representación del sistema de defecto B-O de 4 estados.....	21
Figura 2 - 3 Irradiación de la luz solar según longitud de onda .....	25
Figura 2 - 4 Modelo de bandas en células solares, movimiento electrón de la banda .....	26
Figura 2 - 5 Profundidad a la que se realiza la absorción y generación de un par e-h+ .....	26
Figura 2 - 6 Constantes de tiempo características de procesos de regeneración. ....	28
Figura 2 - 7 (a) Comportamiento de Voc en células bajo tratamiento de pasivación .....	29
Figura 2 - 8 Potencia solar fotovoltaica instalada anual y acumulada .....	31
Figura 2 - 9 Evolución estimada de la potencia anual y acumulada hasta 2020 .....	31
Figura 2 - 10 Histograma de rangos de degradación para módulos de Silicio .....	32
Figura 3 - 1 Simulador Solar ABET Sun 2000.....	36
Figura 3 - 2 Estación de muestras para Simulador Solar ABET .....	37
Figura 3 - 3 Equipo de adquisición de datos KEITHLEY 2600 .....	37
Figura 3 - 4 Fuente de Corriente Continua BK Precision .....	38
Figura 3 - 5 Plato caliente con temperatura regulable MS300HS.....	38
Figura 3 - 6 Estación del Simulador Solar(izq) e interfaz (der) del programa Tracer.....	39
Figura 3 - 7 Gráficas de variación de Voc en células expuestas a iluminación por 72 horas .....	41
Figura 3 - 8 Medida parámetros de células en estación de caracterización con Simulador Solar. ...	41
Figura 3 - 9 Posición de las células al iniciar la prueba de degradación.....	42
Figura 3 - 10 Comportamiento de la degradación de Voc e Jsc en función del tiempo .....	43
Figura 3 - 11 Comportamiento del Voc con respecto al tiempo en proceso de degradación .....	45
Figura 3 - 12 Diagrama de configuración del tratamiento de regeneración.....	45
Figura 3 - 13 Estados del defecto. ....	46
Figura 3 - 14 Medida de voltaje de una célula durante el tratamiento de regeneración a 130°C....	46
Figura 3 - 15 Simulación de una célula solar, perfil de temperatura por la disipación .....	47

Figura 3 - 16 Simulación de una célula solar, perfil de temperatura por la disipación .....	47
Figura 3 - 17 Test de corriente a 1 sol y 50 °C.....	49
Figura 3 - 18 Imágenes del test de corriente en células.....	50
Figura 3 - 19 Test de inyección de corriente a varias temperaturas y con distintas .....	50
Figura 3 - 20 Prueba de estabilidad de la pasivación de células tratadas. ....	51
Figura 3 - 21 Comportamiento Voc en células c-Si expuestas a iluminación por 144h.....	52
Figura 3 - 22 Comportamiento Jsc en células c-Si expuestas a iluminación por 144h .....	52
Figura 3 - 23 Test de degradación bajo iluminación para comprobar el test realizado .....	53
Figura 3 - 24 Variación de Voc y Jsc bajo iluminación en un estudio realizado por .....	54
Figura 3 - 25 Comportamiento de Voc en celulas degradadas y luego recuperadas .....	54
Figura 3 - 26 a) Prueba realizada con inyección de corriente a 1sol.....	55
Figura 3 - 27 Pruebas de corriente a 1 sol y temperaturas de 90,130 y 150 grados .....	56
Figura 3 - 28 Prueba de estabilización, células expuestas a iluminación 1sol y 60°C.....	56
Figura 3 - 29 Pérdida de voltaje en células con diferentes corrientes y temperatura 130 °C.....	57
Figura 3 - 30 Prueba estabilidad de la pasivación de células a varias corrientes .....	57
Figura 3 - 31 Pérdida de voltaje en células con diferentes corrientes y temperatura 150 ° .....	58
Figura 3 - 32 Prueba estabilidad de la pasivación de células a varias corrientes .....	58
Figura 3 - 33 Comportamiento de Voc durante exposición a iluminación a 1 sol .....	59
Figura 4 - 1 Esquema del driver de leds .....	63
Figura 4 - 2 Esquema del circuito controlador de lámpara de regeneración .....	64
Figura 4 - 3 Simulación Proteus del Circuito de control y matriz de leds azules .....	65
Figura 4 - 4 PCB de la lampara diseñado en Ares .....	65
Figura 4 - 5 PCB lámpara de Leds SMD de alta potencia .....	66



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2- 1 Variables dentro del proceso de pasivación.....	29
Tabla 2- 2 Potencia de degradación de módulos fotovoltaicos hasta el año 2020 .....	33
Tabla 3 - 1 Características técnicas de las células Al-BSF 156S0X1 de JASOLAR .....	42
Tabla 3 - 2 Parámetros de una célula antes y después del test de degradación por iluminación ....	44
Tabla 3 - 3 Parámetros de una célula antes de la degradación, después de la. ....	44
Tabla 4 - 1 Características técnicas Led LUXEON LXZ1-PR01 .....	61
Tabla 4 - 2 Características técnicas Led LUXEON L1IZ-0940 .....	62
Tabla 4 - 3 Características de fabricación de PCB de leds .....	66
Tabla 5 - 1 Lista de componentes circuito de control y sus costes .....	72
Tabla 5 - 2 Componentes lámpara de leds y sus costes .....	72
Tabla 5 - 3 Costes fabricación PCB de leds.....	73
Tabla 5 - 4 Costes de ingeniería.....	73
Tabla 5 - 5 Detalle coste total equipo de pasivación.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

LID (Light Induced Degradation) Degradación Inducida por Luz

CID (Carrier Induced Degradation) Degradación Inducida por Portadores de carga

Al-BSF (Aluminium Back Surface Field) Tecnología de células superficie trasera de aluminio

PERC (Passive Emitter and Rear Contact) Tecnología de células emisor pasivo y contacto posterior

B-O Complejo Boro-Oxígeno

Cz Czochraslki. Tipo de manufactura de obleas de silicio

FZ Float Zone. Tipo de manufactura de obleas de silicio

Voc (Open Circuit Voltage) Voltaje en circuito abierto

PCB (Printed Circuit Board) Placa de circuito impreso

SMD (Surface Mounting Device) Dispositivo de montaje superficial

# MEMORIA

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. JUSTIFICACIÓN**

Una de las grandes problemáticas actuales a las que se enfrenta la humanidad es la de reducir los gases de efecto invernadero, y que esto pueda lograrse a través del cambio de combustibles fósiles por fuentes renovables para la generación eléctrica, de calor y transporte. Este reto es mayor si se quiere lograr sin producir más emisiones de gases de los que ya existen actualmente. La energía fotovoltaica para generación de electricidad es una de las opciones prometedoras, cuya industria crece con cifras entre 30-50% al año desde los 1990's, gracias a que ofrece importantes reducciones de coste. (Hoffman, 2006)

La tierra recibe del sol una irradiación de aproximadamente  $1 \text{ kW/m}^2$  en su superficie, y si la superficie de la tierra es de 510.1 millones de  $\text{km}^2$ , eso significa que en 1 hora recibimos 510.1 TWh de energía. Si el consumo global de electricidad en 2014 fue de casi 5000 TWh, en un día recibimos más cantidad de energía que la que consumimos en un año, aunque desafortunadamente, debido a factores meteorológicos, la inclinación y rotación terrestre, y la eficiencia de los dispositivos de recolección de energía solar hacen que esto no sea inmediato. (Funseam, 2016) Por eso el objetivo es fabricar dispositivos más eficientes, en forma de paneles fotovoltaicos de bajo coste y de buena calidad para aprovechar esta fuente abundante de energía.

En cuanto al tipo de tecnología que utilizan estos paneles fotovoltaicos, aproximadamente el 95% son fabricados usando substratos tipo P, ya que son más baratos que los de tipo N. Sin embargo, estos substratos son más propensos a degradación cuando están expuestos a la luz. Esta degradación inducida por luz (*LID Light Induced Degradation*) ha mermado la rentabilidad de la industria por décadas, por lo que ha sido tema de investigación, como por ejemplo los intentos de cambiar a un silicio alternativo para la producción de células fotovoltaicas. Se cree que esta LID se produce debido a defectos relacionados con la formación de complejos boro-oxígeno (B-O), aunque la composición actual del defecto no está clara y continua en investigación. Esta degradación puede reducir la eficiencia de las células de silicio hasta un poco más del 10% relativa a la eficiencia inmediata después de la fabricación de la célula, aunque en la práctica es un valor menor, y en particular para células fabricadas con la tecnología Al-BSF (que es la tecnología que se ha venido utilizando mayoritariamente hasta la actualidad) es de aproximadamente un 3-4% relativo. A pesar de que, la naturaleza exacta de este defecto sigue con incertidumbres, se ha logrado un progreso significativo en los últimos años para eliminar esta degradación (LID) relacionada con los defectos BO. (Hallam, et al., 2017)

Uno de los métodos para lograr la mitigación de estos defectos es la pasivación por hidrógeno o hidrogenización, que actualmente se está empezando a utilizar en la fabricación de células PERC (que es la tecnología que se está imponiendo en la actualidad) para mejorar la calidad y eficiencia de las células, logrando así eliminarlos desde su manufactura. Sin embargo, otra perspectiva es usar este método para regenerar los módulos fotovoltaicos ya instalados que han perdido su eficiencia durante el tiempo de operación. Esto traería beneficios no solo económicos al recuperar la eficiencia perdida sino también ambientales al evitar generar más gases de invernadero para producir nuevos

paneles fotovoltaicos, y a la vez se consigue alargar la vida de los paneles fotovoltaicos ya existentes e instalados.

La razón fundamental de este trabajo es entender la degradación LID, y realizar una cuantificación de las potenciales ganancias de aplicar este método en las instalaciones fotovoltaicas que están operando, incluyendo también aquellas instalaciones que está previsto que sean instaladas hasta 2020, para proponer el diseño de un dispositivo que permita realizar el proceso de pasivación en instalaciones de huertos solares. Cabe decir que se realiza la cuantificación hasta 2020 porque es el lapso de tiempo en el que se esperaría poder lanzar al mercado un equipo industrial de estas características, por lo que se hace la estimación del nicho de mercado.

### 1.2. OBJETIVOS

Este trabajo de investigación experimental consta de tres objetivos principales que se desarrollarán para conocer la posibilidad de realizar la recuperación de módulos solares instalados en huertos solares. Estos objetivos son:

- Investigar y entender el origen de la degradación LID que afecta a módulos solares de silicio monocristalino. Recopilar la información existente sobre la pasivación del defecto mediante el uso de luz, corriente y temperatura, y calcular el potencial económico que tendría este proceso si se lo aplicará a huertos solares que están operando y que van a instalarse en España hasta 2020.
- Comprobar lo estudiado experimentalmente a nivel de laboratorio. Realizar pruebas de los mecanismos de eliminación de LID en células solares Al-BSF monocristalinas tipo P.
- Diseñar un prototipo para realizar pruebas a nivel de laboratorio que sirva para la mitigación de la degradación LID en módulos solares de silicio monocristalino. Investigar tecnología existente en el mercado como la propuesta, y finalmente conocer el coste que tendría el tratamiento y el presupuesto para la construcción de este prototipo para establecer su viabilidad económica.

### 1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En la introducción de este trabajo se realizará un breve resumen de la tecnología fotovoltaica, en el que se estudia desde la construcción de una oblea de silicio hasta las distintas tecnologías y métodos para formar el módulo solar. Y se analizan las razones por las cuales los módulos sufren defectos en su construcción y que provocarán la degradación de los mismos.

En el segundo capítulo ya se hace un estudio más profundo del defecto BO presente en las células de silicio monocristalino, que es el precursor de la degradación y pérdida de potencia en módulos solares. Se hace una recopilación de las investigaciones hechas hasta la actualidad sobre el origen del defecto y como tratarlo para eliminarlo de las células solares. Los diferentes métodos para tratarlo son descritos y detallados sus mecanismos y tecnología necesaria para actuar en las diferentes etapas de vida de la célula.

El tercer capítulo es la parte experimental, en donde se pondrán a prueba todas las teorías estudiadas en el capítulo 2. Se hace una descripción de la metodología para evaluar las células, descripción de equipos y técnicas usadas, y finalmente se realiza una discusión de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

Con las pruebas realizadas en el capítulo 3, se hace una propuesta de un equipo a nivel de laboratorio en el capítulo 4. Un prototipo basado en tecnología Led para ser usado en la eliminación de los defectos presentes en módulos solares que provocan la pérdida de potencia en la operación normal de estos. Se detalla el diseño del equipo que incluye diseño electrónico del circuito de control, diseño de PCB para la lámpara de Leds, y programación del microcontrolador para controlar todos los componentes del equipo diseñado.

Finalmente, en el capítulo 5 se hace una recopilación de la tecnología existente para la eliminación de la degradación LID y las empresas que lo están utilizando. Se detalla un cálculo del coste que tendría el tratamiento a ser aplicado en módulos solares, y se presenta el presupuesto para la construcción del prototipo diseñado.

### 1.4. ANTECEDENTES

El fenómeno fotovoltaico es la base de las células solares contemporáneas, ya que la conductividad de materiales semiconductores como el Silicio aumenta cuando está expuesto a luz solar, porque cuando los fotones son absorbidos pueden provocar el salto de electrones a la banda de conducción, incrementando la conductividad del material. Sin embargo, los semiconductores tienen pocos electrones libres, y por tanto baja conductividad, por lo que se añade pequeñas porciones de otros materiales, impurezas, para incrementarla en un proceso llamado dopado.

Los paneles solares fotovoltaicos hechos de silicio constituyen en la actualidad más del 90% de las centrales fotovoltaicas. (IDAE, 2011) Hay dos grupos principales de paneles de Silicio: silicio monocristalino (cSi) y multicristalino (multi-Si). En el monocristalino la red cristalina es continua al contrario del multicristalino el cual está constituido por muchos cristales pequeños, alrededor de los cuales se crean bordes. En estos bordes se producen defectos, y como consecuencia el tiempo de vida de los portadores de carga es menor para el silicio multicristalino. Además, el tamaño del grano es importante para la tasa de recombinación, ya que a mayor tamaño de grano mayor voltaje de circuito abierto, y esto quiere decir que un panel de cSi que no tiene bordes de granos tiene mayor eficiencia que un panel multicristalino (multi-Si).

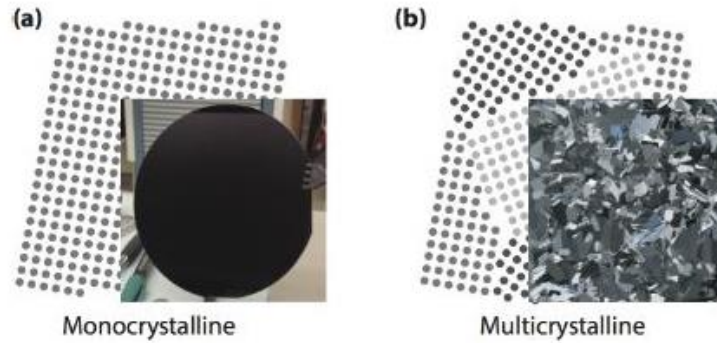


Figura 1- 1 Ilustración de una lámina (a) monocristalina y (b) policristalina de Silicio.  
Fuente: (Smets , et al., 2015)

Los paneles de silicio pueden ser de dos tipos: tipo P y tipo N, para lo que se agrega en el proceso de fabricación de las obleas boro o fósforo respectivamente. El silicio puro cuenta con cuatro electrones de valencia que comparte con átomos vecinos, al añadir electrones de valencia como en fósforo o boro, se modifican sus propiedades conductoras. El Boro tiene tres electrones de valencia, la falta de un electrón en la red de silicio crea un “hueco” que permitirá que los electrones sean capaces de moverse, de un hueco a otro, por tanto, incrementan su conductividad. Al contrario, el fósforo tiene 5 electrones de valencia, al interactuar con los cuatro del Si queda un electrón débilmente ligado o libre lo que significa que podrá alcanzar la banda de conducción fácilmente aumentando la conductividad.

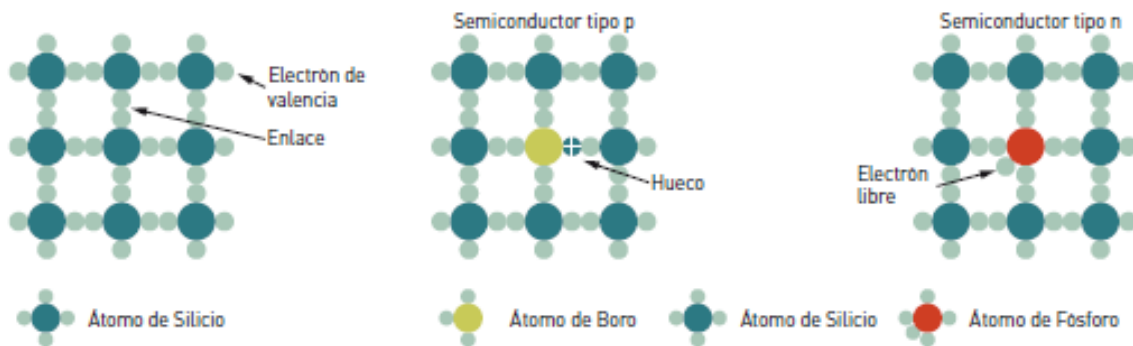


Figura 1- 2 Estructura cristalina del silicio (izq.), y silicio dopado con boro y fósforo (dcha.)  
Fuente: IDAE (IDAE, 2011)

La célula solar está formada por la unión de dos semiconductores con dopajes complementarios formando la unión p-n. En esta región, los electrones del lado tipo n perciben los huecos del lado dopado tipo p y se mueven para llenarlos formando el par electrón-hueco, cuando un fotón interactúa con este par se liberan ambas cargas y generan una corriente eléctrica, cuando hay carga externa conectada. No todos los portadores generados por este proceso contribuyen a la generación de corriente, ya que una porción se recombina antes de llegar a los contactos. Esta recombinación ocurre en sitios donde existen defectos locales como impurezas, dislocaciones, y bordes de grano. Por otro lado, muchos de los fotones que llegan a la tierra tienen una energía muy superior a la necesaria para que los electrones salten a la banda de conducción, y ese exceso de energía se pierde generando calor. Esto reduce la eficiencia de la conversión de energía solar a eléctrica, por eso este

es un valor crítico en cuanto a calidad de la célula solar. Cuando ocurre la generación externa de portadores (electrones y huecos) debido a la exposición a la luz, el exceso de la concentración de portadores está dada por el balance entre generación y recombinación.

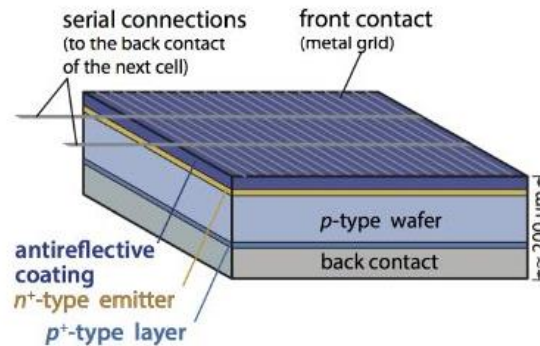


Figura 1- 3 Esquema de una célula cSi  
Tomada de: (Smets, et al., 2015)

Las células tipo P son las más comunes, gracias a que su fabricación es más simple comparada con la requerida para el tipo N. Además, ha habido un rápido aumento de las eficiencias de célula para los dispositivos de tipo P monocristalinos y multicristalinos, gracias a las mejoras asociadas a fabricación de grandes volúmenes. Al producirse de este tipo en mayores cantidades y por lo tanto estar instalado en la mayor parte de las plantas fotovoltaicas nos centraremos en estudiar este tipo de células tipo P.

Para la fabricación de módulos se utilizan a menudo obleas de silicio multicristalino, que a priori son de menor calidad. Sin embargo, existe el potencial de mejorar la calidad de estas láminas a través de técnicas de pasivación avanzadas. Estas células están sujetas a la presencia de metales de transición y presentan zonas de recombinación relacionadas con éstas y otras impurezas, como por ejemplo la formación de complejos BO y la concentración de impurezas (Fe) en los bordes de los granos.

En células monocristalinas de silicio, al defecto Boro-Oxígeno (BO) se le atribuye la degradación inducida por luz, un efecto complejo que se forma por la prolongada exposición de las células a la luz, que afecta a la operación de las células provocando pérdida de potencia de estas. Este defecto puede eliminarse con algunos métodos ya existentes que han sido probados por varios investigadores y que ya se están aplicando en la manufactura de células solares, algunos de los cuales serán estudiados en el capítulo siguiente.

Por otro parte, en células multicristalinas ha sido identificado otro tipo de mecanismo LID recientemente, que se considera más severo que la degradación BO, pues no está ligado a complejos BO o a alguna disociación hierro-boro. Aún existen incertidumbres alrededor de este defecto, y se desconoce el origen y como tratarlo para eliminarlo completamente de este tipo de célula, aunque se han obtenido buenos resultados al combinar procesos térmicos y procesos de pasivación subsecuentes a este. Sin embargo, se sigue estudiando la mejor alternativa para desarrollar esta tecnología a nivel industrial. (Hallam, et al., 2017)



## **2. ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo nos adentraremos a estudiar por qué se produce la degradación que sufren los módulos solares y que ha llamado la atención de investigadores y fabricantes al provocar la pérdida de potencia en módulos solares. Conoceremos el origen y los estados del defecto, y se detallarán los mecanismos permanentes y no permanentes para eliminar el defecto BO presente en las células Cz monocristalinas. Además, se hará un estudio detallado de cómo la iluminación, corriente y temperatura afectan a las propiedades del hidrógeno presente en la célula, siendo este el elemento que permite realizar el proceso de pasivación. Además, con la variación de estos parámetros conoceremos como se puede modificar el tiempo de proceso y su estabilidad. Finalmente, en este capítulo se hace una cuantificación del potencial de recuperación de los módulos a tratar con este proceso en España para huertos solares que están en operación y los que serán instalados hasta 2020.

### **2.1. DEGRADACIÓN INDUCIDA POR LUZ RELACIONADA CON B-O**

Una célula solar genera electricidad cuando es expuesta a la luz solar, sin embargo, debido a esta misma exposición la célula puede degradarse. Esto es causado por defectos en el material semiconductor que son activados por la iluminación, lo que provoca que la recombinación aumente reduciendo el tiempo de vida del material. A este efecto se lo conoce como degradación inducida por luz (LID) o ahora conocida como degradación inducida por portadores de carga (CID) ya que se ha descubierto que no solo se puede generar defectos con la luz sino también mediante inyección de corriente, y ambos métodos sirven para inyectar portadores en la célula.

Hay tres diferentes defectos conocidos en el silicio dopado con boro, estos son: pares Fe-B, pares Cu-Cu y complejos B-O. Sin embargo, la degradación LID se atribuye a los complejos BO. Durante muchos años se pensó que la degradación era debido a la inducción mediante luz, pero en 1996 se encontró una degradación similar al aplicar voltaje a una célula por lo que se concluyó que la degradación es causada por la presencia de portadores minoritarios en exceso y que los fotones no están directamente relacionados. Luego en 2009 se determinó que no está determinado por la densidad en exceso de portadores, sino por el número total de portadores minoritarios, y que la concentración de defectos está controlada por la concentración de huecos y no la concentración de Boro (Macdonald, et al., 2009). Otro trabajo dice que la concentración del defecto era proporcional al Boro en vez de a los huecos, por lo que actualmente no hay modelos que definan completamente y expliquen las características del defecto, aunque gracias a experimentos se ha llegado a ciertas conclusiones que ayudan a comprenderlo (Forster, et al., 2012). Entre algunas de ellas tenemos:

- El valor de saturación de la concentración del defecto es proporcional al producto de la concentración de boro y al cuadrado de la concentración de oxígeno, y ambas concentraciones parecen ser independientes de la temperatura.
- Mediante recocido térmico en condiciones de oscuridad el tiempo de vida se recupera a su valor inicial. Esta recuperación ocurre en rangos de temperatura de 110 °C a 200 °C.

- Una desactivación permanente de centros de recombinación puede lograrse con iluminación en rangos de temperatura de 70-200 °C. La estabilidad de desactivación está relacionada con la concentración de donantes térmicos (concentración de oxígeno), generados durante largos periodos de recocido, que retrasan el proceso de desactivación. (Lim, et al., 2010)

La degradación inducida por luz relacionada con BO ocurre en células solares industriales de silicio Cz (Czochraslki) tipo P debido a la presencia simultánea de boro y oxígeno intersticial en la oblea de silicio. Debido a la técnica de fabricación, el nivel de contaminación de oxígeno es alto, sin embargo, existen muchas alternativas de cristalización que pueden reducir la concentración de oxígeno en las obleas de silicio. Cuando se usa silicio monocristalino, una propuesta para reducir el oxígeno es usar silicio FZ (Float Zone) que tiene concentraciones dos órdenes de magnitud menores que el silicio Cz, y con esto se mitiga la LID relacionada con BO. Pero este material FZ es más costoso que aquellos producidos con silicio Cz y por eso no es muy utilizado por los fabricantes. Actualmente, existen algunos métodos capaces de reducir LID BO pero todos conllevan inconvenientes tanto económicos como tecnológicos que los hace menos efectivos económicamente hablando si los comparamos con el uso de silicio Cz, es por eso que aunque se conozcan las alternativas a este material desde hace mucho tiempo sólo el uso de silicio cristalino es comúnmente manejado en la industria.

Para la evitar las desventajas que representa el uso de materiales de silicio alternativos se aplican dos métodos ampliamente conocidos para reducir la degradación a través de la fabricación de la célula: el primero utiliza procesos térmicos a altas temperaturas en ausencia de luz, y el segundo procesos de recocido con adición intencionada de portadores por iluminación a bajas temperaturas. Es ampliamente conocido que el hidrógeno juega un papel crítico en la pasivación de defectos, de ahí la importancia de usar una capa dieléctrica que contiene hidrógeno en el proceso de fabricación de la célula, en el proceso de recocido a altas temperaturas se consigue que este hidrógeno sea introducido en el sustrato lo que mejorará el tiempo de vida del material y posibilitará eliminar térmicamente los defectos precursores del B-O para reducir la extensión de la degradación y aumentar la vida de los portadores de carga minoritarios.

