



**Universidad de Valladolid**

**Escuela de Ingeniería Forestal,  
Agronómica y de la Bioenergía**

**Campus de Soria**

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Sistema automatizado de iluminación,  
medición y control para el análisis de fallos y  
diagnóstico de células y paneles solares  
fotovoltaicos**

**Autor:** Bhisma Hernández Martínez

**Departamento:** Ingeniería Agrícola y Forestal

**Director:** Luís Hernández Callejo

**Codirector:** Víctor Alonso Gómez

**SORIA, OCTUBRE DE 2019**

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

***AUTORIZACIÓN del DIRECTOR  
del TRABAJO FIN DE MÁSTER***

D.LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO

Profesor del departamento: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL.

Como Director del TFM titulado: **“Sistema automatizado de iluminación, medición y control para el análisis de fallos y diagnóstico de células y paneles solares fotovoltaicos”**

Presentado por el estudiante D. BHISHMA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Da el Vº. Bº. y autoriza la presentación del mismo, considerando que cumple las condiciones exigibles para su presentación y defensa ante un tribunal, y que el estudiante ha adquirido sobradamente las competencias requeridas para acreditar el nivel académico de máster.

Soria, 14 de Octubre de 2019

El Tutor del TFM,

Fdo.: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

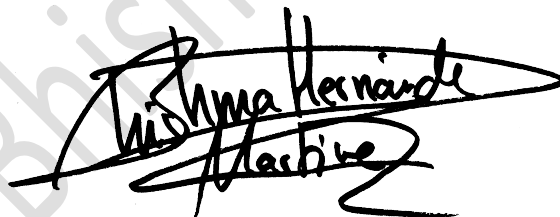
## ***DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD***

D. Bhishma Hernández Martínez, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el trabajo fin de máster que presento para su exposición y defensa es el titulado “*Sistema automatizado de iluminación, medición y control para el análisis de fallos y diagnóstico de células y paneles solares fotovoltaicos.*”

**Declara la autoría y asume la originalidad de este trabajo y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.**

Soria, 14 de Octubre de 2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Bhishma Hernández Martínez', written over a large, faint watermark that also reads 'Bhishma Hernández Martínez'.

Fdo.: BHISHMA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

## Resumen

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia [1].

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir [1].

España, por su privilegiada situación y climatología, se ve particularmente favorecida respecto al resto de los países de Europa, ya que sobre cada metro cuadrado de su suelo inciden al año unos 1.500 kWh, cifra similar a la de muchas regiones de América Central y del Sur [1].

El Gobierno Español, en 2004, mediante Real Decreto 436/2004, promovió el uso de la energía solar fotovoltaica estableciendo una tarifa del 575% sobre la Tarifa Media de Referencia, garantizada durante 25 años. El Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER) aprobado en Agosto de 2005 en Consejo de Ministros tiene el objetivo de cubrir, con energías renovables, el 12% del consumo energético nacional en 2010. Dicho Plan establece un objetivo de llegar a 400 MW instalados en energía solar fotovoltaica [1].

Tras años con variaciones en las estrategias sobre las políticas energéticas, que algunas frenaron el crecimiento exponencial de la potencia instalada, recientemente ha comenzado un nuevo impulso gracias a la aplicación del Real Decreto 244/2019. En el año 2017 se alcanzaron los 4804 MW instalados. Con las nuevas políticas sobre energías renovables, se prevé un nuevo horizonte dorado para las energías renovables y entre ellas, la solar fotovoltaica.

Es importante mejorar los sistemas de generación de energía para poder maximizar eficiencias. Los solares fotovoltaicos también tienen mucho recorrido por realizar para aprovechar un mayor porcentaje de la energía proveniente del sol, así como entender todas las potenciales posibilidades de mejora.

Como objetivo principal, se plantea la realización y puesta en marcha de dos instrumentos que satisfagan las necesidades en investigación relacionadas con la energía solar fotovoltaica y facilitar al grupo investigador la recogida y análisis de los datos provenientes de los nuevos experimentos que de esta manera se podrán realizar.

Este Trabajo Fin de Master (TFM) versará sobre la creación de dos instrumentos que facilitarán los procesos de sistematización, medición y análisis para las investigaciones sobre sistemas solares fotovoltaicos. Con la creación propuesta, se podrán sobrepasar las limitaciones actualmente existentes y poder realizar las investigaciones de una manera más repetible y por tanto rigurosa.