Sin embargo, si no se usan los parámetros apropiados durante los procesos térmicos es posible empeorar la concentración de defectos, y por eso necesitan ser procesos críticamente controlados sobre todo en el enfriamiento de las células después de haber aplicado altas temperaturas. Por otro lado, el recocido con iluminación ha demostrado que permite eliminar completamente la degradación LID a bajas temperaturas (<230°C) al contrario del proceso térmico sin luz que solo reduce la concentración del defecto, pero no lo elimina. (Hallam, et al., 2017)

El silicio puede verse beneficiado por las técnicas de pasivación que permiten reducir estos efectos negativos e incluso eliminarlos. Este proceso viene incorporándose rutinariamente en la fabricación de las células, aunque sin entender completamente su funcionamiento. (Hallam B. J., et al., 2014) Recientemente se han producido avances significativos de los mecanismos de pasivación, reduciendo la escala de tiempo para conseguir una recuperación permanente de las células en cuestión de segundos (dependiendo de intensidad de iluminación o corriente) haciéndolo factible para la producción comercial, y también ha dado lugar a resultados prometedores que pueden ser

aplicados en la recuperación de la pérdida de potencia producida por la degradación natural de módulos instalados y en operación.

### a. Mitigación de LID durante la fabricación de células y encapsulado de módulos

En células solares tipo P el hidrógeno es introducido de forma natural a través de la célula durante el proceso convencional de fabricación, lo que permite de una manera relativamente sencilla eliminar los complejos BO que dan lugar a la degradación inducida por luz, y de esta manera, se pueden incorporar acciones dentro del proceso normal para eliminar la LID dándole a este tipo de célula cierta ventaja. Actualmente existen varias compañías que han creado herramientas para la mitigación de este defecto con resultados cercanos a 75-80% en reducción del defecto, entre ellas destacan Centrotherm (Alemania), Asia Neo Tech (Taiwan), DR Laser (China), etc. Durante la manufactura el proceso se ha incorporado durante el enfriamiento posterior al recocido a alta temperatura de la célula. Los fabricantes prefieren utilizar dispositivos autónomos que no afecten a la cadena de fabricación, ya que ofrecen mayor flexibilidad al permitirles actuar sobre procesos desarrollados por otras empresas. Estas herramientas actualmente están usando rangos aproximados de intensidad de iluminación de 5 a 20 soles, a mayor iluminación se acelera el proceso y mejora el rendimiento. En procesos industriales de fabricación de obleas se requiere intensidades altas de iluminación para poder llegar a tiempos de procesado de 25-45 segundos, por lo que se tiende a usar herramientas basadas en láser.

Una desventaja de pasivar durante la fabricación de la célula es que estas están expuestas también a altas temperaturas en los procesos posteriores, por ejemplo, durante la soldadura las células están expuestas a temperaturas  $>230\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante unos pocos segundos y a temperaturas de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  por más de 15 minutos durante el encapsulado. Aplicar estos procesos térmicos después de la pasivación puede desestabilizarla, permitiendo de nuevo que el material se degrade con la exposición a la luz. Aunque un proceso de 15 minutos a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  se espera que desestabilice menos del 5% de los defectos pasivados. (Hallam, et al., 2017)

### b. Mitigación natural de LID durante la operación

La operación normal de los módulos en campo puede posibilitar la recuperación natural de los defectos B-O gracias a la fuente de hidrógeno introducida en el módulo de silicio desde la fabricación de la célula. Las condiciones máximas de temperatura que se pueden alcanzar durante la operación de un módulo dependen de la temperatura ambiental, y es normal que alcancen los  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y a esta temperatura y con 700 horas de operación se ha reportado una reducción del 40% en la pérdida del Voc (como se verá en la parte experimental de este trabajo, el Voc o tensión de circuito abierto de la célula es el parámetro que se utiliza habitualmente para monitorizar la degradación inducida por luz). (Lee, et al., 2015)

Por otra parte, dependiendo de la instalación, lugar geográfico y época del año en que ocurre la instalación el tiempo para que un módulo se recupere variará porque todos estos factores influirán en la temperatura de operación de éste. Se puede acelerar este efecto cuando se deja en circuito

abierto a los módulos al inicio de la instalación. A 60 °C en circuito abierto se puede observar una recuperación total con 200 horas de iluminación continua. Sin embargo, la dependencia de condiciones resulta en rangos de tiempo de recuperación que pueden variar desde semanas a años, lo que hace que este método no sea apreciado por los instaladores de los proyectos que prefieren soluciones conocidas y a largo plazo para mejorar las eficiencias ya sea durante la fabricación de la célula o la encapsulación del módulo.

### 2.2. MÉTODOS PARA TRATAR LID EN CÉLULAS

El proceso de regeneración de los defectos que causan la LID tal y como se está actualmente utilizando en la industria fue propuesto por primera vez en 2009 por los investigadores de la Universidad de Konstanz, Herguth y Hahn. (Herguth & Hahn, 2009) Este problema empezó a estudiarse en obleas Cz-Si tipo P, y se encontró que los defectos que causaban dicha degradación LID eran complejos Boro-Oxígeno. Estos mismos investigadores continuaron estudiando la influencia del hidrógeno (que estaba presente en las capas de encapsulación de la célula) en el proceso de regeneración, para centrarse después en buscar un proceso de regeneración que pudiera ser aplicado a la industria en gran escala. Luego estudiaron la influencia de los procesos de alta temperatura durante la fabricación de la célula, y de cómo estos influían después en la mayor o menor dificultad de regenerar los defectos. Desarrollaron un modelo teórico de los defectos y llevaron a cabo simulaciones para ver cómo influían los distintos parámetros de la célula en la regeneración. Y finalmente investigaron la degradación en células multicristalinas, centrándose sobre todo en células de la tecnología PERC. A continuación, se presenta lo que se conoce de cómo tratar el defecto, su degradación y regeneración.

Con pocas horas de inyección de portadores (ya sea por iluminación o por corriente) el estado inicialmente inactivo del defecto se convierte en activo, lo que reduce el tiempo de vida y por tanto también la eficiencia. Podemos considerar tres estados del defecto (según Herguth, et al., 2010): en el estado inicial el defecto está inactivo y al inyectar portadores minoritarios, ya sea por luz o por corriente, el defecto se activa, siendo este el segundo estado; y el tercer estado del defecto se produce cuando ocurre la regeneración, mediante la cual el defecto vuelve a un estado inactivo y estable, ya que ha sido pasivado. En la Figura 2 - 1 tenemos como funciona el ciclo de degradación-regeneración del defecto, en el que primero se tiene que activar el defecto, es decir degradar la célula para poder pasar luego a la regeneración. También se puede observar que aunque se haya llegado a la regeneración puede volverse al estado degradado y de ahí al estado inicial.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

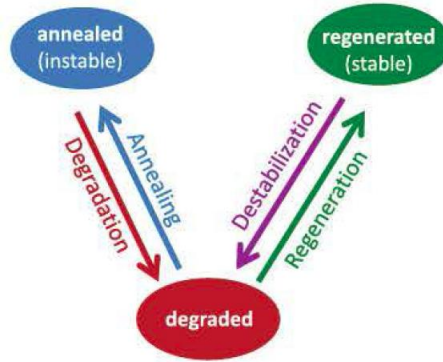


Figura 2 - 1 Estados del defecto LID  
Fuente: (Herguth, et al., 2010)

Existen dos tipos de tratamiento para tratar el estado activo (o degradado) del defecto, uno no permanente en el que el defecto pasa de activo (degradado) al inactivo (o aleado) mediante el recocido sin luz (dark anneal) de la célula, que logra devolverla a su estado inicial, o el segundo tratamiento con el que se lograría una desactivación permanente del defecto o dicho de otra manera una pasivación estable, mediante la aplicación adecuada de temperatura y luz o de temperatura y corriente. Para la estabilidad del defecto, la temperatura del tratamiento es un parámetro importante ya que determina la duración del tratamiento, en el sentido de que, si se supera el tiempo óptimo de tratamiento, se vuelve a desestabilizar el defecto.

Por otra parte, en el estudio hecho por (Hallam, et al., 2017) presenta un modelo de cuatro estados (Ver Figura 2 - 2), cuya diferencia con el modelo de Herguth es que se añade un tratamiento térmico para eliminar precursores del defecto BO, siendo este estado el D.

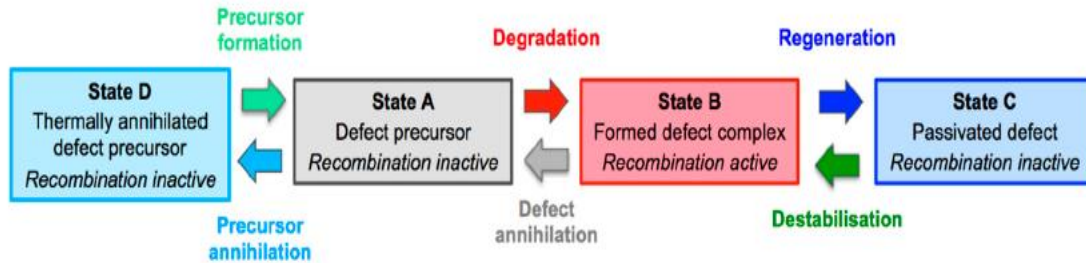


Figura 2 - 2 Representación del sistema de defecto B-O de 4 estados  
Fuente: (Hallam, et al., 2017)

De los procesos de transición entre los distintos estados, todos están activados térmicamente, y por lo tanto todos están activos simultáneamente. El nivel de ocupación de cada uno de los estados para un tratamiento dado dependerá de la velocidad de los procesos de transición.

El de recocido (annealing) y el de desestabilización son procesos puramente térmicos, que pueden ocurrir en la oscuridad, mientras que el de degradación y el de regeneración solo ocurren bajo inyección de portadores y requieren también de la presencia de hidrógeno. Si la concentración de hidrógeno es baja, la regeneración será más lenta que si la concentración es alta, y puede que no se alcance una regeneración completa independientemente de la receta que se utilice. Con un proceso adecuado y un tiempo suficiente, el hidrógeno puede difundirse a través de la oblea incluso a

temperaturas por debajo de 100 °C. Mientras que se cree que son necesarias muy altas temperaturas para introducir el hidrógeno en la célula, esto es más bien debido a la temperatura necesaria para liberar el hidrógeno atrapado en los dieléctricos que se usan en las células comerciales, más que debido a la difusividad del hidrógeno en el silicio.

El porcentaje de consecución del proceso de regeneración depende de la relación entre la velocidad de regeneración y la de desestabilización. Dado que la desestabilización tiene una energía de activación mayor (1.25 eV) que la regeneración (1.0 eV) la relación entre sus velocidades decrece conforme aumenta la temperatura, lo cual significa que la regeneración se vuelve más y más incompleta. Por lo tanto, la temperatura no puede aumentarse deliberadamente a no ser que a la vez se cambien las condiciones de procesos o la iluminación de la muestra.

La iluminación también juega un papel decisivo en acelerar la formación de los defectos, simplemente porque un proceso de pasivación rápido requiere que en primer lugar los defectos se formen de hecho. Esta dependencia se ha observado incluso para niveles bajos de iluminación, incluso a 0.01 soles, a los cuales la velocidad de reacción se satura. Esta intensidad, corresponde a la saturación a una concentración equivalente de electrones en exceso del orden de  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Por encima de este valor la reacción está dominada por la concentración de boro en el silicio tipo P, que típicamente es del orden de  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . (Hallam, et al., 2017)

### 2.2.1. TRATAMIENTO NO PERMANENTE: RECOCIDO SIN LUZ (DARK ANNEALING)

Los procesos térmicos pueden reducir el alcance de la degradación al reducir la concentración del complejo y sus precursores, como el oxígeno intersticial dímero. Sin embargo, se deben escoger los parámetros apropiados para el proceso térmico pues si no puede empeorarse la situación al incrementar la concentración del defecto, ya sea configurando apropiadamente los rangos de temperatura del proceso o durante el enfriamiento de la célula después de estos procesos a altas temperaturas. (Hallam, et al., 2017)

El método de recocido sin luz es comúnmente conocido, y ha sido ampliamente utilizado para recuperar las células de la degradación logrando volver a sus valores iniciales, pero con este proceso no se logra eliminar permanente los defectos que generan la degradación, por lo que si se vuelve a exponer a la luz a las células vuelven a decaer sus valores de eficiencia. Los parámetros normalmente utilizados para realizar este proceso son aplicar temperatura de 200°C y tiempo de aproximadamente 30 minutos en la oscuridad. Normalmente se utiliza este tratamiento con pruebas de degradación de células y test de eficiencia, o también algunos investigadores lo usan como pretratamiento antes de la pasivación. En este trabajo se ha probado este tratamiento en células que hayan sido previamente degradadas, para comprobar la validez de los resultados publicados en la literatura. Los resultados de estas pruebas están descritos en el capítulo 3.

### 2.2.2. TRATAMIENTOS PERMANENTES

El hidrógeno juega un papel crítico en la desactivación permanente de complejos, sin embargo, aunque los beneficios del hidrógeno son bastante aceptados, aún no son bastante conocidos ni entendidas las variaciones que afectan al proceso de difusión y pasivación, como la dependencia de los parámetros del material que afectan a los resultados, teniendo teorías contradictorias y distintas

variaciones e interpretaciones. Estas complicaciones llegan porque el hidrógeno atómico interactúa con la estructura y virtualmente con todas las impurezas y defectos del silicio, además es difícil medir o detectar hidrógeno dentro del silicio y además puede estar incorporado sin intención en las capas durante los distintos pasos del proceso de fabricación.

La habilidad del hidrógeno de asumir distintos estados de carga (positivo  $H^+$ , neutro  $H^0$  o negativo  $H^-$ ) tiene importantes implicaciones para la pasivación de impurezas y defectos en el silicio. Ciertos defectos solo pueden ser pasivados con cierto estado de carga del hidrógeno y requieren la presencia de electrones que permitan que el proceso ocurra. Por otro lado, es sabido que  $H^+$  y  $H^-$  tienen baja movilidad. (Mathiot, 1989) Sin embargo, el  $H^0$  no es afectado por campos eléctricos y efectos de carga en el silicio, y tiene una difusividad de 5 órdenes de magnitud más que  $H^+$ . Por lo tanto, es útil poner el hidrógeno en carga neutra para así mover el hidrógeno a través de la célula solar desde la fuente de hidrógeno que típicamente es una capa dieléctrica en la superficie de la célula.

Basado en la carga y configuración de cada sitio de recombinación en la célula, se requiere un estado específico de carga para que éste sea pasivado. Es común que existan diversas impurezas y defectos en la célula que requieran pasivación durante la fabricación, por eso es deseable usar condiciones que generen simultáneamente distintos tipos de carga del hidrógeno con el fin de pasivar la mayor cantidad de defectos en el silicio. Como el H se encuentra normalmente en el estado de carga de los portadores mayoritarios,  $H^0$  siempre está en menores cantidades que  $H^+$  en zonas tipo P y que  $H^-$  en zonas tipo N, y deben usarse las condiciones adecuadas para generar concentraciones que maximicen esta concentración de  $H^0$ .

Durante procesos térmicos subsecuentes, es esencial que el hidrógeno esté en un estado de carga adecuado para repasar algún centro de recombinación que se hubiera reactivado durante estos procesos. Además, para atrapar el hidrógeno, es deseable poner el hidrógeno sin enlazar en un estado de baja movilidad para evitar que alcancen superficie o se escape y abandone el dispositivo. Ciertas estructuras, como por ejemplo las regiones de silicio tipo P debajo de la capa de metal/Si pueden ayudar a atrapar el hidrógeno al convertir casi todo el hidrógeno en la zona cargada a  $H^+$  y por tanto reducir su movilidad.

En resumen, el estado de carga de hidrógeno afecta de manera crítica al proceso de pasivación, que incluye:

- 1) El movimiento del hidrógeno en y a través de la célula solar.
- 2) Activación del hidrógeno cuando está dentro del silicio para permitir la pasivación de los sitios de recombinación durante el proceso de hidrogenización.
- 3) Atrapar el hidrógeno en el silicio después de la hidrogenización para asegurar que no se escape en procesos subsecuentes. (Hallam B. J., et al., 2014)

Para pasivar efectivamente los defectos y asegurar su permanencia en este estado, se aprovechan dos propiedades: la primera, de  $H^-$ , su alta actividad para actuar en más reacciones de pasivación gracias a los electrones que poseen y la segunda,  $H^0$  su alta movilidad en el silicio, ya que  $H^0$  no es

afectado por campos eléctricos o por los efectos electrostáticos que crean las fuerzas coulombianas en especies cargadas, lo que bloquea al hidrógeno cargado. En el silicio tipo P,  $H^0$  se recombina con un hueco para formar  $H^+$ , de tal forma que en cualquier condición la concentración de equilibrio de  $H^0$  es mucho menor que la concentración de las especies cargadas. Mientras que  $H^-$  debe cambiar a  $H^0$  antes de convertirse en  $H^+$ , lo que hace que  $H^-$  tenga mayor estabilidad y tiempo de vida que  $H^0$ , pero que sea más difícil de generar y penetrar en el silicio tipo P. Efectos electrostáticos como campos eléctricos externos o la presencia de carga electrostática en la superficie de capas dieléctricas y/o luz pulsada y fuentes de calor pueden ser usadas para generar las condiciones necesarias para formar más concentraciones de  $H^0$  y  $H^-$ , para dejar al silicio en su estado original de tipo P, pero con presencia de estos estados de carga adicionales en el hidrógeno. El factor determinante para las concentraciones de equilibrio y rangos de generación de varios tipos de carga del hidrógeno es la concentración de portadores y sus cuasi niveles de Fermi.

Controlando los portadores de carga se controla los estados de carga del hidrógeno, en el silicio tipo P será incrementando la concentración del portador de carga minoritario (electrón). Otra alternativa es reducir la concentración del portador de carga mayoritario como consecuencia la concentración del minoritario incrementará. La inyección de portadores de carga se puede lograr por iluminación o por inyección de corriente.

### 2.2.2.1. INYECCIÓN DE CORRIENTE

Una alternativa al uso de intensidades altas de iluminación es la aplicación de corriente de inyección para estabilizar las células, donde además las células pueden ser apiladas en bloque para ser tratadas. Este tratamiento es más atractivo con respecto a la pasivación con iluminación por ese motivo, ya que para tratamiento con iluminación se requiere iluminar y elevar la temperatura de cada célula individualmente, es decir se requiere de mayores espacios, grandes fuentes de iluminación y temperatura si se quiere aplicarlo industrialmente. Sin embargo, la desventaja de este tratamiento es que al pasar corriente por todo el bloque de células puede resultar que el calentamiento de estas no sea homogéneo lo que reduciría la efectividad de la mitigación de la LID.

Implementar la mitigación de LID durante la encapsulación del módulo usando corriente es una alternativa sencilla ya que tiene la ventaja de ser el último proceso en la secuencia de fabricación por lo tanto se evita desestabilizar los defectos pasivados y se evita modificar la laminación de la célula con iluminación. Usando este método, se han obtenido resultados de una reducción del 80% en la extensión de LID. Para estos tratamientos durante el proceso de laminado se requiere una corriente equivalente a 1 sol para regenerar completamente los defectos. (Kwapil, Niewelt, & Schubert, 2017) han mostrado que la velocidad de degradación de los defectos tiene una dependencia aproximadamente lineal con el nivel de inyección, lo que significa que doblando por dos el nivel de inyección se dobla también la velocidad de degradación, es decir se puede jugar con los parámetros para reducir el tiempo de tratamiento.

### 2.2.2.2. ILUMINACIÓN

Puede ser usada para generar estados de carga, y no sólo cambia la concentración de los portadores de carga minoritarios, sino que además mueve la energía del cuasi-nivel de Fermi del electrón por



encima de la mitad de la banda bajo ciertas condiciones lo que incrementa la concentración de equilibrio de  $H^0$ .

Un parámetro crítico de la luz es el espectro que incide sobre la célula ya que dependiendo de la longitud de onda producirá distintos efectos sobre la misma. En la Figura 2 - 3 se observa los distintos tipos de longitud de onda en nanómetros.

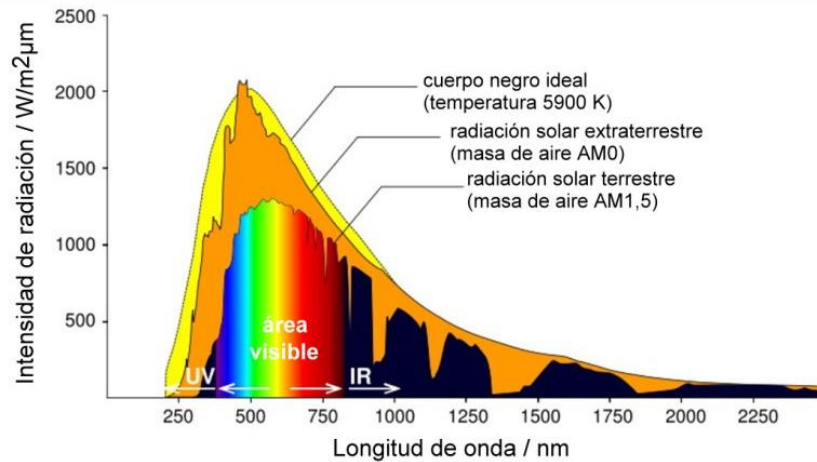


Figura 2 - 3 Irradiación de la luz solar según longitud de onda

Tomada de: [http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/0,59a8eb73686f7774797065092d097072696e74/Cambio\\_clim\\_tico\\_-\\_clases\\_ss/ss\\_Energ\\_a\\_del\\_sol\\_6fg.html](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/0,59a8eb73686f7774797065092d097072696e74/Cambio_clim_tico_-_clases_ss/ss_Energ_a_del_sol_6fg.html)

La energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz que lo aporta, y viene dada por la ecuación:

$$E_{\text{fotón}} = h * f = h * \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$h = 6,63 * 10^{-34} \text{ J} * \text{s} = \text{cte de Plank}$$

$$c = 3 * \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}} = \text{vel. de la luz}$$

$\lambda$  = longitud de onda

Por lo tanto, a mayor longitud de onda la energía que aporta a un electrón es menor, esta energía debe ser la suficiente ( $E_{\text{fotón}} \geq E_g$ ;  $E_g = 1.1 \text{ eV}$ ) para hacer que el electrón pase de la banda de valencia a la de conducción y por tanto exista movimiento de electrones generando corriente eléctrica. La Figura 2 - 4 muestra un diagrama de cómo el electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

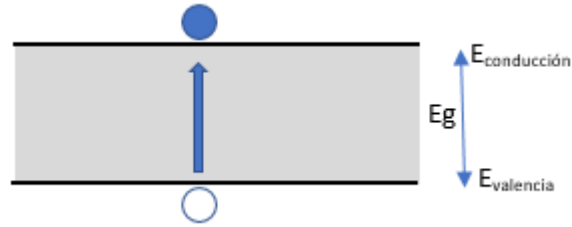


Figura 2 - 4 Modelo de bandas en células solares, movimiento electrón de la banda de valencia a la de conducción  
Fuente Propia

Así, la luz azul (450-495nm) genera más energía de la que absorbe la célula y generalmente es absorbida en los primeros nanómetros de la célula, mientras que a mayor longitud de onda la energía será menor por tanto la energía aportada por un fotón será utilizada completamente y no se perderá o disipará en forma de calor. La luz roja (620-780nm) es absorbida más profundamente en la célula, y necesita aproximadamente 60 micras para ser completamente absorbida, mientras que la luz infrarroja (>780nm) es difícilmente absorbida teniendo que en una profundidad de 100um solo se ha absorbido el 10% de esta. (Smets , et al., 2015)

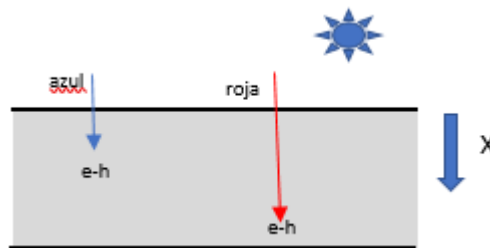


Figura 2 - 5 Profundidad a la que se realiza la absorción y generación de un par e-h+  
Fuente propia

Teniendo en cuenta que queremos iluminar la célula para generar electrones que neutralicen la carga positiva del hidrógeno, necesitaremos aportar fotones con la energía necesaria para provocar que el electrón salte de la banda de valencia a la de conducción, y con el objetivo de evitar calentar la célula, se empleará una luz con longitud de onda cercana a 1000nm. Hay que tener en cuenta que, para obtener el equivalente a 10 soles, es necesario tener un flujo de 1W/cm<sup>2</sup> en condiciones de AM1.5., pero que con luz de 1000nm solo es necesaria la mitad de potencia luminosa de la que haría falta con luz de 500nm. (Australia Patente nº WO 2013/173867 A1, 2013)

Además, la iluminación posibilita que la pasivación sea más rápida al acelerar la formación de defectos, un parámetro importante para la efectividad del proceso. En particular para procesos convencionales de baja temperatura, la habilidad para pasivar defectos está limitada por la existencia de defectos para la pasivación. La formación del defecto depende directamente del rango de iluminación, así para altas intensidades de iluminación que se pueden conseguir con tecnología láser de alta intensidad es posible la formación del defecto en alrededor de 4 segundos, mientras que la formación del defecto típica requiere de minutos a horas para temperaturas menores a 200°C usando baja intensidad de iluminación del orden de 1 sol. (Hallam, et al., 2017) Existen ya procesos en los que se han formado y pasivado defectos B-O para eliminar completamente LID que duran 10

segundos en módulos solares Al-BSF, este rango de tiempo es conveniente para la producción en serie de paneles que son tratados a temperaturas de entre 200-300 °C. Sin embargo, si se usa una temperatura excesivamente alta puede generarse un proceso incompleto de pasivación por lo que esta temperatura debe ser cuidadosamente escogida.

Por otro lado, mediante luz pulsada en tiempo e intensidad es posible controlar el estado de carga del hidrógeno, particularmente cuando se producen variaciones en la temperatura que pueden provocar cambios de estado no controlados. Una ventaja de la luz pulsada es que permite modificar los tiempos de vida de los estados de carga del hidrógeno. El silicio tipo P necesita tener electrones asociados con átomos H para unirlos a defectos, y se puede usar la luz pulsada con el fin de alargar la vida de  $H^-$  para que provea electrones a estos defectos. El  $H^-$  es relativamente estable con una vida de 1s, por lo que la luz pulsada debería tener un periodo menor al tiempo de vida esperado por el respectivo estado de carga para mantener su condición de carga. Con esto se evitará liberar grandes cantidades de energía térmica en el silicio que podrían provocar variación de las concentraciones del portador minoritario. Además, con esto se podrá generar altas concentraciones de todos los estados de carga del hidrógeno al iluminar con la luz pulsada a un periodo menor que el tiempo del tipo de hidrógeno con el menor tiempo de vida.

### 2.2.2.3. TEMPERATURA

Generar térmicamente portadores es una forma efectiva de incrementar la concentración de portadores minoritarios, ya que incrementará la concentración de equilibrio de  $H^0$ , incrementando la difusividad de este. Esto quiere decir que, al incrementar la temperatura, la ratio de concentraciones decrece y el nivel de energía Fermi se moverá a la mitad de la banda. Esto está compensado de alguna manera por el incremento en la temperatura relacionando las ratios  $H^0: H^+$  y  $H^0: H^-$ , por lo tanto, el nivel Fermi permanecerá constante mientras la concentración de  $H^0$  se incrementará con la temperatura, por lo que la temperatura tiene una importante influencia en los rangos de eliminación de defectos.

La temperatura influye directamente con el tiempo de degradación-regeneración en las células, en el estudio hecho por (Wilking, et al.,2014) realizaron pruebas de regeneración a distintas temperaturas en un rango de 120 °C a 400 °C. Los resultados muestran que para temperaturas mayores a 200 °C la regeneración se logra en un tiempo máximo de 3 segundos. La Figura 2 - 6 derecha muestra la mínima concentración de defectos Boro-Oxígeno que puede alcanzarse a cada temperatura a 2.7 soles. Por encima de 230 °C puede existir reactivación de los defectos y una incompleta regeneración.

Como resultado, la temperatura de regeneración es un balance entre regeneración acelerada y reducción de la capacidad de una regeneración completa a alta temperatura y hay que elegirla cuidadosamente dependiendo del nivel de inyección: a 2.7 soles puede alcanzarse una regeneración completa entre 200 °C y 230 °C con una constante de tiempo  $< 3$  s, lo que significa que puede conseguirse una regeneración completa en menos de 10 segundos.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

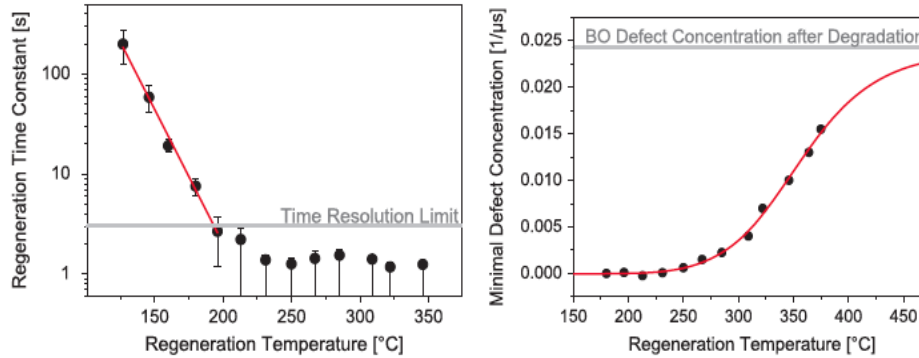


Figura 2 - 6 Constantes de tiempo características de procesos de regeneración medidos a diferentes temperaturas e iluminación de 2.7 soles. (Der) Concentración mínima del defecto BO que puede ser alcanzada durante la regeneración a 2.7 soles.

Fuente: (Wilking, Beckh, Ebert, Herguth, & Hahn, 2014)

El uso de altas temperaturas puede causar daños críticos no sólo en el material y en las conexiones metal/silicio, sino que también puede afectar en la pérdida o escape de hidrógeno de la célula, o provocar empeorar los defectos y, generar inestabilidad en la pasivación, por lo que se debe elegir correctamente la temperatura para este proceso.

La temperatura máxima que podemos utilizar sin comprometer que la regeneración sea completa puede determinarse mediante el siguiente procedimiento:

1. Medir la constante de tiempo de regeneración de una muestra dada a una temperatura lo bastante baja como para que la regeneración se pueda medir y sea completa, por ejemplo, 130°C. Esto nos dirá si la muestra es de regeneración rápida (constante de tiempo del orden de minutos a 130 °C) o lenta (constante de tiempo del orden de horas a 130 °C).
2. Extrapolar la constante a altas temperaturas usando la correlación de Arrhenius. La constante de tiempo de desestabilización a distintas temperaturas puede encontrarse en la literatura. (Wilking, et al., 2014)
3. Calcular la relación entre las velocidades de regeneración y de desestabilización a esa temperatura. La temperatura máxima es aquella para la que dicha relación se hace igual a 100, si se desea obtener una regeneración completa.

En nuestro caso no hemos llevado a cabo dicho cálculo, ya que siempre vamos a trabajar a temperaturas bajas, por debajo de 150 °C, que es la temperatura máxima a la que podemos someter a un módulo sin que se degrade su encapsulado.

El estudio realizado por (Herguth, et al., 2010) explica cómo influye la temperatura en el tiempo de reacción de los estados del defecto y en la estabilidad después de la regeneración. En la Figura 2 - 7 (a) se observa el comportamiento del Voc durante el tiempo de aplicación del tratamiento de regeneración con iluminación a 2 soles, para células tratadas a distintas temperaturas. En todas ellas se observa la degradación y posterior recuperación de las células: a menores temperaturas (140-180 °C) el proceso es más lento que a mayores temperaturas durando 5 y 1 min respectivamente; a mayores temperaturas la degradación se produce en cuestión de segundos y el Voc incluso supera

su valor inicial. Sin embargo, en la Figura 2 - 7 (b) se observa que al realizar el tratamiento de light soaking para comprobar que el tratamiento de pasivación es estable, la eliminación de LID no se produjo o no resultó al nivel deseado a estas temperaturas pues se observa que la pérdida de Voc es alta comparada con la de bajas temperaturas que es mínima (<1 mV a 180 °C) lo que quiere decir que se ha eliminado la LID de forma estable.

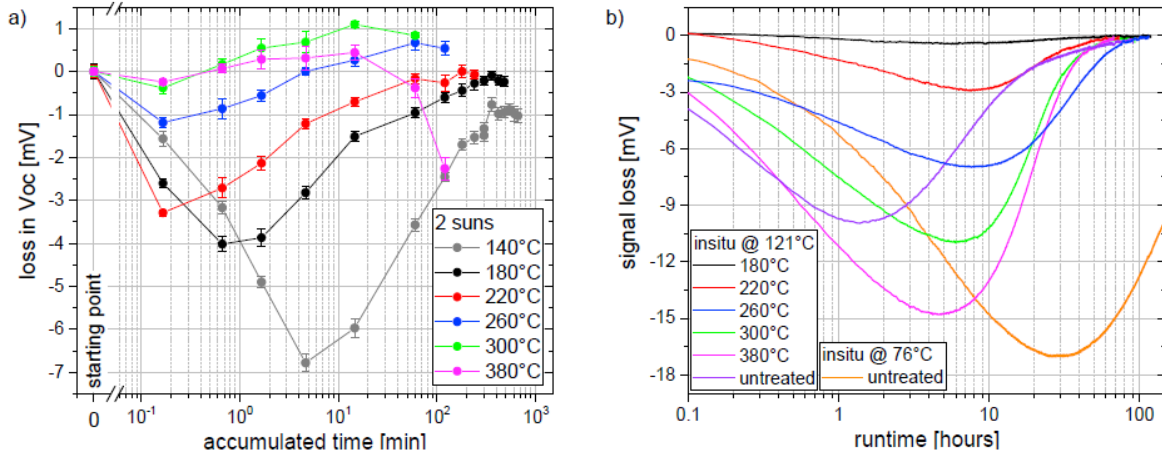


Figura 2 - 7 (a) Comportamiento de Voc en células bajo tratamiento de pasivación por iluminación con intensidad de 2 soles a varias temperaturas. (b) Prueba de estabilidad en la pasivación de las células en el tratamiento (a) bajo 1,5 soles  
Fuente: (Herguth, G. Schubert, Kaes, & Hanh, 2010)

Este estudio muestra que elevar la temperatura acelera el proceso, pero no permite completar efectivamente la eliminación de LID. Los mejores resultados se dan con temperaturas en rangos entre 140 a 180 °C para asegurar que el ciclo degradación-regeneración ocurra completamente, de manera estable y permanente.

En resumen, se describen en la siguiente tabla los parámetros que actúan dentro del proceso de pasivación de defectos antes mencionados:

Tabla 2- 1 Variables dentro del proceso de pasivación

Variables de Control	Variables Controladas
- Inyección de corriente	- Inyección de portadores
- Iluminación	- Liberación/generación de hidrógeno
- Temperatura	- Control del estado de carga del hidrógeno <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Concentraciones relativas de H<sup>0</sup>, H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup></li> </ul>
	- Control del tiempo de vida del hidrógeno
	- Velocidad de difusión del hidrógeno
	- Estabilidad de la pasivación y estado de los defectos.

Fuente Propia

### 2.3. PASIVACIÓN POR ILUMINACIÓN LOCALIZADA

La iluminación es un método natural para aumentar la concentración de portadores minoritarios en una célula solar, y por lo tanto puede utilizarse uno o varios tipos de fuentes de luz externas para conseguir la regeneración de los defectos, o para mitigar su efecto.

Dependiendo de en qué momento del proceso de fabricación de un módulo solar nos encontremos, deberemos optar por el método más adecuado de iluminación para realizar el tratamiento.

Podemos diseñar distintas estrategias de recuperación o de reducción del daño por defectos, dependiendo en el momento del proceso de fabricación nos encontremos: durante la fabricación de la célula, al permitir reducir o eliminar los defectos que se pueden crear durante los procesos a altas temperaturas; al término de su fabricación, al permitir corregir errores como por ejemplo un sobrecalentamiento de la célula que dio lugar a defectos, y para la que se utiliza la hidrogenización para rectificar el daño; y por último se puede utilizar para reparar o regenerar las células que se han degradado con el tiempo. Este último es el objetivo de este trabajo, en el que se utilizará hidrogenización mediante el uso de fuentes de temperatura y luz para la pasivación de defectos.

En todas esas etapas se puede utilizar luz como fuente de portadores minoritarios en la célula, si bien dicha luz puede suministrarse de distintas formas. Por ejemplo, durante un proceso a alta temperatura, las propias resistencias del horno pueden ser una fuente efectiva de luz. Sin embargo, para reducir las consecuencias negativas de los defectos, es necesario utilizar iluminación en la fase de enfriamiento, cuando las resistencias del horno están operando a baja potencia y probablemente la iluminación no es suficiente.

Es por eso que muchos fabricantes de equipo se están planteando el uso de otras fuentes de iluminación tales como Leds o Laser para incorporarlas a sus procesos. Estas fuentes, tienen además la ventaja de que pueden utilizar distintas longitudes de onda, y de que incluso pueden utilizarse de forma pulsada.

### 2.4. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE PANELES SOLARES EN ESPAÑA

El sector fotovoltaico en España no ha tenido grandes proyectos en los últimos años, pero por otro lado las empresas ya consolidadas han ido ganando espacio en otras regiones del mundo. Gracias a estos proyectos ya establecidos antes de 2012 el sector ha estado en actividad estable desde entonces. En 2015, tuvo una contribución directa al PIB nacional de 2511M€, es decir un 0.2% del total realizando una contribución real a la balanza nacional fiscal. La fuerte inversión dentro del sector fotovoltaico ha logrado que la contribución real de I+D al PIB sea un 3%, más alto que en otros sectores cuyo aporte fue del 1.2% en 2015. Lo que nos da una señal de cuanto mejorará la situación fotovoltaica en los próximos años, se basa en una previsión de que para 2025 se podrían instalar de 160 a 1300MW, y podrían generarse aproximadamente 15000 puestos de trabajo, con una contribución de hasta 4000 M€. (UNEF, 2017) En 2016, Red Eléctrica España anunció un aumento de potencia conectada a la red de 14MW, datos que no recogen la potencia aislada y autoconsumo. UNEF estimaba que se instalaron 55MW totales, lo que significa un aumento de potencia pequeña, y aún lejano a niveles de países de la región. (Ver Figura 2 - 8)

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

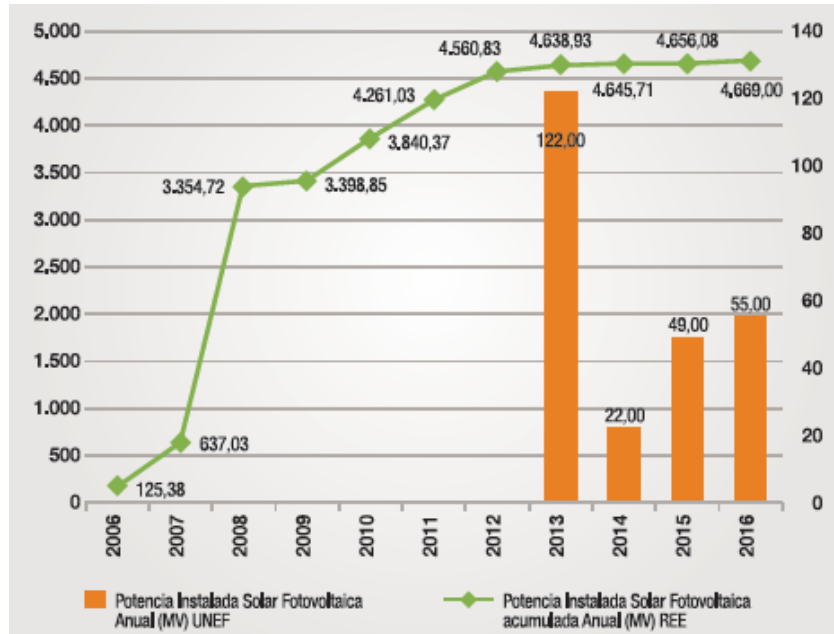


Figura 2 - 8 Potencia solar fotovoltaica instalada anual y acumulada  
Fuente: REE y UNEF (UNEF, 2017)

El coste de la electricidad producida con fotovoltaica se ha reducido un 20% en los últimos 5 años, gracias al desarrollo tecnológico que mejora la eficiencia de las células. Además, por otro lado, ha hecho que los costes de manufactura se vuelvan más competitivos bajando un 85% los precios. Las expectativas son que para 2020 la energía fotovoltaica tenga un coste de electricidad menor que el carbón o gas natural en todo el mundo. (UNEF, 2017)

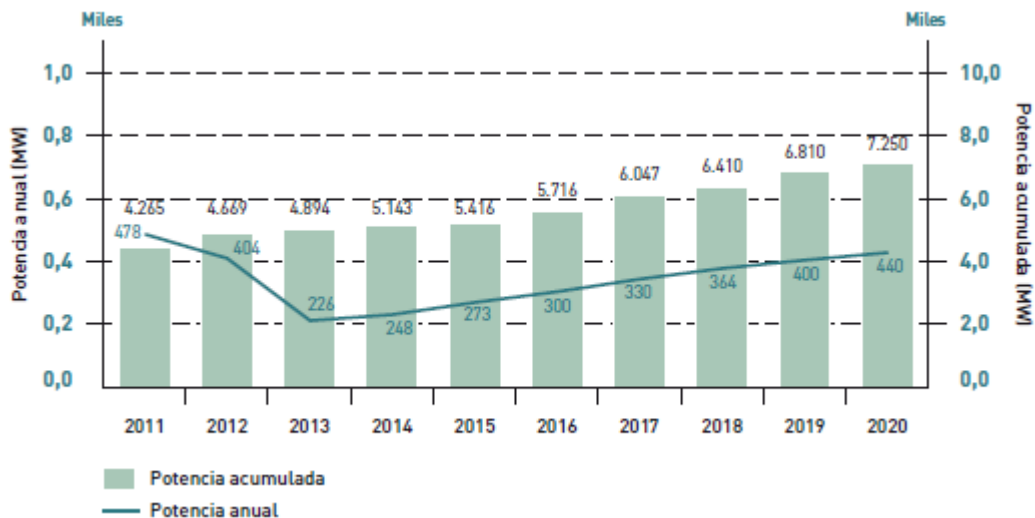


Figura 2 - 9 Evolución estimada de la potencia anual y acumulada hasta 2020 de energía solar fotovoltaica  
Fuente: (IDAE, 2011)

El IDAE hizo una previsión en su Plan de Energías Renovables elaborado en 2011, con una previsión de 7250MW en potencia acumulada de energía solar fotovoltaica instalada para 2020 (Ver Figura 2 - 9). Sin embargo, en la subasta realizada en Julio del 2017 el gobierno español adjudicó 3909MW

para la generación de electricidad por energía solar fotovoltaica. Con esta cifra el Ministerio de Energía confía que España avance con el cumplimiento del objetivo impuesto por la Unión Europea en su plan 2020 en la que se especifica que el 20% de generación debe ser por energías renovables; con lo que en potencia acumulada España llegará a más de 8500MW de potencia fotovoltaica instalada.

Pero todas estas instalaciones sufren de una pérdida de potencia gradual debido a diversos mecanismos de degradación. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) publicó un artículo con los rangos de degradación de células solares, en el cual se registraron casi 1800 pruebas entre módulos individuales y sistemas enteros que mostraron que el valor medio de degradación es de 0.5% anual para módulos de Silicio como se puede ver en la Figura 2 - 10. (Jordan & Kurtz, 2012)

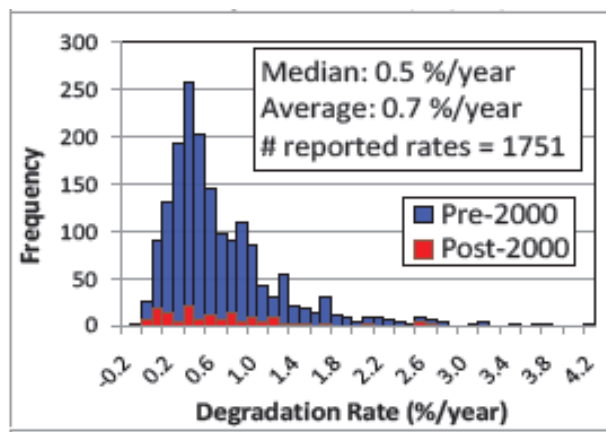


Figura 2 - 10 Histograma de rangos de degradación para módulos de Silicio

Fuente: (Jordan & Kurtz, 2012)

En España aproximadamente el 90% de los módulos fotovoltaicos instalados son de silicio cristalino, esto quiere decir que el tratamiento de hidrogenización lo podremos aplicar en casi 7650MW de los cuales el potencial de recuperación está calculado en la siguiente tabla:



## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

*Tabla 2- 2 Potencia de degradación de módulos fotovoltaicos hasta el año 2020*

<b>Año</b>	<b>Potencia Acumulada (en MW)</b>	<b>Potencia instalada (en MW)</b>	<b>año</b>	<b>Años de degradación</b>	<b>%Degradación</b>	<b>Degradación potencial (en MW)</b>
2006	125.38	125.38		14	7%	8.78
2007	637.03	511.65		13	7%	33.26
2008	3354.72	2717.69		12	6%	163.06
2009	3398.85	44.13		11	6%	2.43
2010	3840.34	441.49		10	5%	22.07
2011	4261.03	420.69		9	5%	18.93
2012	4560.83	299.80		8	4%	11.99
2013	4638.93	78.10		7	4%	2.73
2014	4645.71	6.78		6	3%	0.20
2015	4656.08	10.37		5	3%	0.26
2016	4669.00	12.92		4	2%	0.26
2017	4675.00	6.00		3	2%	0.09
2020	8584.00	3909.00		0	0%	0.00
<b>Degradación potencial total (MW)</b>						<b>264.06</b>
<b>Degradación potencial total en módulos de Silicio (MW)</b>						<b>237.66</b>

*Fuente Propia*

Si por cada MW de potencia fotovoltaica instalada se generan una media 1.77 GWh en España, y el precio de mercado para 2020 es de 52 €/MWh establecido por el estado en la orden ETU/130/2017 (UNEF, 2017), esto supondría que el mercado potencial de recuperar toda la potencia perdida por la degradación de los módulos es de 21.87 M€ anuales, con una generación adicional de 420.66 GWh de energía eléctrica.

Dentro de este porcentaje de módulos de silicio (90%) el 80% son módulos de silicio multicristalino y solo el 10% son de silicio monocristalino. Aún quedan incertidumbres alrededor de cómo tratar y recuperar todos los defectos en células multi-Si y, sin embargo, los grandes avances demostrados en módulos del silicio monocristalino permiten recuperar prácticamente el 100% de la degradación, como se ha discutido anteriormente, por lo tanto, el potencial de recuperación en paneles solares será de alrededor de 23 MW que supondría 2.17 M€ anuales con la recuperación de módulos de silicio monocristalino tipo P.

También cabe aclarar que en 2009 se conoció y aceptó la importancia del hidrógeno, y que alrededor de este año se verificó que fabricar células con capas hidrogenadas de nitruro de silicio usando plasma PECVD mejoraba la degradación y posterior recuperación del tiempo de vida. Esto quiere decir, que el porcentaje de módulos a tratar y su porcentaje de recuperación puede variar dependiendo de su fecha de fabricación.

### 2.5 RESUMEN CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se estudió el origen del defecto B-O, el cuál es introducido en la célula durante la fabricación de obleas de silicio Cz tipo P, ya que este tipo de manufactura se introduce Oxígeno en el material con lo cual luego se forma el complejo Boro-Oxígeno. Este defecto B-O tiene el efecto de provocar degradación cuando la célula es expuesta a iluminación o corriente, es decir cuando hay inducción de portadores, se dice que el defecto está en estado activo. Para desactivar el defecto existen métodos permanentes que, con el uso de luz o corriente, y temperatura pueden pasivar/eliminar el defecto y provocar la recuperación de la célula, aunque también el defecto se puede volver a desactivar con el tratamiento de recocido en condiciones de oscuridad que desactiva el defecto hasta que vuelva a provocarse su activación, es decir el recocido sin luz es un método no permanente de desactivación del defecto. Para el proceso de regeneración es indispensable que primero se genere la activación de los defectos, es decir que se debe producir la degradación de la célula para que pueda regenerarse y eliminarse estos defectos. La inyección de portadores ya sea por corriente o iluminación provocan tanto la degradación como la regeneración de la célula, e interviene también la temperatura en la estabilidad y tiempo de estos procesos. En investigaciones realizadas se ha estudiado que el rango de temperatura adecuado para el proceso es de 130-180°C, dentro del cual se logra una pasivación completa de los defectos y una estabilidad apropiada. Para provocar la eliminación permanente el hidrógeno cumple un papel crítico como elemento para pasivar el complejo B-O, por tal motivo es importante introducir o liberar hidrógeno dentro de la célula y aumentar su difusividad para que llegue a pasivar la mayor cantidad de defectos. Esto se logra mediante el cambio de estado del Hidrógeno de positivo o negativo dependiendo del tipo de célula este estará en mayor o menor cantidades en determinado tipo de carga. Se transforma el hidrógeno a carga neutra para aprovechar la gran difusividad en este estado, y se vuelve a transformar de carga neutra a negativa para pasivar los defectos B-O presentes en la célula. La pasivación con iluminación es conocida como hidrogenización, y mediante el uso de iluminación de 1000nm enviada a pulsos de 1 segundo se controla el tiempo de vida del hidrógeno en estado neutro, mientras que con una luz de 500nm se calienta la célula a temperaturas deseadas. Esta hidrogenización está basada en tecnología led de alta potencia, y también existe tecnología láser de alta intensidad que permite realizar el proceso de pasivación en las diferentes etapas de vida de la célula como son: durante la fabricación, después de la manufactura para reparación de daños y en módulos ya en operación. Al poderse aplicar en módulos ya instalados, se calcula que en España hasta 2020 habrá instalados 8500MW, de los cuales el 10% es de tecnología de silicio monocristalino, si la degradación anual en módulos es de 0.5% anual se espera que se puedan recuperar con este tratamiento 23MW, lo que muestra que hay un gran potencial económico para este tipo de proceso.

### **3. EXPERIMENTACIÓN**

En este capítulo se corroborará experimentalmente las teorías descritas en el capítulo 2. Primero se definirá la metodología a utilizar en estos experimentos, detallando variables a analizar, muestras a tratar y equipos a utilizar para la toma de medidas y realización de pruebas. La estructura de los test de este capítulo se va a desarrollar tal y como se describió la teoría en el capítulo anterior, empezando con la degradación de células, para después realizar la experimentación de los métodos de mitigación del defecto, primero con recocido en la oscuridad, después con inyección de corriente y finalmente con iluminación. Al final se realizará la discusión de los resultados de todas las pruebas realizadas.

Los experimentos descritos a continuación han sido llevados a cabo en el laboratorio de Fotovoltaica de la Unidad de Investigación de Nanofotónica de la UPV. Todos y cada una de las muestras y toma de datos fueron hechas personalmente y tratando de siempre replicar las condiciones estándares de toma de medidas para evitar variaciones entre ellas. También cabe destacar que la configuración para realizar las pruebas con iluminación, con corriente, y pruebas de recocido fueron estructuradas para este trabajo, ya que no se había hecho un estudio como este antes en las instalaciones del laboratorio, por lo que se tuvo que crear las configuraciones experimentales basándose en la recopilación de información expuestas en el capítulo anterior. La fase de experimentación en total duró 2 meses, hasta probar que los equipos ya instalados y los configurados funcionan correctamente y con las características necesarias, y además se repitieron las pruebas varias veces para comprobar resultados.

#### **3.1. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN**

##### **3.1.1. DEFINICIÓN DE MUESTRAS, PRUEBAS Y VARIABLES**

Las células con las que realizaremos la experimentación son células comerciales fabricadas con tecnología Al-BSF en silicio monocristalino tipo P de la compañía JASOLAR, que fueron fabricadas sobre obleas de  $156 \times 156 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$  y espesor  $210 \mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$ . Las células fueron cortadas mediante sierra de corte en el laboratorio de encapsulado en fragmentos de  $8.755 \text{ cm}^2$  ( $\sim 1,9 \times 5,2 \text{ cm}$ ) dejando un pad de soldadura en cada fragmento, con el objetivo de poder experimentar y realizar las medidas en ellos. Así mismo, se cortaron de manera que todos los fragmentos tuvieran el pad de conexión en la misma posición para poder actuar sobre varias muestras al mismo tiempo apilándolas unas sobre otras.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la potencial ganancia en recuperación de eficiencia en módulos solares. Dentro de este trabajo, el estudio de investigación que describimos a continuación está enfocado a verificar experimentalmente los resultados publicados, para después, una vez verificado esto y verificado que los instrumentos y las células utilizadas se comportan de acuerdo con lo previsto, obtener un tratamiento específico que pueda ser aplicado a módulos que están ya instalados y en operación.