Por una parte, se presentará un sistema de iluminación de bajo coste que permitirá generar una iluminación que será usada en los sistemas solares fotovoltaicos como excitación controlada y repetible. Se facilitará el control de las condiciones de los experimentos y se podrá avanzar más rápido al no estar ceñidos a los ciclos solares y condiciones atmosféricas que se escapan al control humano. Gracias a generar un sistema de iluminación controlado, se podrán configurar condiciones de iluminación repetibles y así se facilitará el poder comparar experimentos entre sí. El desarrollo de dicho sistema de iluminación facilitará el poder realizar experimentos durante las 24 horas del día sin necesidad de parar o restringirse a condiciones meteorológicas cambiantes.

La otra parte corresponde con un instrumento de medida que sea flexible para poder ser utilizado con los diferentes sistemas solares fotovoltaicos que nos podemos encontrar en una instalación solar fotovoltaica. La funcionalidad que se ha propuesto, no existen en ningún instrumento comercial. La creación de un instrumento flexible habilita la posibilidad de realizar mediciones desde una única célula solar fotovoltaica, hasta un módulo solar fotovoltaico completo. Además, el instrumento permite la automatización a su vez de otros experimentos como la termografía y la electroluminiscencia, gracias al diseño especial que así lo prevé. El tener un diseño a medida con un completo control sobre el mismo, da una gran flexibilidad al investigador y permite realizar un mayor número de experimentos. El poder configurar una algorítmica determinada, poder modificarla y evolucionarla de acuerdo con las necesidades en cada momento facilitará a los investigadores el poder generar unas mediciones de mayor calidad.

La complejidad de dicho instrumento se verá simplificada gracias al desarrollo de un programa informático. Éste servirá de interfaz de usuario, controlará los dispositivos y permite al usuario poder manejarlos de una forma fácil e intuitiva.

Los objetivos se podrían resumir de la siguiente manera:

- Instrumento de iluminación constante y de bajo coste.
- Instrumento de medida polivalente para ser usado con diferentes dispositivos solares fotovoltaicos.
- Interfaz de usuario que facilite la interacción con el instrumento de medida.
- Demostración de que el diseño propuesto es viable con la fabricación de un prototipo.



## Revisiones

Rev.	Breve descripción	Ingeniero	Comprobado por	Fecha
Rev.0	Redacción	Bhishma Hernández		1/6/2019
Rev.1	Revisión general y aspectos formales del documento	Bhishma Hernández	Luis Hernández Callejo	1/8/2019
Rev.2	Revisión general y aspectos formales del documento	Bhishma Hernández	Víctor Alonso Gómez	14/8/2019
Rev.3	Revisión general y aspectos formales del documento	Bhishma Hernández		1/10/2019

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

# Índice

<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>REVISIONES</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>15</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>17</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
1.1. FUNDAMENTOS.....	19
1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.....	21
1.3. PROYECTOS.....	23
1.4. NECESIDADES Y ENUNCIADO DEL PROBLEMA.....	24
1.5. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	25
<b>2. IRIS</b> .....	<b>31</b>
2.1. FUNCIONALIDAD.....	31
2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	32
2.3. ESCALABILIDAD.....	33
2.4. LAYOUT Y ESQUEMAS.....	34
2.5. PROCESO DE MONTADO.....	34
<b>3. NUMANTIA</b> .....	<b>39</b>
3.1. FUNCIONALIDAD.....	39
3.2. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	39
3.3. ESCALABILIDAD.....	41
3.4. PROCESO DE MONTADO.....	42
3.5. PROGRAMA DE CONTROL BACKEND.....	44
3.6. PROGRAMA DE CONTROL FRONTEND.....	44
3.7. LAYOUT Y ESQUEMAS.....	45
<b>4. MEJORAS PROPUESTAS</b> .....	<b>47</b>
4.1. MONTADO.....	47
4.2. DISEÑO.....	47
<b>5. PRIMERAS MEDICIONES</b> .....	<b>49</b>
5.1. PRIMERAS MEDICIONES IRIS.....	49
5.2. PRIMERAS MEDICIONES NUMANTIA.....	52
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>53</b>
<b>7. ANEXOS</b> .....	<b>55</b>
7.1. ANEXO I: ESQUEMÁTICOS DE IRIS.....	57
7.2. ANEXO II: LAYOUT DE IRIS.....	59
7.3. ANEXO III: BILL OF MATERIALS IRIS.....	62
7.4. ANEXO IV: ESQUEMÁTICOS DE NUMANTIA.....	63
7.5. ANEXO V: LAYOUT DE NUMANTIA.....	70