Para ello empezamos por la caracterización I-V, de la que vamos a extraer los parámetros tales como el voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ , la densidad de corriente de corto circuito  $J_{sc}$  y, el factor de forma FF de las células solares. Después con estos valores calcularemos la potencia real de las células de acuerdo con la fórmula:

$$P = V_{oc} * J_{sc} * FF \quad \text{Ec. 2}$$

Para cuantificar la ganancia en eficiencia después de realizar los tratamientos de pasivación, primero haremos pruebas de degradación en células solares sin ningún tipo de tratamiento para observar el comportamiento de la  $V_{oc}$  en el tiempo. Luego se realizarán pruebas de degradación y tratamientos de recuperación, así como pruebas de estabilidad de los tratamientos realizados. Los distintos grupos de células con las que vamos a trabajar son: a) células sin tratar, b) células tratadas con dark anneal, c) células tratadas con inyección de corriente y, d) células tratadas con iluminación. Para evaluar los tratamientos se comparará la pérdida de eficiencia relativa con respecto a la eficiencia original de fabricación de las células. El porcentaje de degradación estará dado por la fórmula:

$$\%degradación_p = \frac{P_{fabricación} - P_{degradación}}{P_{fabricación}} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

### 3.1.2. INSTRUMENTACIÓN

El laboratorio donde se realizó las pruebas es una habitación cerrada ubicada en el IU de Nanofotónica de la UPV. Para realizar las medidas de las células se utilizó instrumentación comercial de caracterización corriente-voltaje (I-V) con el que está equipado este laboratorio y que se detalla a continuación:

- Simulador Solar SUN ABET 2000: se utiliza un simulador para iluminar las células a ser testeadas. Este equipo utiliza una lámpara de xenón de 550W irradiación 1 sol AM 1.5G que actúa sobre un campo de 160x160mm. (Ver Figura 3-1).



Figura 3 - 1 Simulador Solar ABET Sun 2000  
Fuente: <http://abet-technologies.com>

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

La marca ABET del simulador está especializada en simuladores solares y ofrecen un amplio rango de equipos de diversas características técnicas, además también ofrecen los equipos de medida y software que son compatibles y de fácil comunicación con sus equipos, así tenemos:

- Estación de muestras: viene dada por el tipo de célula, el tamaño, y su contacto geométrico, en el laboratorio se cuenta con una placa de 160x160mm. (Ver Figura 3-2). Esta estación cuenta con sensor de temperatura, conexión eléctrica con la célula mediante vacío y un sistema de enfriamiento por agua para controlar la temperatura.

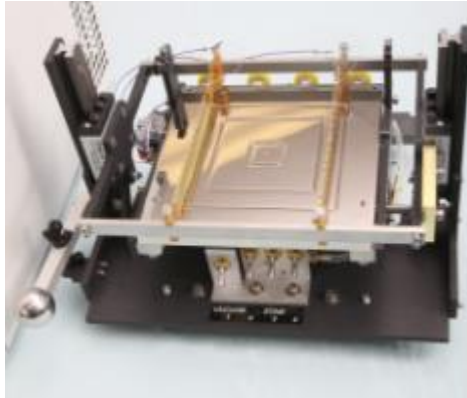


Figura 3 - 2 Estación de muestras para Simulador Solar ABET  
Fuente: <http://abet-technologies.com>

- Equipo de medida KEITHLEY 2600: se utiliza este equipo para la adquisición de datos desde la estación de muestras, registra los valores de eléctricos y de temperatura de la célula. Soporta un voltaje máximo de 40 V y hasta 50 A de corriente. (Ver Figura 3-3).



Figura 3 - 3 Equipo de adquisición de datos KEITHLEY 2600  
Fuente: <https://www.tek.com>

- Software TRACER 2 de ReRa: para análisis y registro de la curva I-V, para caracterización de las células. Este software controla el equipo de adquisición de datos Keithley, y al conectar el simulador solar con el pc se puede controlar todo el sistema.
- Para las pruebas de recocido sin luz se utilizó un horno eléctrico, cuya máxima temperatura de operación es 200 °C.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

- Para las pruebas con corriente e hidrogenización se utiliza una fuente de corriente continua regulable hasta 64 V y 10 A. (Ver Figura 3-4).



Figura 3 - 4 Fuente de Corriente Continua BK Precision

Fuente: <http://www.bkprecision.com/products/discontinued/1795-high-current-dc-power-supply-0-64v-0-15a.html>

- Para las pruebas con corriente también se utilizó un plato caliente con temperatura regulable. (Ver Figura 3-5).



Figura 3 - 5 Plato caliente con temperatura regulable MS300HS  
Fuente Propia

### 3.1.3. PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN DE LAS CÉLULAS

Para realizar las medidas a los fragmentos de las células antes, durante y después de los tratamientos ya sea de degradación o recuperación se siguen los siguientes pasos:

- 1) Con el uso de guantes de nitrilo, para no dejar huellas en las muestras, y con pinzas se colocan y retiran las células fuera del área de tratamiento.
- 2) Una vez retirada, la muestra se coloca en una bandeja/base metálica durante el tiempo necesario para que se establezca la temperatura de la célula a temperatura ambiente. El objetivo es evitar que la lectura de la muestra sea afectada por la temperatura de la célula, ya que se puede confundir la variación del voltaje con el efecto de la temperatura y no con la degradación o recuperación de los parámetros de la célula en sí. En células de silicio al aumentar la temperatura el voltaje disminuye, y de forma inversa si la temperatura disminuye el voltaje aumenta, y esto sucede a razón de 2.3 mV/°C.
- 3) Seguidamente, se coloca la célula en la estación de muestras del simulador solar. Esta estación es de 160x160 mm para células de este tamaño, sin embargo, las células que

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

estamos probando son fragmentos de ~19x52 mm, por lo que se usa una plantilla para evitar que los contactos que cubren el área total de una célula completa no toquen a la base creando corto circuito.

- 4) Para asegurar un buen contacto se hace vacío entre la base de la estación y la parte posterior de la célula, y se baja el contacto superior hasta que toque la parte superior de la célula. El sensor de temperatura está conectado a la base de la estación.
- 5) Se comprueba que la célula se encuentra alineada con el centro de la lámpara, usando para eso el mecanismo que tiene el simulador y que nos ayuda a centrar la célula con respecto a la estación.
- 6) Una vez centrada, podemos iniciar la medida con ayuda del software TRACER 2. Aquí se configuran los parámetros que queremos analizar, en este caso, la curva I-V, aplicando voltaje de 0 a 0.65V, en pasos de 5mV para poder luego representar la curva, y área de la célula. El tiempo que duración de la medida es de 2s aproximadamente, tiempo en el cual actúa la lámpara del simulador sobre la célula y se registran los datos de Voc, Jsc, FF, y Eficiencia.
- 7) Realizada la medida se abre el contacto superior de la estación y se cierra el vacío para liberar la célula.

Se devuelve la célula para que continúe con los procesos o pruebas, y si se terminaron los procesos se la almacena alejada de la luz y a temperatura ambiente ~25°C. En la Figura 3 - 6 se puede observar fotografías de los equipos usados para la toma de medidas de las muestras.



Figura 3 - 6 Estación del Simulador Solar(izq) e interfaz (der) del programa Tracer 2, para la caracterización I-V de células solares

Fuente: Laboratorio Fotovoltaica, Centro NTC UPV

### 3.1.4. ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de los datos recolectados, cada medida con el simulador solar se repitió cuatro veces, de estos 4 valores se sacó el promedio y a continuación la desviación estándar de los cuatro datos.

Esto proceso se hizo con cada una de las células testeadas y cada vez que se tomaba una medida. Además, se utilizó una célula de referencia, a la que no se le aplicó ningún tipo de tratamiento, sino que se utilizó para comprobar que no había diferencia entre medidas, lo que nos dice que la medida no ha sido afectada por la temperatura

Para el proceso de degradación con iluminación, que tiene una duración de 72 horas, se retiró la muestra del tratamiento para ser medida tras varios periodos de tiempo, para poder así analizar el comportamiento en el tiempo de la célula bajo este proceso. Para cada medida se calculó media y desviación estándar, y para sacar un modelo de todas las células tratadas se calculó la media entre todas las células tratadas bajo este proceso.

Se siguió el mismo patrón con todos los test realizados en este trabajo, tomando la misma medida bajo los mismos parámetros cuatro veces, se calculó media y desviación estándar para cada célula tratada y al final se calculó la media de las células testeadas. El cálculo de la desviación estándar fue calculado como se describe a continuación.

Desviación estándar

Cada medida tomada a una célula se la repitió 4 veces con el fin de tener mayor precisión en el registro de datos. Luego se aplicó la desviación estándar para saber la dispersión de estos datos alrededor de la media. Con esto comprobaremos que los datos están dentro de un rango permisible, y que por lo tanto se tenga confianza en los datos de las pruebas realizadas.

$$desv_{estandar} = \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|^2}{n}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

x: valor de un conjunto de datos

$\bar{x}$ : es la media del conjunto de datos, y

n: es el número de datos

En cada gráfica de análisis Voc estará incorporado el dato de esta desviación en forma de barra de error. Como ejemplo, en la Figura 3 - 7 se presentan dos gráficas de las muestras 8 y 9 de la prueba de degradación por luz en la que se registra el comportamiento de Voc ante la exposición a iluminación por 72 horas, en cada periodo de tiempo en que se realiza las medidas se añade la desviación estándar de este proceso de toma de datos que estará presente en las gráficas más adelante.



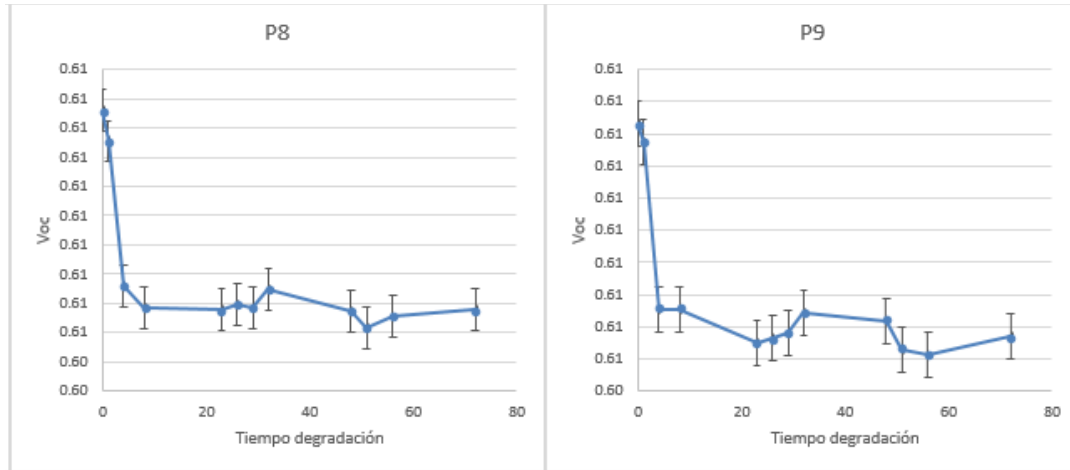


Figura 3 - 7 Gráficas de variación de Voc en células expuestas a iluminación por 72 horas  
Fuente Propia

### 3.2. TEST EN CÉLULAS SOLARES

#### 3.2.1. CARACTERIZACIÓN CORRIENTE-VOLTAJE (I-V) DE LAS CÉLULAS

En la Tabla 3 - 1 se muestran las características técnicas de las células ( $239\text{cm}^2$ ) dadas por el fabricante, y las medidas con los equipos de instrumentación del laboratorio en células completas y en los fragmentos de  $9.88\text{ cm}^2$  (ver Figura 3-8).

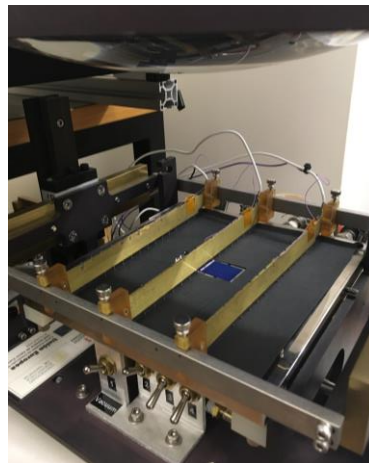


Figura 3 - 8 Medida parámetros de células en estación de caracterización con Simulador Solar.  
Fuente Propia

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

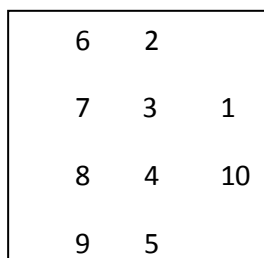
*Tabla 3 - 1 Características técnicas de las células Al-BSF 156S0X1 de JASOLAR*

	Fabricante	Medidas	
		Con SUN 2000	
		Célula 239cm <sup>2</sup>	Célula 9.88cm <sup>2</sup>
<b>Eficiencia</b>	16.6 – 16.8	16.63	15.18
<b>Pmp (W)</b>	3.97	3.98	0.133
<b>Vmpp (V)</b>	0.511	0.524	0.509
<b>Imp (A)</b>	7.765	7.58	0.256
<b>Voc (v)</b>	0.612	0.612	0.612
<b>Isc (A)</b>	8.627	8.47	0.282
<b>FF (%)</b>	75.25	76.89	75.9

*Fuente: JASOLAR y Propia*

### 3.2.2. TEST DE DEGRADACIÓN EN CÉLULAS (Light Soaking)

Para verificar que las células comerciales que hemos elegido presentan un comportamiento frente a la degradación similar al de las células de la literatura, las células fueron colocadas bajo una lámpara a 1 sol durante 72 horas, y refrigeradas mediante un ventilador para asegurar que la temperatura no superara los 40 °C. Las células fueron retiradas de la luz cada cierto tiempo para realizar medidas y observar la degradación. Se utilizó una lámpara halógena de 500W ubicada a 30.5cm sobre las células, y se fue intercambiando la posición de estas en el área de irradiación de la lámpara cada vez que se devolvían después de una medida para asegurarse de que todas estuvieran sometidas a la misma exposición (ver Figura 3 - 9).



*Figura 3 - 9 Posición de las células al iniciar la prueba de degradación*

*Fuente Propia*

Con estas pruebas se va a analizar el comportamiento de las células sacando las curvas I-V y extrayendo la tensión en circuito abierto (Voc), la densidad de corriente en corto circuito (Jsc) y el

factor de forma de las curvas (FF) en función del tiempo. Para realizar la medida se retira la célula de la exposición a la luz para situarla en la base del simulador solar en donde se realiza la medida de los parámetros incluyendo la temperatura. Con la temperatura se corrige la medida teniendo en cuenta que la temperatura de operación normal de las células es de 25 °C, y que al aumentar la temperatura disminuye el voltaje en 2.3mV/°C.

En la gráfica (Figura 3 - 10) se muestra los parámetros de Voc y Jsc durante el tiempo de degradación de 72 horas, cuyo resultado es la reducción de un 0.97% en Voc y de un 4,7% en la potencia de la célula, calculada como el producto de Voc por la Jsc y el FF. Se comprueba por lo tanto que la degradación de estas células es similar a la descrita en la literatura, y que a su vez está cerca del valor de degradación utilizado para el cálculo de ganancia potencial del apartado 2.4, en donde se suponía una pérdida anual de potencia del 0.5%, es decir, una pérdida de un 5% después de 10 años de operación.

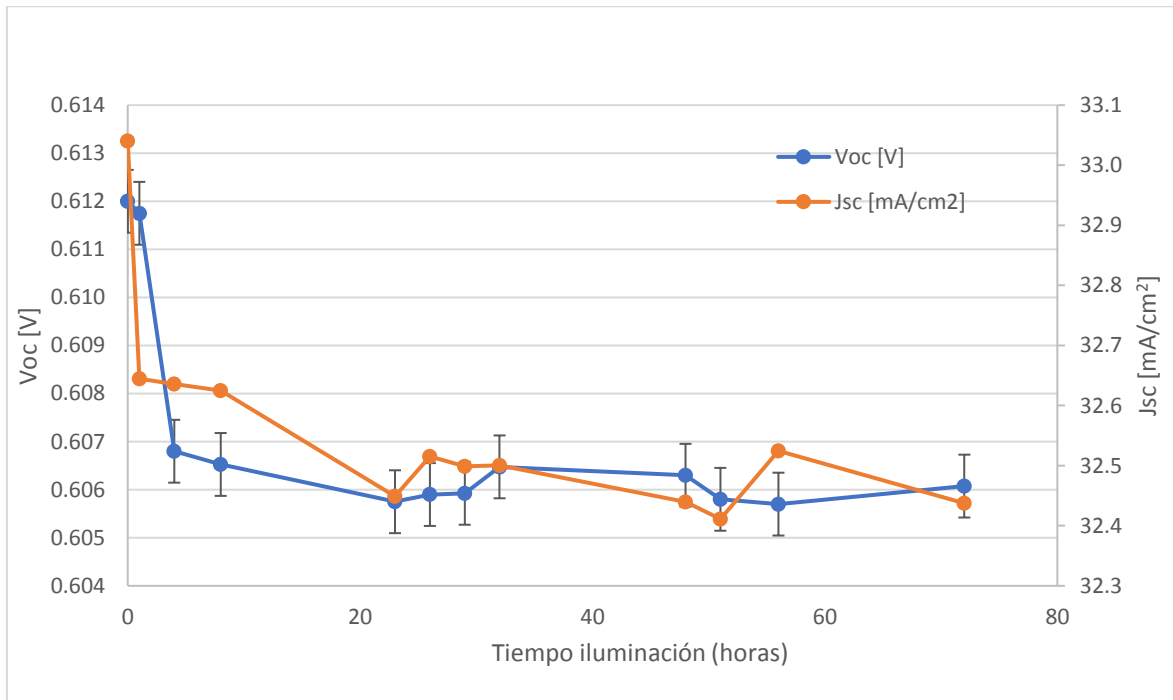


Figura 3 - 10 Comportamiento de la degradación de Voc e Jsc en función del tiempo Fuente Propia

En la Tabla 3 - 2, muestra los valores iniciales con los que se inicia la prueba de degradación con respecto a los finales después de 72 horas de exposición a iluminación a 1sol, se observa como todos los valores se han reducido:

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

Tabla 3 - 2 Parámetros de una célula antes y después del test de degradación por iluminación

	Inicial	72 horas de iluminación
<b>Voc (v)</b>	0.612	0.606
<b>Jsc (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	33.04	32.43
<b>FF (%)</b>	75.9	74.4
<b>Eficiencia</b>	15.18	14.5

Fuente Propia

### 3.3. PRUEBAS DE RECUPERACIÓN

#### 3.3.1. TEST DE RECUPERACIÓN POR RECOCIDO SIN LUZ (Dark Anneal)

Para realizar este test de recuperación por recocido sin luz se utilizaron algunas de las células degradadas previamente con light soaking (1 sol, ~35-40 °C y 72 horas). Para el recocido sin luz de las células, se utilizó un horno eléctrico del laboratorio de fotovoltaica, en el cual las células fueron sometidas a una temperatura de aproximadamente 190°C durante 30min. Pasado este tiempo se realizaron las medidas de las células, y como resultado, en la Figura 3 - 11 se puede observar la recuperación de las células a sus valores iniciales. Se observa cómo primero fueron degradadas durante 72 horas (se tomaron células de la prueba anterior de degradación) y luego fue hecho el tratamiento de recocido sin luz, y por eso se ve en la gráfica como su voltaje en circuito abierto retorna a su valor original, incluso en la Tabla 3 - 3 podemos observar como algunos valores incluso superan a los iniciales. Luego fueron expuestas de nuevo a degradación por otras 72 horas más para observar su comportamiento después de este tratamiento, volviendo a degradarse nuevamente, tal y como se esperaba, demostrando que el tratamiento del dark anneal no es un tratamiento válido de recuperación de la LID, y si un tratamiento que permite devolver las células a su estado original. En total se expuso las células a 144h de luz con un tratamiento de recocido a la mitad del proceso.

Tabla 3 - 3 Parámetros de una célula antes de la degradación, después de la degradación, después de recocido sin luz y después de volver estar expuesta a degradación por 72 horas más.

	Inicial Antes degradación	72 horas de iluminación degradación	Después de recocido sin luz	72 horas de iluminación más
<b>Jsc [mA/cm<sup>2</sup>]</b>	32.4385	32.3238	32.6850	32.7040
<b>Voc [V]</b>	0.6130	0.6088	0.6131	0.6094
<b>FF [%]</b>	76.65	76.75	76.55	76.00
<b>Eta [%]</b>	15.20	15.10	15.23	14.98

Fuente Propia

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

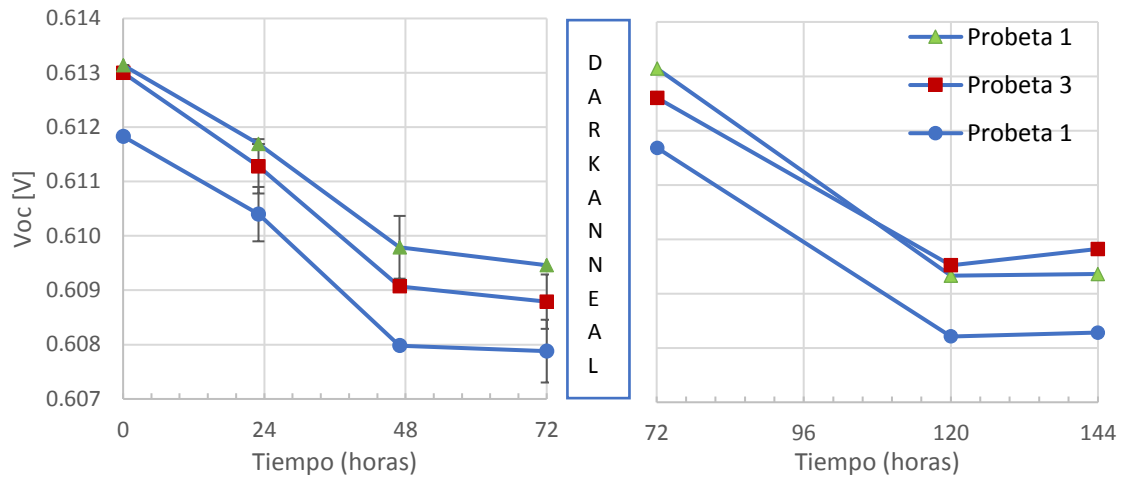


Figura 3 - 11 Comportamiento del Voc con respecto al tiempo en proceso de degradación por luz en células c-Si con proceso de cocido sin luz a mitad de la degradación  
Fuente Propia

### 3.3.2. TEST DE RECUPERACIÓN POR INYECCIÓN DE CORRIENTE

Para estos test nos basamos en la experimentación realizada por Herguth y Hahn en 2013. primero analizaremos como realizaron las pruebas y los resultados que obtuvieron, para luego tratar de replicar los mismos experimentos bajo las condiciones deseadas. (Herguth & Hanh, 2013)

En el test realizado por ellos trataron varias células a la vez conectadas en serie a una fuente de corriente, colocando este bloque de células dentro en una cámara de temperatura controlada. La configuración de las pruebas se las puede observar en Figura 3 - 12:

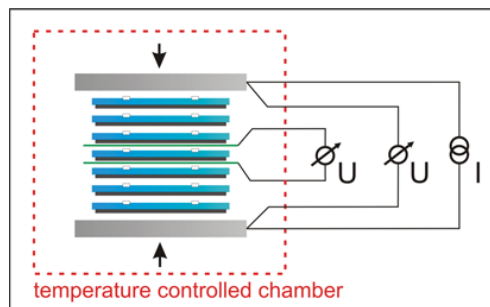


Figura 3 - 12 Diagrama de configuración del tratamiento de regeneración  
Fuente: (Herguth & Hanh, 2013)

El conjunto se calentó previamente a 70 °C, lo que sitúa todos los defectos B-O en el estado de aleación (estado A, ver Figura 3 - 13) y se le aplicó un nivel de corriente externa muy bajo, de 7 mA/cm<sup>2</sup>.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

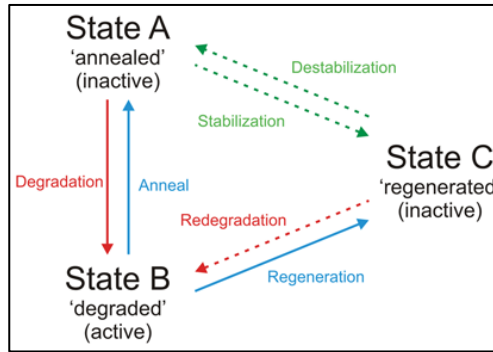


Figura 3 - 13 Estados del defecto.

Fuente: (Herguth & Hahn, Towards a high throughput solution for Boron-Oxygen related regeneration, 2013)

Al principio, la subida abrupta de la corriente o más bien la potencia disipada en los distintos elementos del set-up produce un fuerte aumento de la temperatura, desde los 70 °C hasta los 128 °C, lo que lleva al conjunto a la temperatura necesaria para la regeneración.

Conforme la temperatura más o menos se estabiliza, el voltaje muestra un aumento de aproximadamente 7 mV (a 130 °C) debido a la regeneración, según se observa en la Figura 3 - 14.

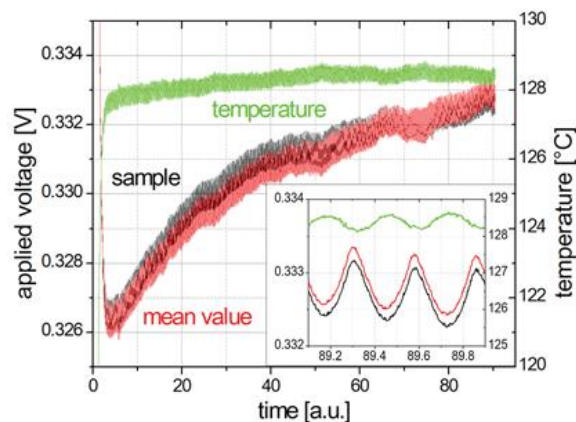


Figura 3 - 14 Medida de voltaje de una célula durante el tratamiento de regeneración a 130°C.

Fuente: (Herguth & Hahn, 2013)

En la simulación que se muestra en la Figura 3 - 15, los defectos B-O se mueven primero desde el estado aleado (en negro), vía el estado degradado (en verde), hasta el estado regenerado (en azul). En este caso, se alcanza una regeneración casi completa (queriendo decir con esto una ocupación completa de los estados regenerados) en aproximadamente 150 segundos. Este será el tiempo adecuado para el tratamiento.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

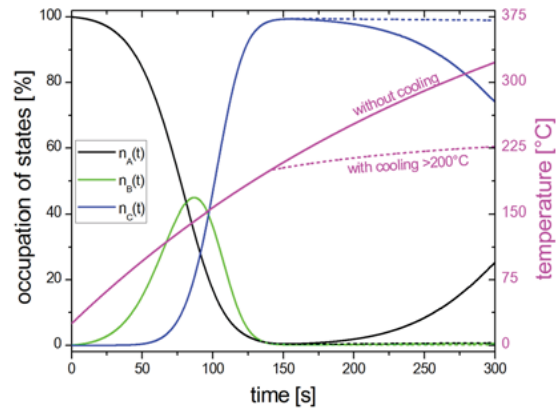


Figura 3 - 15 Simulación de una célula solar, perfil de temperatura por la disipación de la aplicación de corriente de  $75\text{mA}/\text{cm}^2$  y refrigeración opcional para temperaturas mayores a  $200^\circ\text{C}$ . Se muestra también la ocupación de estados a reacción del tratamiento.

Fuente: (Herguth & Hahn, Towards a high throughput solution for Boron-Oxygen related regeneration, 2013)

En la Figura 3 - 15 se observa que hay una ventana muy estrecha de proceso en la cual se alcanza una regeneración completa, lo que se deduce de cómo la curva azul, que corresponde a los defectos regenerados, alcanza un máximo a los 150 segundos del tratamiento, para empezar casi inmediatamente a decrecer. Este efecto puede ser eficazmente suprimido si se estabiliza la temperatura, o al menos, si su crecimiento se logra ralentizar lo bastante. En ese caso la ventana de proceso aumenta considerablemente haciendo el proceso más robusto frente a fallos, lo que se muestra en la Figura 3 - 15 en forma de una línea azul discontinua.

Sin embargo, si en la simulación suponemos que la velocidad de regeneración es sensiblemente menor (en este caso una décima parte de lo que habíamos considerado en el caso previo), tenemos la situación que se muestra en la Figura 3 - 16, en la cual las cosas cambian respecto a lo que acabamos de describir.

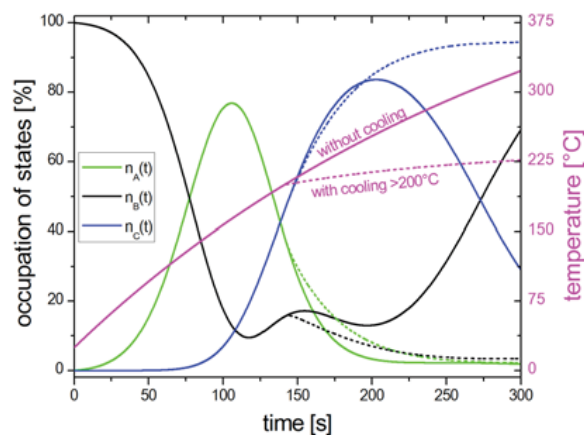


Figura 3 - 16 Simulación de una célula solar, perfil de temperatura por la disipación debida a la aplicación de corriente de  $75\text{mA}/\text{cm}^2$  y refrigeración opcional para temperaturas mayores a  $200^\circ\text{C}$ . Se muestra también la ocupación de estados a reacción del tratamiento. En este caso una velocidad de regeneración lenta fue asumida.

Fuente: (Herguth & Hahn, Towards a high throughput solution for Boron-Oxygen related regeneration, 2013)

Al principio, cuando la temperatura es todavía muy baja para que tenga lugar la regeneración, la ocupación de estados ocurre de manera similar al caso que acabamos de ver en Figura 3 - 15. A partir de ese momento, sin embargo, las cosas cambian significativamente. Sin enfriamiento no es posible alcanzar una regeneración completa, ya que la temperatura sube demasiado rápidamente. entonces, en el caso de una velocidad de regeneración baja, el enfriamiento del bloque es completamente necesario para asegurar una completa regeneración.

La experimentación realizada por Herguth & Hahn es la prueba de concepto de que con corriente y temperatura se pueden regenerar los defectos B-O, y una forma práctica de cómo hacer esto de una forma eficiente a base de apilar las obleas y colocarlas en un recinto con la temperatura controlada. Esto, sabemos que se está utilizando por el fabricante Canadian Solar a nivel industrial.

También hemos visto resultados de simulaciones que nos dicen que, en un tiempo muy corto, de unos 5 minutos, se puede alcanzar una regeneración completa, si se eligen los parámetros adecuados de corriente y temperatura y si se para el tratamiento en el momento en el que se ha alcanzado la regeneración completa, y no se prolonga más allá, lo que nos da una ventana de proceso muy estrecha. También se ha mostrado que la ventana de proceso se puede aumentar si se controla la velocidad de subida de la temperatura. La idea ahora es reproducir estas simulaciones para nuestras células, y encontrar las condiciones de proceso óptimas.

Para empezar, situamos las células a 70°C, e inyectamos corriente a 7 mA/cm<sup>2</sup>, y observamos hasta cuanto sube la temperatura. Si la temperatura no alcanza los 140 °C en 5 minutos, que es la temperatura que suponemos óptima para la regeneración, aumentamos la corriente, hasta un máximo de 75 mA/cm<sup>2</sup>. Si a ese nivel de corriente, la temperatura no llega a subir hasta los 140 °C, deberemos subir la temperatura de la base hasta alcanzarla. Idealmente la temperatura de la base no debería ser más de 100°C, para asegurarnos de que el proceso de regeneración no empieza hasta que no empezamos a inyectar la corriente.

Con esta temperatura en la base, colocamos una nueva célula, aplicamos la corriente de 0.7 mA/cm<sup>2</sup>, y monitorizamos la evolución de la temperatura y del voltaje de la fuente, para intentar reproducir la curva de la Figura 3 - 14. Paramos el proceso, justo cuando vemos que el voltaje se estabiliza, que es cuando se supone que la regeneración se habrá completado. Hay que observar si en ese momento la temperatura se ha estabilizado también. Si no es así, habrá que buscar un método de estabilización de la temperatura, por ejemplo, un ventilador. Para comprobar que la regeneración ha sido completa, llevamos a cabo el test de degradación.

Si hemos llegado a encontrar condiciones de regeneración estables, y el tiempo total de proceso es de menos de 10 minutos, el proceso podremos considerarlo lo bastante optimizado.

Sin embargo, realizadas las pruebas para conocer la corriente necesaria para subir la temperatura, la conclusión es que, en directa las células se calientan apenas pocos grados por encima de la temperatura que tenían antes de aplicar la corriente. En inversa, sin embargo, las pruebas realizadas a temperatura ambiente muestran que la temperatura sube hasta los 89°C muy rápidamente, pero que después de unos minutos (12min) la célula sufre daño, porque la tensión de la fuente baja abruptamente desde los casi 30 V hasta 4.9 V y la temperatura empieza a bajar. Esto es lógico si



pensamos que en directa la resistencia es muy baja y por lo tanto no hay calentamiento, al contrario de lo que sucede en inversa. En inversa, seguramente, después de un tiempo el diodo se rompa. Como conclusión podemos decir que la polarización en directa no puede utilizarse para calentar la célula, y que la polarización en inversa sí, pero no puede usarse tampoco ya que hay riesgo de dañar definitivamente a la célula.

Concluimos por tanto que no podemos utilizar la corriente como método de inyección de portadores y como método de calentamiento simultáneamente, ya que a diferencia del montaje experimental de los autores (Herguth & Hahn, 2013), en un módulo no tenemos elementos resistivos que nos permitan calentar mediante la aplicación de corriente. Tendremos por lo tanto que buscar en el futuro (y esto no forma parte de este trabajo) un método alternativo para calentar el módulo, y en lo que sigue, utilizaremos un plato caliente de laboratorio para calentar las muestras.

Para la realización del test se utilizó una fuente de corriente directa para inyectar corriente a la célula y, se utilizó un plato caliente para aumentar la temperatura de la célula a las temperaturas deseadas. (Ver Figura 3 - 18) Primero se realiza un test de degradación para comprobar que las células se degradan con la aplicación de corriente y luego realizaremos los test para conseguir la pasivación de los defectos.

En el primer test, la corriente inyectada es equivalente a 1 sol y la temperatura aplicada a la célula es de 50 °C para replicar la prueba realizada en el estudio hecho por (Xie, et al., 2016) en el que la degradación dura 4 horas. En la Figura 3 - 17 se observa los resultados de este test de degradación, en el que en casi 4 horas se degrada 6 mV, y en el que se observa también cómo empieza a aparecer el proceso de regeneración.

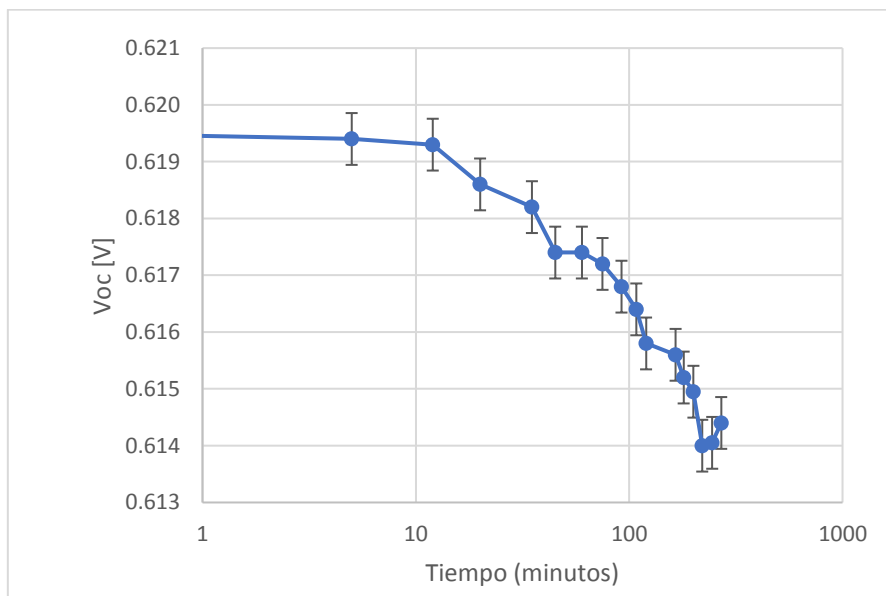


Figura 3 - 17 Test de corriente a 1 sol y 50 °C  
Fuente Propia

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares



Figura 3 - 18 Imágenes del test de corriente en células  
Fuente Propia

En los test posteriores se realizaron pruebas con inyección de corriente a varias temperaturas para observar el comportamiento de la Voc frente a niveles de inyección de corriente equivalentes a 1 sol, a 1.2 soles y a 1.5 soles. En la Figura 3 - 19 lo que se pretende observar con estas pruebas es cómo afecta la temperatura a la velocidad de transición de la degradación a la regeneración. Luego se realizará el test de degradación por iluminación para evaluar la estabilidad de cada una de estas células y así saber en qué medida se ha conseguido una pasivación completa y estable de los defectos.

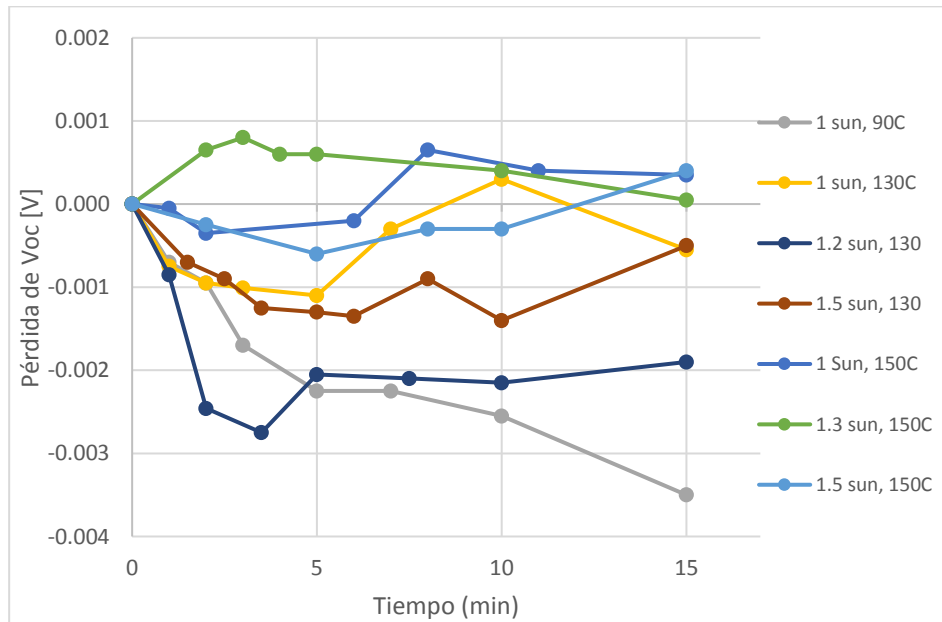


Figura 3 - 19 Test de inyección de corriente a varias temperaturas y con distintas intensidades de corriente  
Fuente Propia

Como prueba final se hace la degradación por iluminación para observar si se ha logrado una pasivación completa y evaluar su estabilidad, para lo cual se expone a las células a iluminación de 1sol y temperatura de 70°C por un periodo de 72 horas.

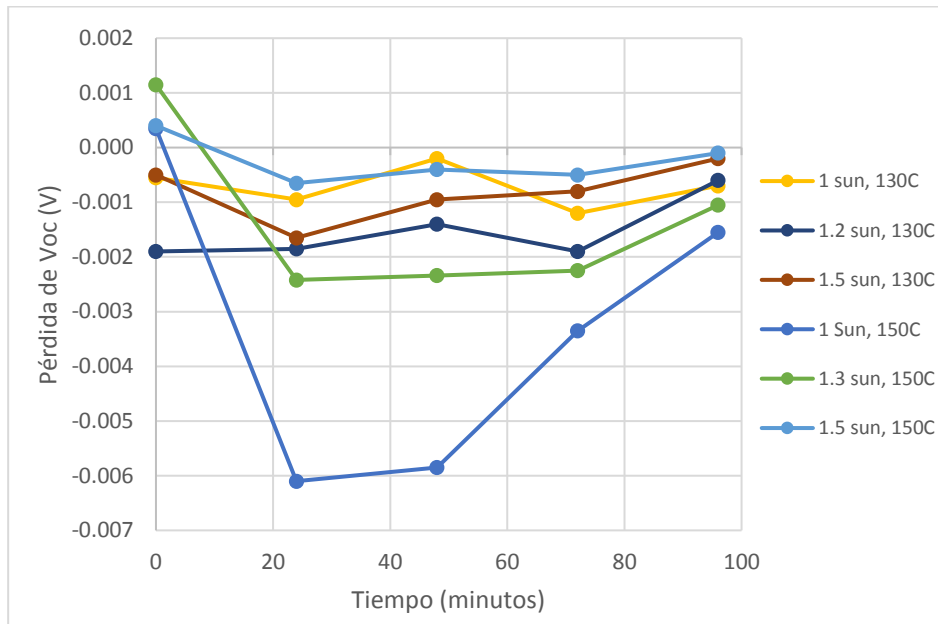


Figura 3 - 20 Prueba de estabilidad de la pasivación de células tratadas a diferentes corrientes y diferentes temperaturas.  
Fuente Propia

### 3.3.3. TEST DE RECUPERACIÓN POR ILUMINACIÓN

#### 3.3.3.1. A BAJAS TEMPERATURAS

Este test se realiza para corroborar lo que se ha reportado en los experimentos realizados por (Hallam, et al., 2017), que indican que son necesarias alrededor de 1000h de light soaking a 50 °C para recuperar toda la degradación. En la Figura 3 - 21 se muestra el comportamiento de las células, las cuales van recuperando Voc en un proceso más lento, ya que en casi 150 horas de light soaking las células se recuperarán lentamente, pero sí que se observa la tendencia a la recuperación tanto en Voc como Jsc (ver Figura 3 - 22).

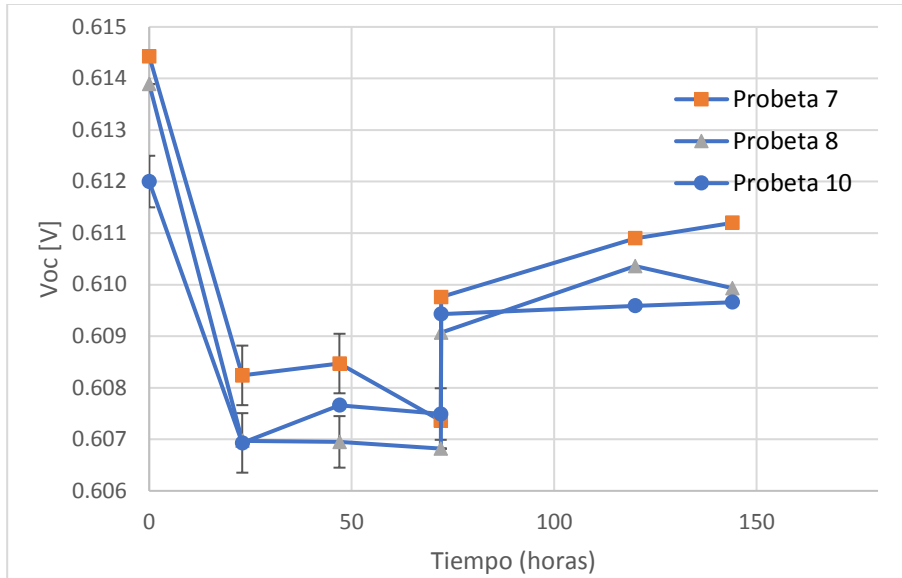


Figura 3 - 21 Comportamiento Voc en células c-Si expuestas a iluminación por 144h  
Fuente Propia

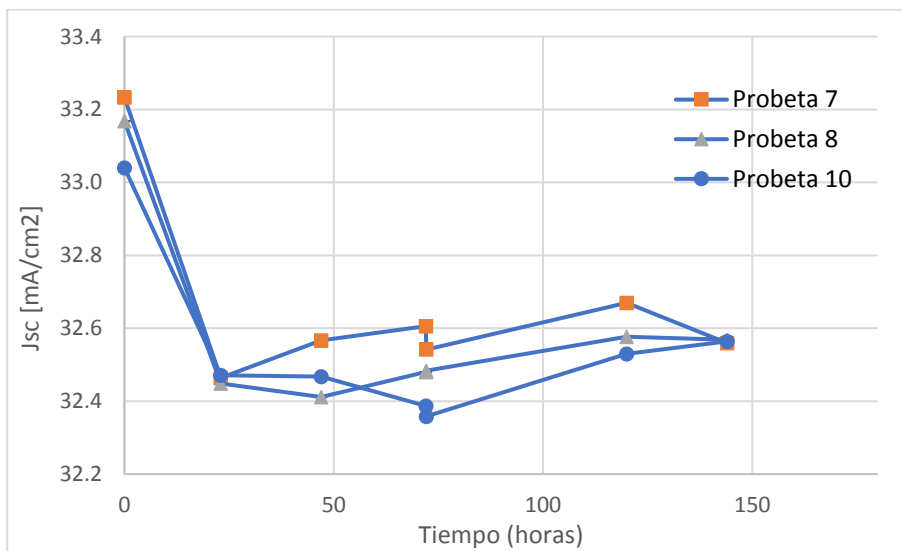


Figura 3 - 22 Comportamiento Jsc en células c-Si expuestas a iluminación por 144h  
Fuente Propia

### 3.3.3.2. TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN POR ILUMINACIÓN A <150 °C

Para llevar a cabo este tratamiento es necesario utilizar el dispositivo diseñado en el capítulo 3, es decir, un equipo para realizar la hidrogenización de las células mediante iluminación led. Lamentablemente no ha sido posible terminar dicho equipo durante el tiempo de ejecución de este trabajo, debido a retrasos en el proceso de compra y a que alguno de los componentes del circuito de control no ha podido ser suministrados por el proveedor. Sin embargo, si se han comprado los Leds y si se han montado y soldado a nivel de placa base. La hidrogenización por iluminación es un proceso ya utilizado industrialmente en la fase de fabricación de las células PERC, y nuestro

propósito era llevarlo a cabo en módulos terminados, con un equipo que pueda trasladarse fácilmente a las instalaciones solares, desarrollar el proceso, y demostrar su viabilidad.

### 3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la degradación LID relacionada con BO se muestran en la Figura 3 - 23 realizada bajo 72 horas de iluminación a 1 sol de potencia y temperatura 40°C, como se puede observar la gráficas es bastante parecida a los resultados obtenidos en un estudio realizado por el Instituto Nacional de Energía de EEUU en 2012 para entender la degradación que sufre las células solares de silicio cristalino Figura 3 - 23. La degradación absoluta en ese estudio fue de 0.5%, mientras que en este estudio el resultado fue de 0.6% por lo que podemos concluir que los defectos que producen la degradación LID están presentes en las células que estamos utilizando y que utilizaremos para el tratamiento de regeneración. Esta misma prueba será la que servirá para verificar la estabilidad de los tratamientos de pasivación una vez que estos hayan sido llevados a cabo, ya que si el tratamiento ha sido efectivo, cuando se realice este mismo test, la degradación de Voc y Jsc así como sus otras características no deben cambiar/reducirse en el tiempo bajo iluminación.

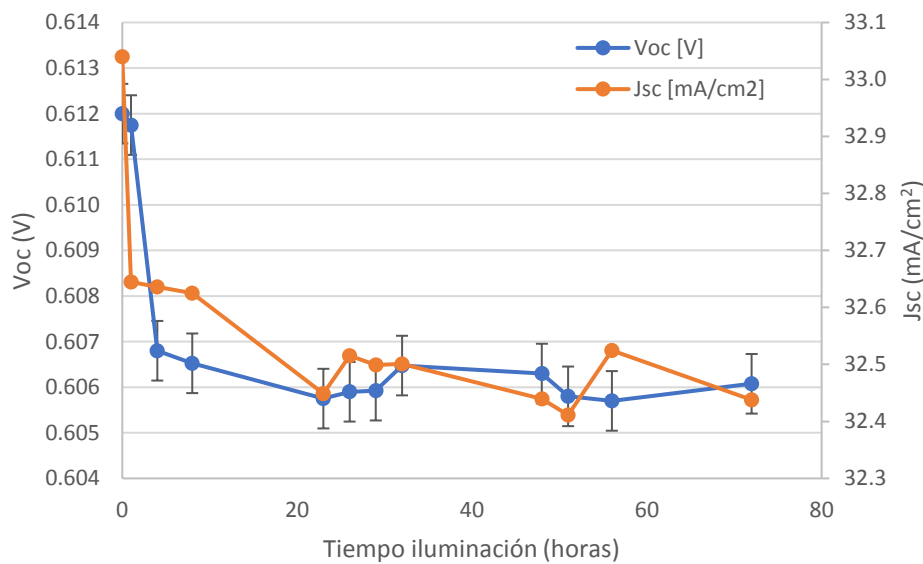


Figura 3 - 23 Test de degradación bajo iluminación para comprobar el test realizado por NREL-USA  
Fuente Propia

Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

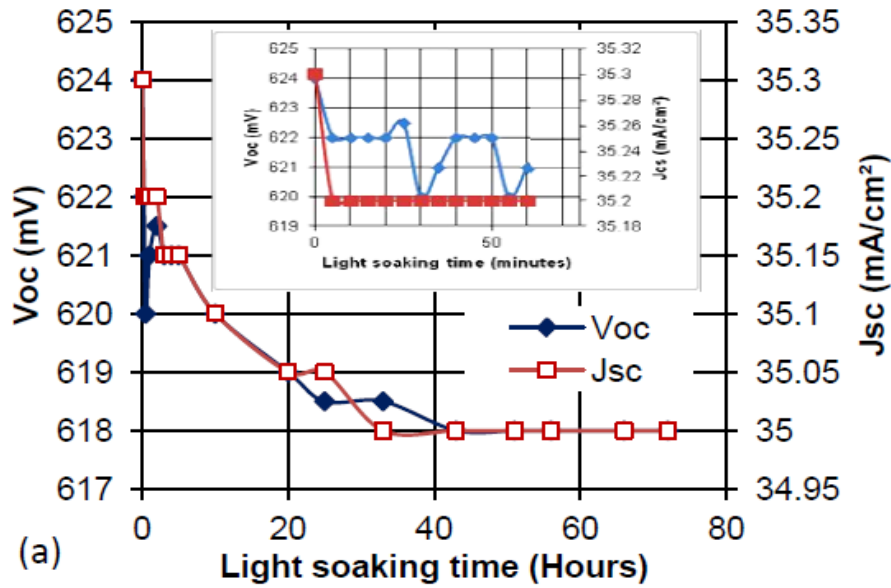


Figura 3 - 24 Variación de Voc y Jsc bajo iluminación en un estudio realizado por NREL USA para estudio de la LID  
Fuente: (Sopori, y otros, 2012)

En un segundo test, se realizó la recuperación de las células degradadas como en el procedimiento anterior, es decir, degradación por exposición a iluminación a 1 sol durante 72 horas, y luego se hizo una recuperación con recocido sin luz (dark anneal) a 200 °C durante 0.5 horas. Inmediatamente después se expone la célula a iluminación bajo las mismas condiciones antes del tratamiento de cocido. Lo que se esperaba es que los parámetros de la célula se recuperen nuevamente y como se ve en la Figura 3 - 25 esto fue conseguido, sin embargo al ser expuesta de nuevo a iluminación la degradación volvió a ocurrir, por lo que se concluye y comprueba que el tratamiento de recocido sin luz recupera la célula de la degradación pero sólo momentáneamente hasta que esta vuelva a ser expuesta a iluminación, lo que quiere decir que este tratamiento no es permanente, como ya se vió en el capítulo 2.

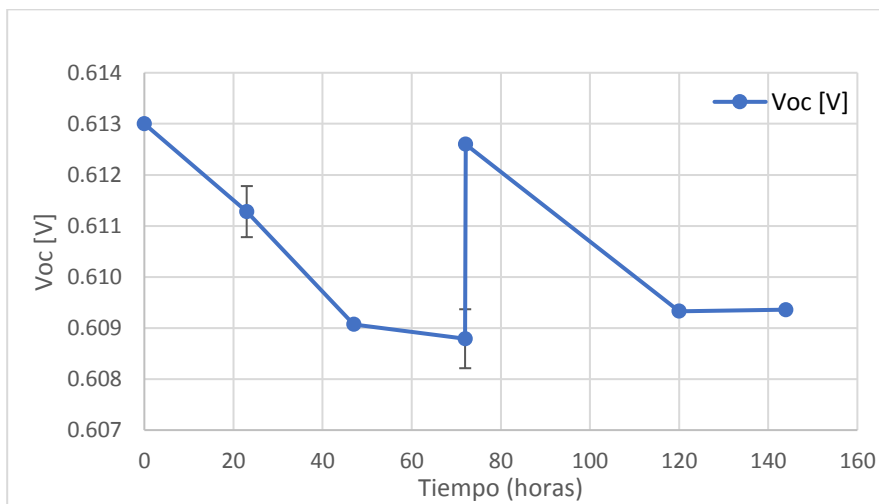


Figura 3 - 25 Comportamiento de Voc en células degradadas y luego recuperadas con recocido sin luz para luego ser expuestas de nuevo a iluminación.  
Fuente Propia

En los resultados de los test con corriente equivalente a 1 sol y temperatura de 50 °C para degradación, vemos como la degradación de voltaje abierto se alcanza después de 200 minutos degradándose en casi 6mV, lo que es parecido a los resultados mostrados por (Xie, et al., 2016) en sus estudios y que podemos ver en las gráficas de la Figura 3 - 26

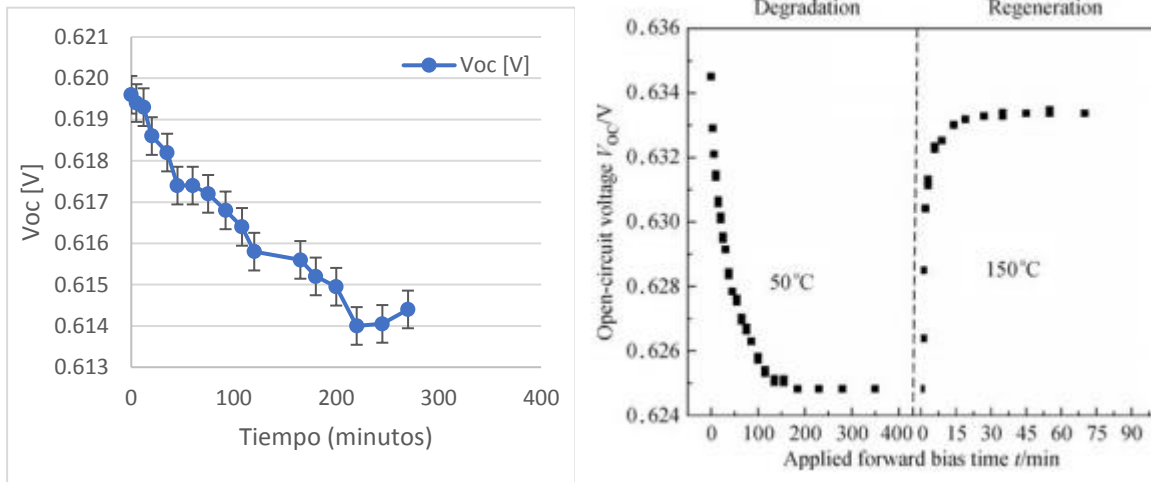


Figura 3 - 26 a) Prueba realizada con inyección de corriente a 1sol. b) Estudio realizado por (Xie, et al., 2016) de inyección de corriente a baja temperatura de 50 y 150°C  
Fuente: (Xie, et al., 2016)

Luego para ver cómo afecta el tiempo del proceso al ciclo de degradación-regeneración al aumentar la temperatura, se aplicó la misma corriente (1 sol) y se varió la temperatura. En la Figura 3 - 27 (izq) vemos cómo a mayor temperatura el ciclo del proceso de degradación-regeneración cambia. Si comparamos con el proceso a 90 °C, que tras 200 minutos sigue degradándose,(Ver Figura 3 - 26) es claro que la temperatura afecta al proceso de degradación-regeneración. Sin embargo, la degradación alcanzada con la temperatura de 90 grados es mucho mayor, que la degradación a 130 °C y 150 °C, lo cual puede explicarse porque o bien no se llega a realizar una degradación completa o bien los procesos de degradación y de regeneración están entremezclados y no pueden verse separados en la gráfica. Si se ha producido o no degradación y posterior regeneración es algo que se comprobará con la prueba de estabilidad, si al exponer la célula a iluminación no vemos degradación o una degradación mínima, lo que significará que el defecto se ha pasivado de forma estable. En la Figura 3 - 27 (der) se muestran los resultados de esta prueba, donde se observa que la célula tratada a 150°C se sigue degradando con la exposición a la luz, por lo que se concluye que no hubo una pasivación completa de la célula. La célula de 130° aunque no llego a sus valores originales, tiene una degradación mínima y se mantiene estable en el tiempo durante la exposición a la luz por lo que podemos decir que su pasivación ha sido completa. Por otro lado, la célula de 90° nunca llego al punto de empezar a recuperarse en las pruebas con corriente, ya que en 15 minutos de inyección de corriente llegó a degradarse 6 mV y no llegó a recuperar ni siquiera una parte de esa pérdida. Luego, al ser expuesta a la luz, se va recuperando poco a poco con las horas, y así a las 24 horas de iluminación alcanza sus valores originales y se mantiene en esos valores durante el resto de la prueba, por lo que podemos decir que también ha alcanzado la pasivación del defecto con las horas de iluminación posteriores a la inyección de corriente a 90 °C. La conclusión es que

probablemente, a esta temperatura, el tratamiento de regeneración habría que haberlo prolongado durante más tiempo, hasta empezar a ver que empezaba a recuperarse la Voc.

- Para estas células, para las temperaturas y niveles de inyección estudiados, solo a 90°C se observa que la velocidad de degradación supera a la velocidad de regeneración. En el resto no es posible observar con claridad una diferencia de velocidades de degradación y de regeneración con la temperatura, ya que probablemente ambos procesos estén ocurriendo simultáneamente.
- A 130°C, el tratamiento de 15 minutos a un nivel de inyección de corriente equivalente a 1 sol consigue regenerar prácticamente todos los defectos, y dicha regeneración es estable como se observa en la figura 3-27 (der). Este es por lo tanto un tratamiento efectivo para nuestras células.
- A 150°C, se observa que la regeneración no es estable, ya que necesita horas para recuperar la Voc a los niveles originales durante la prueba de estabilidad.

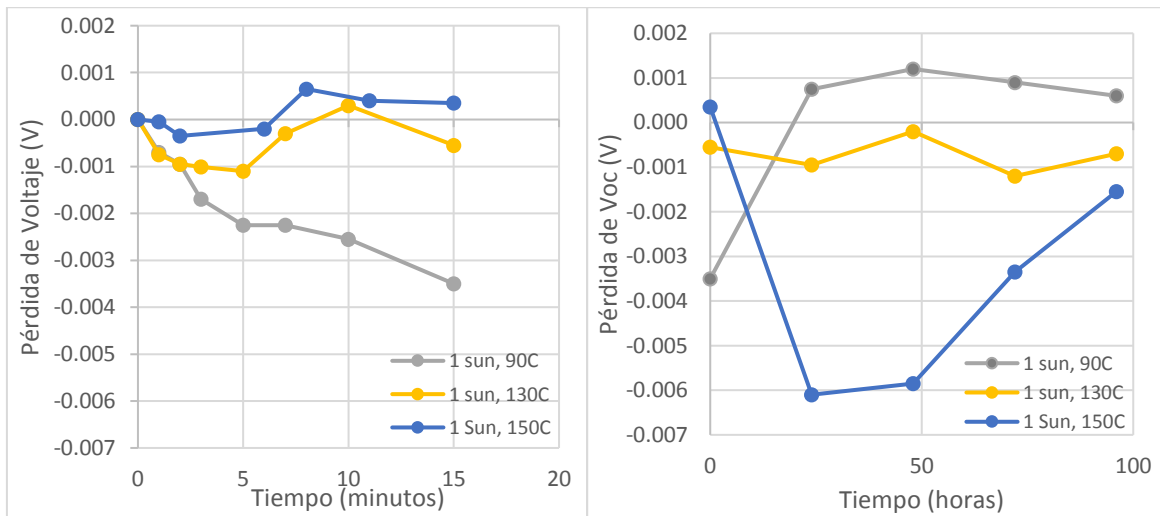


Figura 3 - 27 (izq) Pruebas de corriente a 1 sol y temperaturas de 90,130 y 150 grados. (der)Prueba de estabilidad, células expuestas a iluminación 1sol y 60°C  
Fuente Propia

Para evaluar la intensidad de corriente en el proceso de pasivación se realizaron las pruebas manteniendo una temperatura constante. Los resultados de estas pruebas a dos temperaturas constantes se observan en la Figura 3 - 28 a la temperatura de 130 °C y la Figura 3 - 29 muestra a temperatura de 150 °C, en estas figuras también se observan los resultados de las pruebas de estabilidad.

En las pruebas a 130 °C se observa cómo las velocidades de degradación y de regeneración son similares para todos los niveles de inyección (figura 3-28), y de la gráfica de la prueba de estabilidad se concluye que prácticamente los tres tratamientos han sido similares en cuanto a que alcanzan niveles equivalentes de regeneración y los tres son estables.



## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

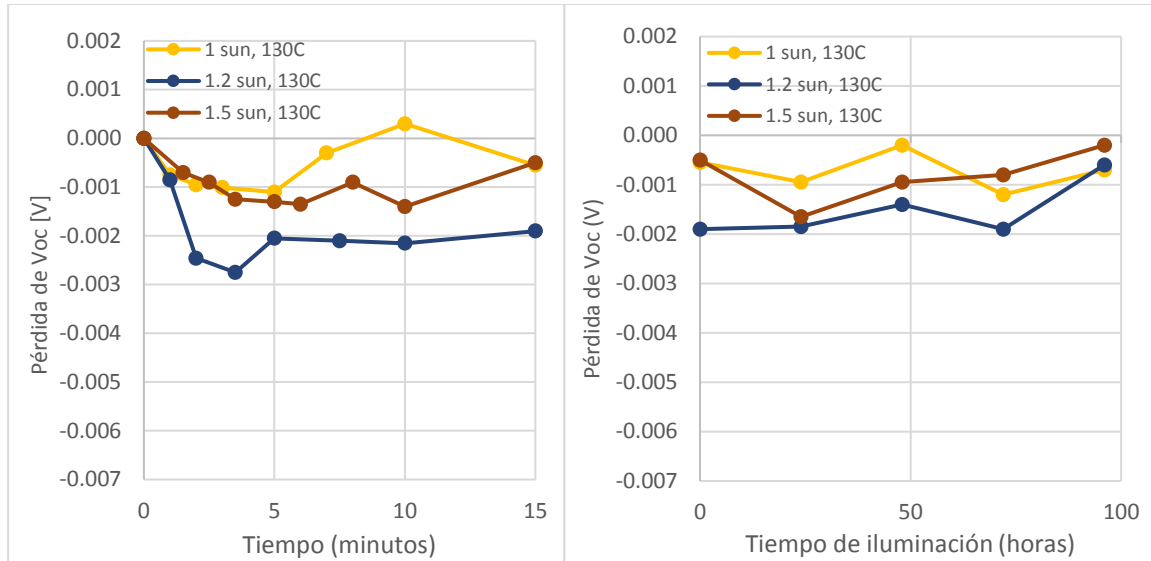


Figura 3 - 28 (izq) Pérdida de voltaje en células con diferentes corrientes y temperatura 130 °C. (der) Prueba estabilidad de la pasivación de células a varias corrientes y temperatura de 130 °C

Fuente Propia

En las pruebas a 150 °C, ocurre lo mismo que en el anterior caso, en el que probablemente los procesos de degradación y regeneración estén ocurriendo simultáneamente y no se puedan diferenciar (figura 3-29). En cuanto a la efectividad de los tratamientos, se puede concluir que a esta temperatura es necesario un nivel de inyección equivalente a 1.5 soles, ya que es esta curva la única que muestra ser estable, ya que tanto a 1 como a 1.2 soles, la curva de estabilidad muestra una degradación y posterior recuperación con el tiempo.

De estas pruebas podemos concluir que:

a 130°C, todos los tratamientos dan lugar a una pasivación estable

a 150°C, solo un nivel de inyección de 1.5 soles es suficiente para producir una pasivación estable.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

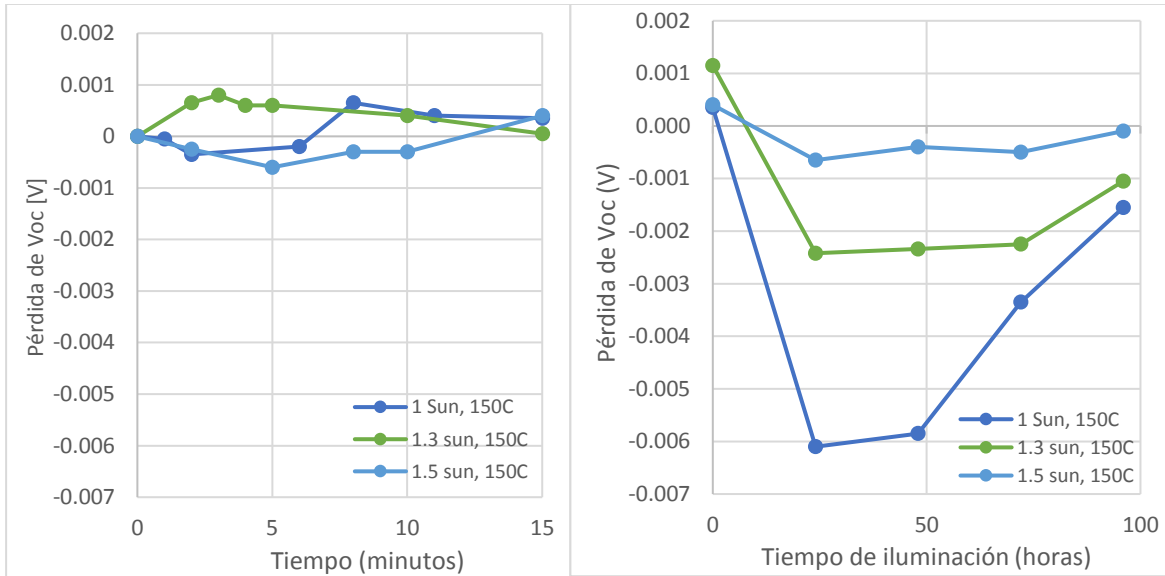


Figura 3 - 29(izq)Pérdida de voltaje en células con diferentes corrientes y temperatura 150 °C. (der)Prueba estabilidad de la pasivación de células a varias corrientes y temperatura de 150 °C  
Fuente Propia

En la Figura 3 - 30 (a) se muestran los resultados del test de iluminación de una célula bajo exposición de 144 horas, y se observa que la transición a la recuperación sucede a las 50 horas aproximadamente. Este mismo comportamiento fue visto en el estudio hecho por la escuela de Ingeniería Fotovoltaica y Energía Renovable de USNW, en la Figura 3 - 30 (b) se observa el estudio que ellos realizaron en células PERC después de haberles realizado un tratamiento de hidrogenización a células por distintos métodos. La línea de la célula de control (negra) corresponde a una célula no tratada con hidrogenización, sino que es la célula para comparar el comportamiento de una no tratada con el de las tratadas. Se observa el mismo comportamiento que el de este estudio, en el sentido de que se produce una recuperación lenta después de la exposición a la luz por 140 horas. La diferencia con las células degradadas con iluminación por 72 horas es que en estas no se percibe la tendencia a la recuperación ya que en este proceso la temperatura de las células fue de aproximadamente 60 °C, con lo que el ciclo degradación recuperación se acelera por eso se puede aquí observar claramente este fenómeno, lo que no se observó en las células a 35-40 °C ya que la degradación-recuperación ocurre más lento.

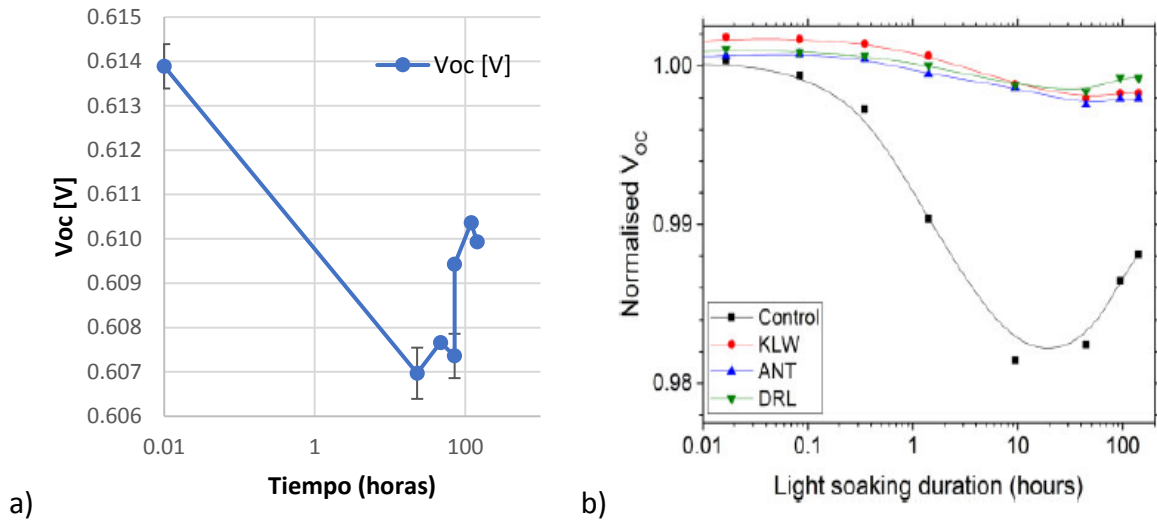


Figura 3 - 30 a) Comportamiento de Voc durante exposición a iluminación a 1 sol por 144h. b) Voc normalizado de células Cz PERC tipo P, comportamiento durante test de iluminación en células tratadas con hidrogenización avanzada con diferentes herramientas a aproximadamente 20 soles.  
Fuente: a) Propia y b) (Hallam, et al., 2017)

Finalmente sacamos como conclusión de estas pruebas que las células que sufren de degradación debido al defecto B-O, pueden recuperarse de la degradación, y eliminar el defecto permanentemente mediante la inyección de portadores tanto por iluminación como por corriente. En este trabajo se ha estudiado la posibilidad y las características que tendría el proceso para aplicarlo a módulos solares. Un trabajo similar con tests de iluminación a varias temperaturas, lo realizó Herguth en 2010, demostrando que la mejores temperaturas para el tratamiento están en el rango de 130-150 °C, que por otro lado es la temperatura máxima a la que podríamos exponer los modulos solares (Herguth, et al., 2010). Ha quedado demostrado que un tratamiento a 130°C durante 15 minutos y con un nivelde inyección de corriente equivalente a 1 sol es suficiente para conseguir una regeneración completa y estable en el tiempo. Se ha observado que la cantidad de portadores inyectados también afecta al proceso, y que a mayor intensidad mejor estabilidad en la pasivación cuando la temperatura se sube a 150°C. Un tiempo de proceso de 15 minutos es un tiempo razonable para tratar un módulo comparado con el beneficio obtenido.

## **4. DISEÑO DE UN EQUIPO PROTOTIPO DE RECUPERACIÓN INDUSTRIAL**

Como veíamos al principio de esta memoria, en el apartado 2.2, al hablar de los métodos de recuperación del daño de las células, la iluminación es una de las principales opciones a utilizar a la hora de diseñar un equipo de recuperación industrial. En este capítulo veremos el diseño del dispositivo prototipo para realizar el proceso de hidrogenización a nivel de laboratorio, este diseño primero incluye el diseño del dimensionamiento de la lámpara de leds que servirá para la iluminación, el diseño de la placa en donde se montarán los leds, el diseño electrónico del circuito de control, y finalmente se realizará la programación del microcontrolador que nos permitirá unir los conjuntos para que trabajen con las características deseadas.

### **4.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA LÁMPARA DE LEDS**

La luz nos permite generar la concentración de portadores minoritarios necesaria para los tratamientos de regeneración de las células, pero también podemos utilizarla para elevar la temperatura de las células.

Efectivamente, para elevar la temperatura de la célula hasta una temperatura que nos permita desprender los átomos de hidrógeno atrapados en la capa superficial de nitruro de silicio de la célula usaremos luz de 450nm (azul), ya que a esta longitud de onda la célula se calentará por la energía en exceso que provee este tipo de luz, y además se beneficiara de la propiedad de que este tipo de luz no puede penetrar profundamente sobre la célula para actuar sobre esta capa. Al utilizar luz de 450 nm de longitud de onda, la luz se absorberá en las proximidades de la superficie de la célula, que es donde se encuentra depositada la capa de nitruro, zona donde se encuentra atrapada una gran concentración de hidrógeno, que es el elemento que queremos liberar durante el tratamiento para distribuirlo al resto de la célula y neutralizar los defectos.

La luz a 1000nm (infrarroja), no genera calor, sino que es la luz necesaria para cambiar de carga a los átomos de hidrógeno y permitir su movilidad dentro la célula. Estos procesos serán utilizados simultáneamente controlando que la temperatura no sobrepase el rango para producir daños sobre el material de la célula y controlando por otro lado la frecuencia de la luz infrarroja para interactuar con los estados de carga del hidrógeno.

Para la hidrogenización es necesario generar la potencia equivalente a 10 soles que permitirán tener un flujo de  $1W/cm^2$  en la célula. (Australia Patente nº WO 2013/173867 A1, 2013) Si la iluminación normal de un día claro es 100000lux equivalente a  $10lm/cm^2$ , necesitamos generar  $100lm/cm^2$  para 10 soles. Se ha escogido usar leds de 450nm y 950nm disponibles en el mercado cuyo flujo luminoso es 410lm y 683lm respectivamente. Si queremos construir una luminaria que cubra un área de  $875cm^2(38x23\text{ cm})$ , necesitaríamos producir un flujo luminoso de:

$$FL = 100 \frac{lm}{cm^2} * 875\text{ cm}^2 = 87500lm \quad \text{Ec. 5}$$

Por lo tanto, el número de leds necesarios de cada espectro de onda sería:

$$N_{luz\ azul} = \frac{87500\ lm}{410\ lm} = 213\ leds \quad \text{Ec. 6}$$

$$N_{luz\ infrarroja} = \frac{87500\ lm}{683\ lm} = 128\ leds \quad \text{Ec. 7}$$

Distribución de leds entonces quedaría así:

- Luz azul: 10 columnas x 22 filas = 220 leds.
- Luz infrarroja: 6 columnas x 22 filas = 132 leds.

Para construir una lámpara con luz azul e infrarroja que nos ayude a realizar el proceso de hidrogenización localizada en módulos fotovoltaicos de Silicio.

#### 4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

El circuito electrónico para el dispositivo de iluminación de los módulos fotovoltaicos requiere controlar dos lámparas, una con luz azul de 450nm y una lámpara infrarroja de 950nm.

##### 4.2.1. MATRIZ LEDS LUZ AZUL

Son leds con longitud de onda 450nm fabricados por LUXEON, a continuación, se detalla las características técnicas del elemento.

*Tabla 4 - 1 Características técnicas Led LUXEON LXZ1-PR01*

<b>Característica</b>	<b>Valor Mín.- Máx.</b>
<b>Longitud de onda</b>	440-460 nm
<b>Potencia Radiométrica</b>	500-575 mW (410lm)
<b>Voltaje</b>	2.5-3.5 V
<b>Corriente</b>	100-1000mA

*Fuente Propia*

Voltaje y Corriente de Matriz de Leds Azules:

$$V_{matrizledazul} = 2.85v * n_{filas} = 2.85 * 22 = 62.7V \quad \text{Ec. 8}$$

$$I_{matrizledazul} = 500mA * n_{columnas} = 0.5 * 10 = 5A \quad \text{Ec. 9}$$

#### 4.2.2.MATRIZ LEDS LUZ INFRARROJA

Son leds con longitud de onda 940nm fabricados por LUXEON, a continuación, se detalla las características técnicas del elemento.

*Tabla 4 - 2 Características técnicas Led LUXEON L1IZ-0940*

<b>Característica</b>	<b>Valor Mín. -Típica</b>
<b>Longitud de onda</b>	940 nm
<b>Potencia Radiométrica</b>	1000-1150 mW (683lm)
<b>Voltaje</b>	2.3-2.9 V
<b>Corriente</b>	50-1000mA

*Fuente Propia*

Voltaje y Corriente de Matriz de Leds Rojos:

$$V_{matrizledrojo} = 2.9v * n_{filas} = 2.9 * 22 = 63.8V \quad \text{Ec. 10}$$

$$I_{matrizledrojo} = 800mA * n_{columnas} = 0.8 * 6 = 4.8A \quad \text{Ec. 11}$$

Por lo tanto, se necesitará una fuente de alimentación de 64V y 10 A que alimentará a las dos lámparas led. La tensión de alimentación debe ser por encima del voltaje de tensión de la matriz de leds para permitir que el driver regule correctamente la corriente.

#### 4.2.3.DRIVER DE LEDS

El driver regula la corriente que pasará por los leds a través del IRF530 que es un MOSFET de canal N y de un sensor de corriente que está diseñado con un transistor BC546 y una resistencia. La corriente con la que trabajaran los leds depende del valor de esta resistencia, a mayor corriente mayor será la caída de tensión sobre está, si se supera la tensión de umbral de la base del transistor 0.625 V, el transistor reducirá la corriente sobre los leds, esto quiere decir que con este circuito se logra que se limite la corriente sobre los leds.

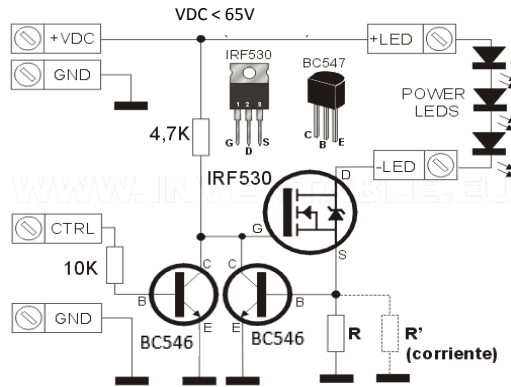


Figura 4 - 1 Esquema del driver de leds

Fuente: <https://www.inventable.eu/2014/06/21/driver-leds-potencia-con-entrada-pwm/>

Sabiendo la corriente que necesitamos para conectar los leds y que estos trabajen correctamente, se realiza el cálculo de la resistencia reguladora de corriente:

$$R_{ledinfrarojo} = \frac{0.625}{I_{led}} = \frac{0.625}{4.8A} = 0.130 \text{ ohms} \quad \text{Ec. 12}$$

$$R_{ledazul} = \frac{0.625}{I_{led}} = \frac{0.625}{5A} = 0.125 \text{ ohms} \quad \text{Ec. 13}$$

$$P_{MOSFET} = V_{MOSFET} * I_{LEDS} = (64v - 63.8v - 0.625v) * 5A = 10.25W \quad \text{Ec. 14}$$

La corriente que pasa por el MOSFET (5A) es una corriente alta por lo que se utilizará un disipador de calor en este dispositivo. La entrada de control al transistor BC546 puede trabajar con tren de pulsos PWM con el que se puede modificar la frecuencia de los leds y además trabaja en modo invertido, es decir que cuando la señal sea menor 0.6V los leds se encenderán y cuando sea mayor se apagarán. La entrada de voltaje tiene un rango que va desde 1.8V a 12V, como la señal PWM vendrá enviada desde el microcontrolador Arduino esta señal tendrá un valor máximo de 5V, y su frecuencia será programada de acuerdo con los requerimientos.

#### 4.2.4 CIRCUITO DE CONTROL

##### - Circuito Luz Azul

Esta lámpara será usada para aumentar la temperatura en la célula, controlando que esta temperatura no supere los 150 °C, ya que a esta temperatura se podría causar daño a la capa encapsulante de la célula (EVA). Usaremos un microcontrolador y un sensor de temperatura para limitar que la temperatura inducida en la célula no sobrepase los 150 °C. El controlador Arduino será el encargado de leer la temperatura mediante una señal enviada por la termorresistencia que estará en contacto directo con la zona donde se está aplicando la regeneración. De acuerdo con la temperatura, el controlador se encargará de enviar la señal a un circuito controlador de leds para

que permita pasar o cortar la corriente a los leds para mantener la temperatura dentro de un rango determinado.

- Circuito Luz Infrarroja

La luz infrarroja tiene como objetivo cambiar el estado de carga del Hidrógeno, y prolongar su tiempo de vida en el Silicio en este estado hasta que logre pasivar los defectos que se encuentre en la célula. Para lograr esto, se requiere que la lámpara funcione a frecuencias con rango de 1Hz a 1kHz, y tiempos de permanencia de entre 0.01 ms y 0.5 segundos. El controlador Arduino será programado para enviar la señal de tren de pulsos a la frecuencia requerida, esta señal será enviada al controlador de leds que dejará o no pasar la corriente a los leds para que se enciendan a la frecuencia enviada.

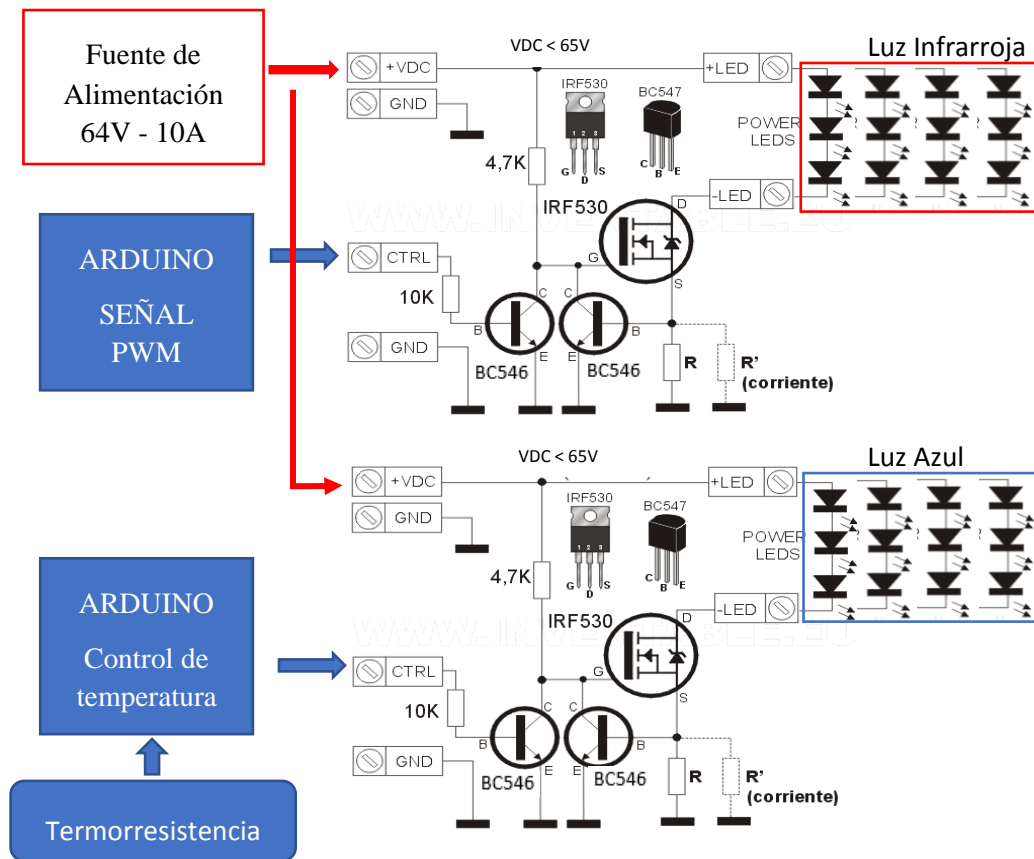


Figura 4 - 2 Esquema del circuito controlador de lámpara de regeneración Fuente propia

4.3. DISEÑO DE LA PCB

Para el diseño de la PCB de la lámpara, se utilizó el software Proteus, donde se simuló el circuito de control y la matriz de leds con los elementos y características técnicas que calculadas anteriormente en el diseño electrónico.



## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

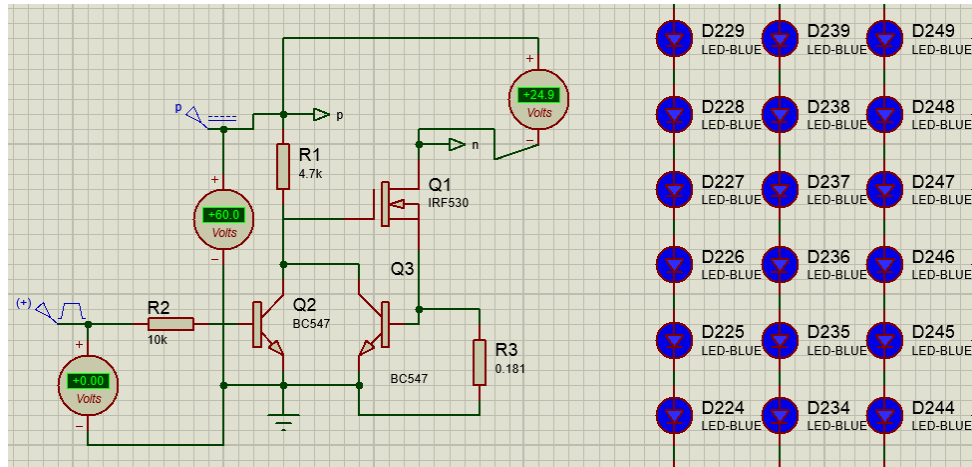


Figura 4 - 3 Simulación Proteus del Circuito de control y matriz de leds azules  
Fuente Propia

Después de comprobar que la simulación del sistema de control funciona, se realiza el diseño de la PCB, para lo cual utilizamos el software Ares del mismo programa, para el trazado del circuito en el que se tiene en cuenta las reglas de ruteado, en este caso, se diseña el circuito para líneas de corriente por las cuales pasará una corriente de 5A y voltaje 60v.

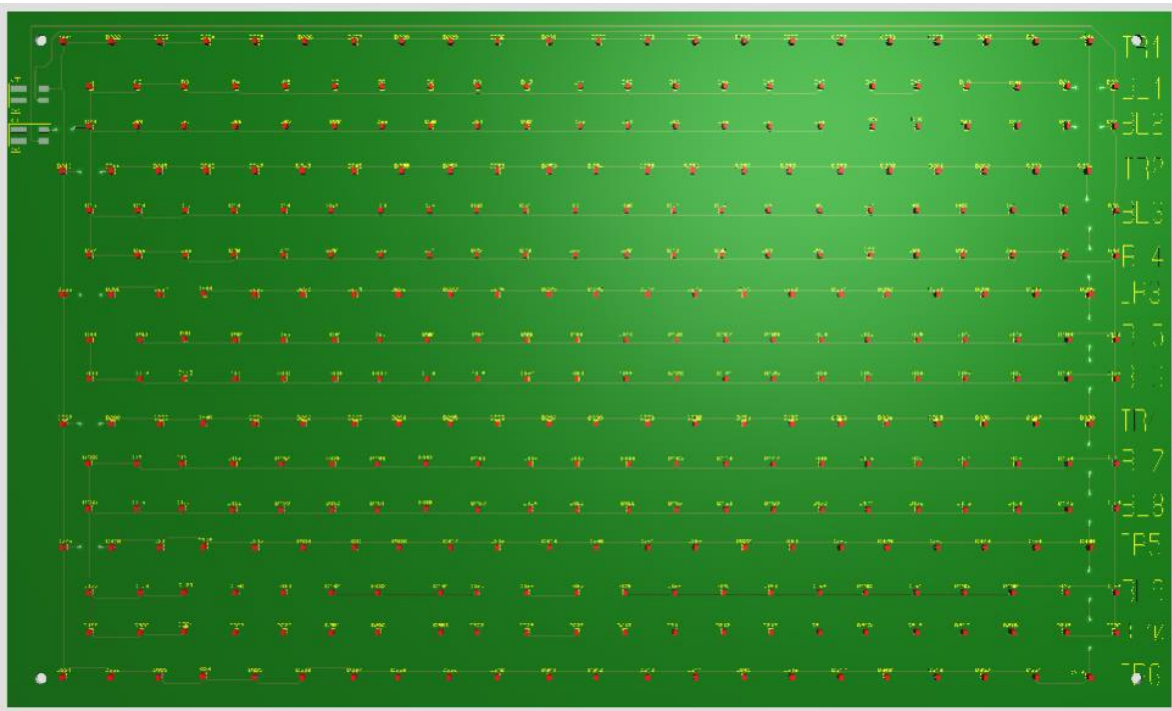


Figura 4 - 4 PCB de la lampara diseñado en Ares

Fuente Propia

El software Ares permite visualizar como se verá la PCB diseñada como se ve en la Figura 4-4, y desde este mismo software se obtienen los archivos para la fabricación de la PCB (gerbers) y montaje de componentes (pick and place).

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

Al ser un circuito de leds de alta potencia, la placa se calentará por lo que para ayudar a disipar el calor la PCB será construida en material de aluminio llamada *pcb metal core*. Este tipo de PCB, la cara superior es una capa de cobre en donde serán soldados los componentes SMD (*Surface mount device*) y la cara inferior es aluminio, para ayudar con la irradiación la mascaró de soldadura se fabricará en blanco. Las características de la PCB están detalladas en la Tabla 4 - 3:

Tabla 4 - 3 Características de fabricación de PCB de leds

Número de capas	1
Tipo de laminado	Aluminio
Espesor laminado	1,50mm
Espesor Cu	70um
Tamaño el panel	41,5x23,8cm
Máscara de soldadura	Blanco
Serigrafía	Negro
Otros detalles	PCB con puentes de cobre

Fuente propia

A continuación, se muestra la PCB terminada de la lámpara de leds:

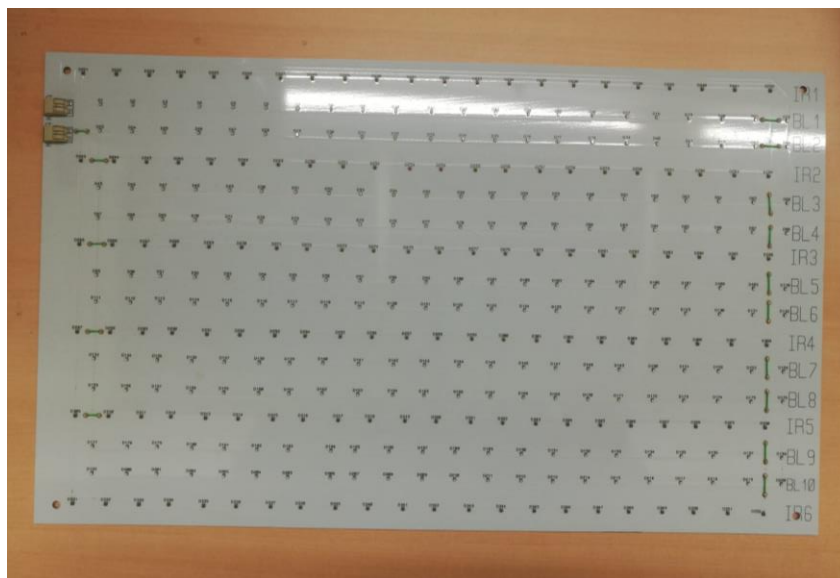


Figura 4 - 5 PCB lámpara de Leds SMD de alta potencia

Fuente Propia

### 4.4. PROGRAMACIÓN

Para el control de la lámpara se utiliza el microcontrolador Arduino, esta tarjeta tiene entradas/salidas digitales, analógicas y comunicación serial que servirá para controlar el circuito de la lámpara de leds. Con las salidas digitales se tiene control sobre el encendido de los leds, con una entrada analógica se leerá la señal enviada por el sensor de temperatura en forma de voltaje y mediante la comunicación serial podremos monitorear desde el ordenador la temperatura y al mismo tiempo se enviará la señal condicionada de los leds. Para los leds azules, se encenderán

siempre y cuando la temperatura de la célula no alcance los 150 °C si se alcanza esta temperatura se manda a apagar los leds si no permanecerán encendidos durante el proceso de pasivación. Para los leds rojos, se manda una señal de pulsos para que estos leds se enciendan en periodos de menos de 1 segundo, y así permanecerán estos durante todo el proceso.

*/\*Programa control de lampara para Hidrogenización*

*Código escrito por Victoria Yaguana G.*

*Se controlan dos tipos de matriz de leds:*

*- leds azules: se encenderán si la temperatura es menor a 150°*

*- leds rojos: tendrán tiempo de pulso menor a 1s*

*Se hace lectura de un sensor de temperatura tipo RTD pt100 y la impresión en el monitor serial.*

*\*/*

*const int EntradaAnaloga = A0; // Entrada análoga donde estará la resistencia de conversión de corriente a voltaje*

*int sensor = 0;*

*int temperatura = 0;*

*void setup() {*

*pinMode(LED\_BUILTIN, OUTPUT);*

*pinMode(7, OUTPUT);*

*Serial.begin(9600);*

*}*

*void loop() {*

*digitalWrite(LED\_BUILTIN, HIGH); // El encendido del led rojo debe ser menor a 1s, se enciende por 0.01s  
  f=100Hz*

*delay(10);*

*digitalWrite(LED\_BUILTIN, LOW);*

*delay(1000-10);*

*// Obtener la lectura de ADC*

*sensor = analogRead(EntradaAnaloga);*

```
// hacer el mapeo de las señales por cifras multiplicadas por 10 para
// obtener decimales, pues la funcion map no recibe números flotantes
temperatura=map(sensor,205,1023,-500,1500)/10;
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temperatura);
Serial.print("\n");

if(temperatura<132){
  digitalWrite(7, HIGH);
  Serial.print("Leds azules: encendidos");
  Serial.print("\n");
}
else{
  digitalWrite(7, LOW);
  Serial.print("Leds azules: apagados");
  Serial.print("\n"); }
}
```

#### 4.5. RESUMEN CAPÍTULO DISEÑO DEL EQUIPO

Para el diseño del equipo, primero se calculó la dimensión de la lámpara de leds tomando en cuenta las propiedades que ofrece el tipo de luz a usar, así se utiliza una matriz de led de luz infrarroja de 950 nm que funcionará a una frecuencia de 100Hz, y una matriz de leds de luz azul de 450 nm que se la utilizará para calentar la célula a la temperatura deseada para el proceso de hidrogenización. La potencia de iluminación a generar es equivalente a 10 soles, para lo que se empleará 220 leds azules y 132 leds infrarrojos, ambas matrices generan la misma potencia de 10 soles. El diseño de la placa de los leds se realiza en el programa Proteus donde se generan los archivos para la manufactura de la PCB y el montaje de los Leds con tecnología *pick & place*. Para controlar los leds se diseña un circuito de control, que consta de un microcontrolador, dos drivers de leds para la alimentación de las matrices, y un sensor de temperatura RTD que permita supervisar la temperatura en la célula a tratar. El control de la alimentación de las matrices para que funciones a pulsos la luz infrarroja y para controlar el funcionamiento de la luz azul a través de la temperatura de la célula cuidando que no pase de los 150 °C, se realiza con la programación en la tarjeta Arduino, que es un microcontrolador con entradas analógicas para realizar la lectura del sensor de temperatura y salidas digitales para controlar la alimentación de los leds.

## 5. ANÁLISIS DE COSTE

En este capítulo empezaremos recopilando información sobre equipos similares existentes en el mercado para saber el nivel de innovación que estamos ofreciendo al mercado y la competencia que tendría en caso de explotarse comercialmente. También se estudiará si existen patentes de equipos para realizar tratamientos de recuperación en módulos solares. Aquí también se analizarán los costes totales del equipo para su manufactura, que incluye costes de componentes y costes de ensamblaje de las partes diseñadas en el capítulo anterior. Y finalmente se hará una proyección de coste del tratamiento que se puede hacer con el equipo diseñado para saber si tiene atractivo económico.

### 5.1. BENCHMARKING

En 2005, se realizaron los primeros estudios con respecto a las dinámicas de los mecanismos de degradación en células fotovoltaicas lideradas por el grupo de investigación de la Universidad de Konstanz, Alemania. Después de casi 10 años es ahora cuando acaban de salir al mercado los primeros equipos que tratan la LID en células monocristalinas. En la NSWU, el equipo de investigación de la Escuela de Fotovoltaica e Ingeniería de Energías Renovables también lleva años estudiando y desarrollando un sistema con fabricantes de equipos para mitigación de LID en células solares cSi tipo PERC. Como ejemplo la Figura 5 - 1 es una foto de un equipo desarrollado por la empresa Neotech con el equipo de NSWU. Actualmente, otros equipos han sido fabricados para trabajar autónomamente o acoplados a líneas de producción de células solares industriales para fabricantes en Asia, Europa y EE-UU. Estos equipos de hidrogenización utilizan tecnología basada en iluminación LED, y otros basados en tecnología láser de alta intensidad. La proyección es que estos equipos sean construidos para células de tecnología PERC, que es la célula que está ganando terreno entre los fabricantes ya que ofrecen mayores eficiencias que la tecnología Al-BSF. Los equipos están dirigidos a trabajar con células monocristalinas, ya que los mecanismos de degradación para células multicristalinas son distintos y aún no está resuelta completamente su forma de eliminación. Por esta razón la tecnología monocristalina, que es inicialmente más cara, podría volver a ganar atención y, aun así, gracias a progresos en la reducción de coste de producción y gracias a avances tecnológicos, el coste de la energía solar podría seguir reduciéndose (Fishbeck, 2015). En este contexto, métodos como la hidrogenización irán acoplándose en los procesos de fabricación de células y módulos.



*Figura 5 - 1 Foto del equipo de hidrogenización avanzada de la empresa Asia Neotech basado en iluminación LED.  
Fuente: (Hallam, et al., 2017)*

El equipo de investigación de NSWU tiene registrada una patente para hidrogenización avanzada con iluminación LED y láser (Australia Patente nº WO 2013/173867 A1, 2013) que es la tecnología para la pasivación con iluminación y temperatura. En ella se describe el uso de iluminación a distintas longitudes de onda para lograr la pasivación, y también hace referencia al uso de esta tecnología para aplicación en células ya terminadas, en las que con la hidrogenización localizada con láser se pueda realizar el tratamiento en las partes específicas de la célula en las que se concentren los defectos y consiguiendo a la vez que no se interfiera con su estructura.

Actualmente el estudio de la degradación LID ha cobrado mucha importancia en la industria por su efecto en las células multi-PERC que todos los grandes fabricantes están tratando de introducir en producción, por lo que los tratamientos tanto por inyección de corriente como por iluminación son ampliamente estudiados para aplicarlos en este tipo de células. La clave para reducir la tasa de degradación de las células multi-PERC es el proceso de regeneración avanzada. El proceso de regeneración para dar respuesta al tipo de complejos que causan el LID consiste en inyectar un exceso de portadores, y una adecuada temperatura y duración. Generalmente, en mono-PERC se utiliza un proceso por iluminación (Light Induced Regeneration, LIR) usando Leds o Laser; sin embargo, el proceso industrial LIR no es adecuado para multi-PERC. Por ejemplo, Canadian Solar utiliza un proceso propietario basado en inyección de corriente (Current Induced Regeneration, CIR), que comparado con el LIR tiene muchas ventajas, tales como una mayor ventana de proceso, mayor eficiencia, menor consumo eléctrico y menor coste. Usando este proceso la degradación puede reducirse hasta en un 80%. (Jiang, Jaubert, Yao, Guangyong Xiong, & Xing, 2017)

Un equipo como el diseñado en este trabajo se basa parcialmente en esta patente, para realizar el proceso de pasivación en células solares monocristalinas de tecnología Al-BSF instaladas en huertos solares. Este prototipo se pretende que pueda ser usado sobre módulos instalados, por lo que el análisis de coste se hará inicialmente sobre el prototipo diseñado para el laboratorio, y que incluye el coste de los componentes electrónicos, coste del diseño y manufactura. Posteriormente, se analizará el coste del tratamiento de recuperación para una célula y se hará la proyección para un

módulo, tomando en cuenta el tiempo del proceso y el coste del consumo eléctrico, y finalmente analizaremos el potencial económico al considerar ambos costes, el coste de manufactura y de tratamiento.

El mercado objetivo son plantas de generación solar que llevan funcionando años, y cuya producción eléctrica a nivel de módulos solares ha decaído con el tiempo. Lo que se pretende es crear este equipo para realizar la pasivación de los módulos en estos huertos solares procurando mejorar la potencia, y con esto alargar la vida de los módulos, o al menos recobrar su potencia a valores próximos a los de fabricación. Para estudiar un verdadero potencial económico de esta tecnología se debería incluir proyecciones de coste de manufactura a nivel industrial y estudios de mercado junto con los estudios de pasivación y mejora de potencia de células y módulos aquí presentados. En este trabajo solo se verá, un análisis de costes del prototipo y del tratamiento como punto de partida para hacer la proyección de los cálculos a la fabricación. Un estudio completo lo encontramos en el estudio tecno-económico hecho por (Chang, et al., 2018) para analizar módulos Al-BSF, PERC, entre otros, e implementaciones de hidrogenización avanzada en la manufactura de células, utilizando métodos de análisis como el Monte Carlo, y que se podría tomar como base para realizar un estudio tecno-económico más detallado.

### 5.2. COSTE DEL EQUIPO

Al ser un prototipo, se tendrá en cuenta cada aspecto relacionado con la manufactura del equipo, esto quiere decir, se analizan costes de componentes y costes de manufactura, y al ser un prototipo no tendremos en cuenta el coste de ingeniería y de diseño del equipo. Esto se deberá agregar en forma de costes de desarrollo al valor del equipo a construirse ya de forma industrial, en el cual se tenga en cuenta esto y la ganancia económica para calcular la rentabilidad del equipo.

A continuación, se detalla el coste del equipo teniendo en cuenta componentes para el circuito de control y componentes para la fabricación de la PCB de leds:

- Componentes circuito de control

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

*Tabla 5 - 1 Lista de componentes circuito de control y sus costes*

<b>Cant.</b>	<b>Referencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio</b>
6	BC546	Transistor NPN	0.443	2.658
4	IRF530	MOSFET	0.877	3.508
1	Arduino Nano	Microcontrolador	30.79	30.79
1	Pt100	Sensor de temperatura tipo RTD	15	15
2	OSTTC020162	Terminales tipo bloque	0.73	1.46
4	FU5A320	Fusibles de cristal 250V – 5A Con Portafusibles	0.55	2.2
9	RES	Resistencias 5W	1.45	13.05
1	OMNI-UNI-32-58	Disipador de calor para MOSFET	8.38	8.38
<b>Total</b>			<b>58.22</b>	<b>77.046</b>

*Fuente Propia*

- Componentes lámpara de leds:

*Tabla 5 - 2 Componentes lámpara de leds y sus costes*

<b>Cant.</b>	<b>Referencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio</b>
220	LXZ1-PR01	Led LUXEON de alta potencia azul 450nm	1.26	277.2
132	L1IZ-0940	Led LUXEON de alta potencia infrarrojo 940nm	1.84	257.6
2	2060-402/998-404	Terminales SMD para cables	0.535	1.07
<b>Total</b>				<b>521.15</b>

*Fuente Propia*

- Fabricación PCB y montaje de leds:



## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

Tabla 5 - 3 Costes fabricación PCB de leds

<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio</b>
1	Fabricación PCB y montaje de leds	652.35	652.35
1	Placa de aluminio e=1,5mm	225	225
<b>Total</b>			<b>877.35</b>

Fuente Propia

La fabricación de la PCB tiene un valor alto por que se fabrica por unidad, si se lo fabricará ya industrialmente estos valores bajarían casi en 6 veces este valor.

- Coste diseño electrónico y programación: Este valor ahora no lo tendremos en cuenta, la fase de diseño del prototipo lo añadiríamos para calcular el coste del equipo de manera comercial en el que se añadirían los costes desde la fase de diseño de prototipos que es esta. Pero aquí lo detallamos porque es un valor que se debería tener en cuenta en futuras proyecciones de coste.

Tabla 5 - 4 Costes de ingeniería

<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>
1	Coste de ingeniería por investigación y desarrollo Aprox. 1440 h	72000

Fuente Propia

- Coste total equipo:

Tabla 5 - 5 Detalle coste total equipo de pasivación

<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>
1	Coste circuito control	77.05
1	Coste PCB y montaje	1398
<b>Total</b>		<b>1475.05</b>

Fuente Propia

### 5.3. COSTE DEL TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN

El tratamiento de pasivación mediante iluminación aplicado a un módulo con un equipo como el diseñado tendría una duración de 15 minutos, tiempo en el cual el equipo funcionaría con la lámpara

de leds y el circuito de control. La lámpara de leds tendría un consumo de 640W mientras que el circuito de control tendría un consumo máximo de 5W, para tener una potencia de consumo total de 645W.

Si el coste de la electricidad es de 0.12€/kWh, entonces tendríamos que el coste del tratamiento es de:

$$Coste_{tratamiento} = Consumo\ electrico * costo\ electricidad$$

$$Consumo\ eléctrico = 0.645kW * 0.25h = 0.16125kWh$$

$$Coste_{tratamiento} = 0.161kWh * 0.12 \frac{€}{kWh} = 2cts\ €$$

El tratamiento tendría un coste de 2cts€ por 875cm<sup>2</sup> de área tratada (área prototipo), si un módulo estándar tiene un área de 1.6m<sup>2</sup> entonces este valor sería 18 veces mayor, es decir el coste de tratamiento para un módulo es ~0.36€, que es el coste por consumo de electricidad que usaría el equipo. Considerando que se degrada un módulo hasta un 5% de su potencia (según los test de degradación), y que con el tratamiento se puede recuperar esta degradación, el costo de tratamiento es bastante atractivo si además consideramos que el tiempo de recuperación de la inversión en el tratamiento es bajo. Así, por ejemplo en módulos de 250W la recuperación de potencia sería de 12.5W, el tiempo que tendría que estar en operación el módulo para devolver la inversión con la potencia recuperada es de:

$$Payback_{tiempo} = \frac{0.36€}{\frac{0.12€}{kWh} * 12.5W} = 240h$$

Con 240 horas, es decir más o menos con un mes de operación se recuperaría la inversión del tratamiento. Es un coste bastante bajo de tratamiento para devolver los módulos a su eficiencia original lo que representa que las plantas de generación eléctrica aumenten su producción eléctrica por tanto su beneficio económico. El potencial económico que se podría ganar, específicamente en España el potencial a recuperar con este tratamiento es de 20MW que representaría 2M€ en generación eléctrica lo que lo hace al tratamiento económicamente atractivo.

#### 5.4. RESUMEN CAPITULO COSTE DEL EQUIPO

El tratamiento de eliminación del defecto B-O ha vendido investigándose desde 2005, y después de más de 10 años de investigación han salido al mercado equipos industriales que aplican el proceso de pasivación en células solares tipo PERC. Estos equipos han sido desarrollados entre equipos de investigación de la Universidad de Konstanz (especializados en pasivación con corriente) y la NSWU (especialistas en hidrogenización con iluminación) cuyos equipos de trabajo poseen las patentes de los tratamientos y empresas de manufactura de células que desarrollan los equipos industriales para acoplarlos a la línea de producción de las células. Hasta el momento no se conoce y no existe registrada ninguna patente ni diseño de un equipo de recuperación o regeneración para módulos solares en operación, por lo que se cree existe una buena oportunidad con potencial económico para ofrecer este tipo de servicio a plantas fotovoltaicas de generación eléctrica. El prototipo

diseñado tiene un coste total de 1475€ que incluye coste de componentes, manufactura y montaje de partes. Estos costes se reducirían de fabricarse equipos en mayores cantidades, y se incluiría costes de ingeniería que incluyen investigación, diseño, desarrollo y programación que se dividiría para la cantidad de unidades a fabricar. En cuanto al coste del tratamiento, al ser un equipo que consume 645W de potencia y el tratamiento dura 15 minutos el coste total del tratamiento por módulo sería de 36cts€, que es precio bastante bajo de tratamiento si garantiza que el módulo vuelva a recuperar sus características de operación iniciales.

## 6. CONCLUSIONES

- La mitigación del LID natural de los módulos debería ser considerada y aprovechada en el momento de instalar los módulos: debería estudiarse las zonas en donde es factible que ocurra y el momento propicio del año para hacer la instalación y que beneficie a la mejora de potencia de los módulos.
- La temperatura influye sobre las medidas, y se debe tener en cuenta la temperatura para no confundir cambios de voltaje por degradación con cambios por aumento de temperatura. Es complicado tener cifras estables y exactas trabajando con voltajes tan pequeños mV si por cada grado de diferencia varía 2.3mV, por lo que es importante medir con precisión la temperatura de la célula a la vez que se están haciendo las medidas
- El estudio de los límites de aplicación de temperatura e intensidad de iluminación es importante para determinar cuáles son los parámetros apropiados para alcanzar una pasivación permanente en el periodo más corto y de manera eficaz.
- La pérdida de la pasivación se puede minimizar mediante el control combinado de la velocidad de enfriamiento y las concentraciones de portadores, lo que puede controlarse usando iluminación o corriente eléctrica.
- La pasivación mediante inyección de corriente es un tratamiento interesante ya que se puede actuar en una gran cantidad de células. El problema o inconveniente con este proceso es que podría existir variación de temperatura en el bloque de células tratadas, sin embargo, se podría resolver este problema realizando una mejor conexión entre células y dejando espacio para ventilación entre ellas. Además, otra ventaja de la inyección de corriente es que al contrario de con iluminación no se pierde potencia, sino que es directamente inyectada en las células.
- La hidrogenización mediante el uso de luz y temperatura ha sido desarrollada por UNSW School of Photovoltaic & Renewable Energy Engineering, que posee la patente en este tipo de tecnología (Australia Patente nº WO 2013/173867 A1, 2013), utilizada en la fabricación de células PERC para la eliminación de defectos desde su manufactura y mejorar la eficiencia de este tipo de células. El diseño del prototipo ha sido basado parcialmente en esta patente, pues la aplicación de este equipo está dirigida a usar el proceso de pasivación en módulos de silicio cristalino ya instalados y en operación, y que han sufrido degradación durante su tiempo de operación. El diseño de un dispositivo transportable, para llevarlo a huertos solares y con tiempos de tratamiento bajos tiene la finalidad de lograr recuperar módulos de una instalación en un día, y con la posibilidad de hacerlo en la noche, para que de tal manera no afecte o interrumpa en gran medida la operación normal de la generación eléctrica de la instalación.
- En futuros estudios se espera realizar investigación y pruebas con módulos de silicio multicristalino, pues los defectos dentro de este tipo de módulo aún son desconocidos y más aún los métodos para eliminarlos, pero si se logra precisar su origen y mitigación significaría gran avance dentro de estos métodos pues el mayor porcentaje de módulos

instalados en el mundo son de este tipo, por lo que la potencia de recuperación y ganancias económicas serían bastante significativas como lo vimos en el capítulo 2. Cabe también decir que esto beneficia a alargar el tiempo de vida de estos dispositivos, que se traduce en evitar desechar estos dispositivos por su falta de eficiencia y al mismo tiempo no crear nuevos para tratar de reemplazarlos, reduciendo la producción de gases de efecto invernadero durante la manufactura que esto supondría.

- El siguiente paso de las investigaciones consistirían en determinar si con las condiciones naturales de iluminación y temperatura de una instalación en la comunidad valenciana y en verano somos capaces de obtener un proceso óptimo con solo aplicar corriente de forma externa, y en las horas centrales del día, para reducir el consumo eléctrico y por tanto costes de tratamiento, y proponer el diseño del dispositivo con corriente para evaluar las ventajas y desventajas entre ambas tecnologías y cuales serías sus rentabilidades.
- El tratamiento con iluminación permite un mayor control del hidrógeno, de los estados de carga y por tanto de su difusividad dentro de la célula y su tiempo de vida. Además, al poder utilizar una segunda fuente de iluminación se consigue calentar la zona específicamente deseada de la célula dando un control aún más preciso, por lo que el tratamiento con iluminación es bastante atractivo y se ha implantado ya en varias empresas de manufactura de células.
- El potencial de recuperación y económico de este tratamiento aplicado a huertos solares en España es bastante alto, aunque habría un porcentaje de incertidumbre en el número de módulos a tratar debido a que la efectividad del tratamiento también depende de la historia de manufactura e historia térmica de las células, el potencial económico es bastante alto y se cree que tiene gran proyección a aplicarse industrialmente en huertos solares. Además, si se sigue estudiando el tratamiento en células multi-Si este potencial crecería aún más por lo que este tema de investigación seguirá siendo tema de discusión entre los fabricantes e investigadores en los siguientes años, y se estudiará la posibilidad en todo tipo de células.
- Lo que se ha logrado probar en este trabajo es la viabilidad del tratamiento para módulos solares, en el que se ha determinado las características que debe tener el tratamiento y el coste del mismo. El coste del tratamiento es bastante bajo comparado con el beneficio económico que podría brindar, que es devolver a las células a su eficiencia original.
- Se ha propuesto un equipo para realizar el tratamiento en módulos solares mediante iluminación diseñado con las características de la experimentación realizada de los diferentes tratamientos. Aunque no se logró probar este dispositivo, sirve para dar una introducción al tema de la regeneración de módulos solares. Y se espera que la investigación continúe para abarcar los demás tipos de tecnología de módulos y células existentes en los huertos solares. El tiempo de compra y la disponibilidad de los componentes del dispositivo son las razones por las que no se logró probar el dispositivo en los tiempos establecidos.
- El prototipo diseñado tiene un coste total de 1475€ que incluye coste de componentes, manufactura y montaje de partes. Estos costes se reducirían de fabricarse equipos en mayores cantidades, es decir comercialmente, en cuyo caso se incluiría costes por ingeniería que incluye investigación, diseño, desarrollo y programación que se dividiría para la cantidad de unidades a fabricar, y beneficio equipo a obtener por cada equipo fabricado.

## Recuperación de la degradación de módulos instalados en huertos solares

- En cuanto a coste del tratamiento, al ser un equipo que consume 645W de potencia y el tratamiento dura 15 minutos el coste total del tratamiento por módulo sería de 36cts€, que es precio bastante bajo de tratamiento si garantiza que el módulo vuelva a recuperar sus características de operación iniciales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Chang, N. L., Ho-Baillie, A., Wenham, S., Woodhouse, M., Evans, R., Tjahjono, B., . . . Egan, R. J. (2018). A technoeconomic analysis method for guiding research and investment directions for c-Si photovoltaics and its application to Al-bSF, PERC LDSE and advanced hydrogenation. *The Royal Society of Chemistry*.
- Chegaar, M., Hamzaoui, A., Namoda, A., Petit, P., Aillerie, M., & Herguth, A. (2013). Effect of Illumination Intensity on Aolar Cells Parameters. *Advancements in renewable energy and clean environment: TerraGreen 13* (pp. 722-729). Beruit : REd Hook.
- Fishbeck, G. (2015). Keep a LID on it. *PV Magazine*, 44-47.
- Forster, M., al., e., Fourmond, E., Rougieux, F., Cuevas, A., & Gotoh, R. (2012). Boron-oxygen defect in Czochralski-silicon co-doped with gallium and boron. *Applied Physics Letters*.
- Funseam. (2016). *PRINCIPALES CONCLUSIONES DEL WORLD ENERGY OUTLOOK 2016*. Barcelona: Funseam.
- Hallam, B. J., Chan, C. E., Chen, R., Wang, S., Ji, J., Mai, L., & Abbott, M. D. (2017). Rapid mitigation of carrier-induced degradation in commercial silicon solar cells. *Japanese Journal of Applied Physics*.
- Hallam, B. J., Hamer, P., Wenham, S., Abbott, A., Wenham, A., Chan, C., & all, e. (2014). Advanced Bulk Defect Passivation for Silicon. *IEEE Journal Of Photovoltaics*, 88-95.
- Hallam, B., Hamer, P., Wang, S., & all, e. (2015). Advanced hydrogenation of dislocation clusters and boron-oxygen. *ScienceDirect*, 799-809.
- Hallam, B., Herguth, A., Hamer, P., Abbott, M., Wenham, S., & et al. (2017). Eliminating Light-induced degradation in Comercial p-Type Czochralski Silicon solar cells. *Applied Sciences MDPI*.
- Herguth, A., & Hahn, G. (2009). Boron-oxygen related defects in Cz-silicon solar cells degradation, regeneration and beyond. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 974 - 976.
- Herguth, A., & Hahn, G. (2013). Towards a high throughput solution for Boron-Oxygen related regeneration. *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2013)*. Paris: WIP Renewable Energies.
- Herguth, A., G. Schubert, M., Kaes, M., & Hanh, G. (2010). Kinetics of the boron-oxygen related defect in theory and experiment. *Journal of Applied Physics* 108, 114509.
- Hoffman, W. (2006). PV solar electricity industry: Market growth and perspective. *Energy Mater*, 3285-3311.
- IDAE. (2011). *Plan de Energias Renovables PER 2011-2020*. Madrid: IDAE.
- Jiang, F., Jaubert, J., Zhang, D., Yao, Z., Xiong, G., Wu, J., & Xing, G. (2018). Solutions t realizing LID-controlled multi-PERC cells and modules. *PV Tech*.

- Jiang, F., Jaubert, J.-N., Yao, Z., Guangyong Xiong, J. W., & Xing, G. (2017). Solutions to realizing LID-controlled multi-PERC cells and modules. *PV-TECH*.
- Joos, S., Herguth, A., Uwe, H., Ebser, J., & Giso, H. (2012). Light Induced Curing (LIC) of passivation layers deposited on native silicon oxide. *Energy Procedia*, 349-354.
- Joos, S., Wilking, S., Schiele, Y., Herguth, A., Hess, U., Seren, S., & Hahn, G. (2013). Hydrogen in stacked dielectric layers. *8th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Paris : EU PVSEC 2013.
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2012). Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review. *NREL National Renewable Energy Laboratory*, 32.
- Kwapil, W., Niewelt, T., & Schubert, M. (2017). Kinetics of carrier-induced degradation at elevated temperature in multicrystalline silicon solar cells. *Elsevier*.
- Lee, K., Kim, M.-S., Lim, J.-K., Ahn, J.-H., Hwang, M.-I., & Cho, E.-C. (2015). Natural recovery from LID: Regeneration under field conditions? *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU - PVSEC*, (p. 1837). Hamburg.
- Lim, B., Bothe, K., & Schmidt, J. (2010). Impact of oxygen on the permanent deactivation of boron-oxygen related, recombination centers in crystalline silicon. *Journal of Applied Physics*.
- Macdonald, F., al., e., Rougieux, A. C., Lim, J. S., M., D. S., & Geerligs, L. J. (2009). Light-induced boron-oxygen defect generation in compensated p-type Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*.
- Mathiot, D. (1989). Modeling of hydrogen diffusion in n- and p-type silicon. *Physical review B*, 5867-5870.
- Smets, A., Jager, K., Olindo, I., Van Swaaij, R., Zeman, M., & all, e. (2015). *Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. London: UIT Cambridge.
- Sopori, B., Basyant, P., Devayajanam, S., Shet, S., Mehta, V., Bins, J., & Appel, J. (2012). Understanding Light Induced Degradation of c-Si Solar Cells. *NREL National Renewable Energy Laboratory USA*, 8.
- UNEF. (2017). *El Auge Mundial de la Fotovoltaica, Informe Anual 2017*. Madrid: UNEF.
- Wenham, S. R., Hamer, P. G., Jason, H. B., & all., e. (2013). *Australia Patent No. WO 2013/173867 A1*.
- Wilking, S., al., e., Forster, M., Herguth, A., & Giso, H. (2015). From simulation to experiment: Understanding BO regeneration kinetics. *Solar Energy and Solar Cells*.
- Wilking, S., Beckh, C., Ebert, S., Herguth, A., & Hahn, G. (2014). Influence of bound hydrogen states on BO-regeneration kinetics and consequences for high-speed regeneration processes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.



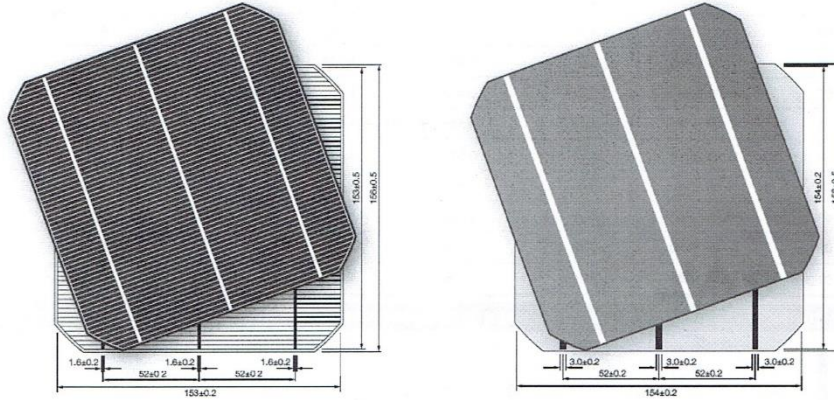
- Wiling, S., Ebert, S., Axel, H., & Giso, H. (2013). Influence of short high temperature steps on the regeneration of boron-oxygen related defects. *EU PVSEC 2013*, 34-38.
- Wiling, S., Engelhardt, J., Ebert, S., Beckh, C., Herguth, A., & Hahn, G. (2014). High speed regeneration of BO-Defects: Improving long-term solar cells performance within seconds. *29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition* (pp. 366-372). Amsterdam: Bokhoven.
- Xie, M., Ren, C., Fu, L., Qiu, X., Yu, X., & Yang, D. (2016). An industrial solution to light induced degradation of crystalline silicon solar cells. *Front. Energy*, 5.
- Zuschlag, A., Skorka, D., & Hahn, G. (2016). Degradation and Regeneration Analysis in mc-Si. *43rd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (pp. 1051-1054). Piscataway, NJ: IEEE.

# **ANEXOS**

- Hoja características Célula Solar 156S0X1 JA SOLAR

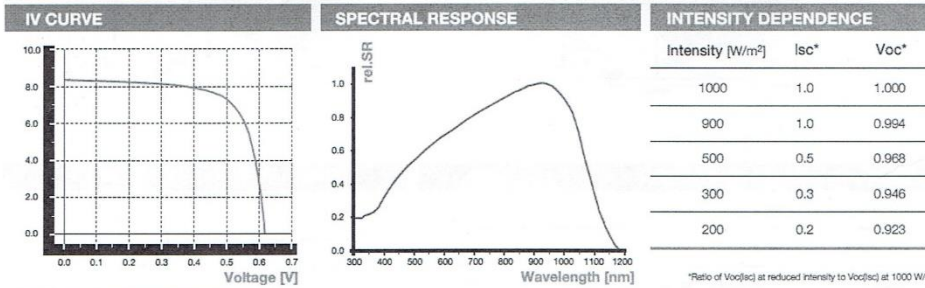
# 156S0X1

MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS



MECHANICAL DATA AND DESIGN		TEMPERATURE COEFFICIENTS	
Format	156mm×156mm±0.5mm	TkVoltage	-0.42%/K
Thickness	210µm±30µm	TkCurrent	+0.06%/K
Front(-)	1.6mm bus bars(silver), blue anti-reflecting coating(silicon nitride)	TkPower	-0.35%/K
Back(+)	3mm wide soldering pads(silver), back surface field(aluminum)		

No.	Efficiency(%)	Pmpp(W)	Umpp(V)	Impp(A)	Uoc(V)	Isc(A)	FF(%)
10	18.20-18.40	4.35	0.531	8.196	0.631	8.734	78.88
09	18.00-18.20	4.30	0.527	8.153	0.628	8.715	78.59
08	17.80-18.00	4.26	0.525	8.115	0.625	8.694	78.42
07	17.60-17.80	4.21	0.522	8.059	0.620	8.682	78.18
06	17.40-17.60	4.16	0.519	8.014	0.618	8.671	77.69
05	17.20-17.40	4.11	0.517	7.953	0.616	8.667	77.04
04	17.00-17.20	4.06	0.516	7.872	0.614	8.652	76.46
03	16.80-17.00	4.02	0.514	7.825	0.613	8.641	75.92
02	16.60-16.80	3.97	0.511	7.765	0.612	8.627	75.25
01	16.00-16.60	3.90	0.508	7.677	0.611	8.600	74.17



\*calibrated against fraunhofer ISE freiburg

JA SOLAR HOLDINGS CO., LTD.

No. 36, Jiang Chang San Road, Zhabei, Shanghai, 200436, China  
www.jasolar.com

Tel: +86 (21) 6095 5999 / 6095 5888  
Fax: +86 (21) 6095 5959 / 6095 5858

- Hoja de características LED LUXEON L1IZ-0940, luz infrarroja

## Product Selection Guide

Table 1. Product performance and optical characteristics of LUXEON IR Compact Line at 1000mA,  $T_j=25^\circ\text{C}$ .

PEAK WAVELENGTH <sup>(1)</sup>	TYPICAL FWHM BEAM ANGLE (°)	RADIOMETRIC POWER <sup>(2)</sup> (mW)		TYPICAL RADIANT INTENSITY (mW/sr)	TYPICAL SPECTRUM FWHM (nm)	PART NUMBER
		MINIMUM	TYPICAL			
850nm	150	900	1050	250	35	L1IZ-0850000000000
940nm	150	1000	1150	300	35	L1IZ-0940000000000

Notes for Table 1:

- Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.5\text{nm}$  on peak wavelength measurements.
- Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 7\%$  on radiometric power measurements.

## Electrical and Thermal Characteristics

Table 2. Electrical and thermal characteristics for LUXEON IR Compact Line at 1A,  $T_j=25^\circ\text{C}$ .

PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE <sup>(1)</sup> ( $V_f$ )			TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE <sup>(2)</sup> (mV/°C)	TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF PEAK WAVELENGTH <sup>(2)</sup> (nm/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
	MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM			
L1IZ-0850000000000	2.7	3.2	3.7	-4.6	0.26	2.8
L1IZ-0940000000000	2.3	2.9	3.4	-2.6	0.29	2.8

Notes for Table 2:

- Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 1\%$  on forward voltage measurements.
- Measured between  $25^\circ\text{C}$  and  $85^\circ\text{C}$ .

## Absolute Maximum Ratings

Table 3. Absolute maximum ratings for LUXEON IR Compact Line.

PARAMETER	MAXIMUM PERFORMANCE
DC Forward Current <sup>(1,2)</sup>	1000mA
Peak Pulsed Forward Current <sup>(1,2)</sup>	2000mA
Emitter Junction Temperature <sup>(1)</sup> (DC & Pulse)	145°C
ESD Sensitivity	Class 8 HBM per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2014
Operating Case Temperature <sup>(1)</sup>	-30° to 125°C
Emitter Storage Temperature	-40° to 125°C
SMD Process Classification Temperature	260°C per JEDEC J-STD-020E
Allowable Reflow Cycles	3
Reverse Voltage ( $V_{\text{reverse}}$ )	-10V

Notes for Table 3:

- Proper current derating must be observed to maintain the junction temperature below the maximum allowable junction temperature.
- Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," are acceptable if the following conditions are met:
  - The frequency of the ripple current is 100Hz or higher
  - The average current for each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current
  - The maximum amplitude of the ripple does not exceed the maximum peak pulsed forward current
- At 10% duty cycle with pulse width of 10ms.

- Hoja de características LDE LUXEON LXZ1-PR01, luz azul

## Electrical and Thermal Characteristics

Table 3. Electrical and thermal characteristics for LUXEON Z Color Line at 500mA and specified junction temperature.

COLOR	PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE <sup>(1)</sup> (V <sub>f</sub> )			TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE <sup>(2)</sup> (mV/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
		MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM		
Deep Red	LXZ1-PA01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Red	LXZ1-PD01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PD02	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Red-Orange	LXZ1-PH01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PH02	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Amber	LXZ1-PL01	1.75	2.15	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PL03	1.75	2.25	2.75	-2 to -4	8
PC Amber	LXZ1-PL02	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Lime	LXZ1-PX01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Green	LXZ1-PM01	2.50	3.27	3.50	-2 to -4	5
Cyan	LXZ1-PE01	2.50	3.27	3.50	-2 to -4	5
Blue	LXZ1-PB01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Royal Blue	LXZ1-PR01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5

**Notes for Table 3:**

1. Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.06V$  on forward voltage measurements.
2. Measured between 25°C and 85°C.

## Absolute Maximum Ratings

Table 4a. Absolute maximum ratings for LUXEON Z Color Line tested at T<sub>j</sub>=25°C.

PARAMETER	GREEN/CYAN/ BLUE/ROYAL BLUE	COLD-TESTED RED/DEEP-RED/ RED-ORANGE/AMBER
DC Forward Current <sup>(1,2)</sup>	1000mA	700mA
Peak Pulsed Forward Current <sup>(1,3)</sup>	1000mA	700mA
LED Junction Temperature <sup>(1)</sup> (DC & Pulse)	150°C	135°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3B	Class 3B
Operating Case Temperature <sup>(1)</sup>	-40°C to 135°C	-40°C to 120°C
LED Storage Temperature	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3	3
Autoclave Conditions	-121°C at 2 ATM	100% Relative Humidity for 96 hours Maximum
Reverse Voltage (V <sub>reverse</sub> )	LUXEON LEDs are not designed to be driven in reverse bias	

**Notes for Table 4a:**

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," with frequencies  $\geq 100Hz$  and amplitude  $\leq 15\%$  of the maximum allowable DC forward current are acceptable, assuming the average current throughout each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current at the corresponding maximum junction temperature.
3. Pulsed operation with a peak drive current equal to the stated peak pulsed forward current is acceptable if the pulse on-time is  $\leq 5ms$  per cycle and the duty cycle is  $\leq 50\%$ .

- Hoja características Transistor NPN BC546B

## BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C

### Amplifier Transistors

#### NPN Silicon

##### Features

- Pb-Free Packages are Available\*

##### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	BC546	65	Vdc
	BC547	45	
	BC548	30	
Collector - Base Voltage	BC546	80	Vdc
	BC547	50	
	BC548	30	
Emitter - Base Voltage	$V_{EB0}$	6.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	100	mA dc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625	mW
		5.0	mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5	W
		12	mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

##### THERMAL CHARACTERISTICS

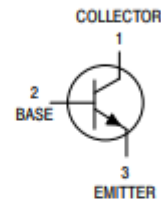
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



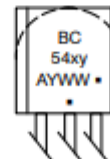
TO-92  
CASE 29  
STYLE 17



STRAIGHT LEAD

BENT LEAD  
TAPE & REEL

##### MARKING DIAGRAM



- x = 6, 7, or 8
- y = A, B or C
- A = Assembly Location
- Y = Year
- WW = Work Week
- = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

- Hoja Características MOSFET IRF



**IRF530, SiHF530**

Vishay Siliconix

**Power MOSFET**

PRODUCT SUMMARY	
V <sub>DS</sub> (V)	100
R <sub>DS(on)</sub> (Ω)	V <sub>GS</sub> = 10 V 0.16
Q <sub>g</sub> (Max.) (nC)	26
Q <sub>gs</sub> (nC)	5.5
Q <sub>gd</sub> (nC)	11
Configuration	Single

**FEATURES**

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

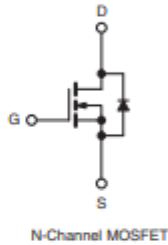
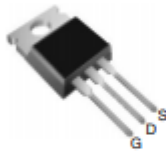


**DESCRIPTION**

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

TO-220AB



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF530PbF SiHF530-E3
SnPb	IRF530 SiHF530

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T <sub>C</sub> = 25 °C, unless otherwise noted)				
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	V <sub>DS</sub>	100	V	
Gate-Source Voltage	V <sub>GS</sub>	± 20		
Continuous Drain Current	V <sub>GS</sub> at 10 V	T <sub>C</sub> = 25 °C	14	A
		T <sub>C</sub> = 100 °C	10	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	I <sub>DM</sub>	56		
Linear Derating Factor		0.59	W/°C	
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	E <sub>AS</sub>	69	mJ	
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>	I <sub>AR</sub>	14	A	
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>	E <sub>AR</sub>	8.8	mJ	
Maximum Power Dissipation	T <sub>C</sub> = 25 °C	P <sub>D</sub>	88	W
Peak Diode Recovery dV/dt <sup>c</sup>		dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>		- 55 to + 175	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	
			1.1	