7.6.	ANEXO VI: BILL OF MATERIALS NUMANTIA. ....	72
7.7.	ANEXO VII: BACKEND MICROCONTROLADOR NUMANTIA. ....	73
7.8.	ANEXO VIII: BACKEND PROGRAMA DE USUARIO NUMANTIA. ....	82
7.9.	ANEXO IX: FICHEROS QUE GENERA EL INTERFAZ DE USUARIO PARA SER ARCHIVADOS. ....	87
7.10.	ANEXO X: CUESTIONES LÍNEA DE PRODUCCIÓN. ....	88
7.11.	ANEXO XI: FACTURAS. ....	93
7.12.	ANEXO XII: PRESUPUESTOS. OTRAS OFERTAS. ....	96
7.13.	ANEXO XIII: PUBLICACIONES QUE HAN VENIDO PROPICIADAS A PARTIR DE ESTE TFM. ....	99
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>121</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1 – CURVA IV TÍPICA CÉLULA/PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO .....	20
FIGURA 2 – CIRCUITO EQUIVALENTE CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	21
FIGURA 3 – TRIÁNGULO BÁSICO DE UN PROYECTO .....	23
FIGURA 4 – SOLUCIÓN DESARROLLADA A MEDIDA.....	26
FIGURA 5 – PASOS QUE HABRÁ QUE DAR PARA DESARROLLAR DEL TFM.....	29
FIGURA 6 – FORMA PCB DE CONTROL .....	32
FIGURA 7 – FORMA PCB SEPARADOR .....	32
FIGURA 8 – FORMA PCB ILUMINACIÓN .....	32
FIGURA 9 – DIAGRAMA DE BLOQUES IRIS.....	32
FIGURA 10 – CONECTORES IRIS QUE ASEGURAN EL POKAYOKE.....	33
FIGURA 11 – PCB QUE SE RECIBIERON .....	35
FIGURA 12 – FOTOGRAFÍA DEL LED DE POTENCIA SFH 4715S.....	35
FIGURA 13 – COLOCACIÓN DE LOS LED SFH 4715S UNA VEZ APLICADA LA PASTA DE SOLDADURA .....	36
FIGURA 14 – LED D36 MAL SOLDADO.....	37
FIGURA 15 – PROTOTIPO IRIS PUESTO EN MARCHA.....	37
FIGURA 16 – MONTAJE FINAL DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN IRIS.....	38
FIGURA 17 – ARDUINO M0 .....	40
FIGURA 18 – NUMANTIA PCA.....	40
FIGURA 19 – DIAGRAMA DE BLOQUES NUMANTIA PCA .....	41
FIGURA 20 – COMPONENTES NECESARIOS PARA EL MONTAJE.....	42
FIGURA 21 – TAMAÑO 0603 DE LA MAYORÍA DE COMPONENTES .....	42
FIGURA 22 – COMPROBACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LOS INDICADORES LUMINOSOS RECIÉN SOLDADO .....	43
FIGURA 23 – DETALLE DE DIFERENTES COMPONENTES ACTIVOS USADOS EN NUMANTIA.....	43
FIGURA 24 – INTERFAZ DE USUARIO PARA CONTROLAR EL INSTRUMENTO DE MEDIDA NUMANTIA .....	45
FIGURA 25 – CORRIENTE ISC PRODUCIDA POR LA CÉLULA FV CUANDO LA ILUMINAMOS CON IRIS.....	50
FIGURA 26 – IRRADIANCIA MEDIDA A CM DE LA IRIS .....	50
FIGURA 27 – IRRADIANCIA Y CORRIENTE ISC MEDIDA BAJO EL SOL EN CONDICIONES REALES.....	51
FIGURA 28 – IMAGEN BACKEND FIRMWARE NUMANTIA .....	52
FIGURA 29 – ESQUEMÁTICO 1/2 IRIS .....	57
FIGURA 30 – ESQUEMÁTICOS 2/2 IRIS.....	58
FIGURA 31 – TOP LAYER IRIS.....	59
FIGURA 32 – LAYER 2 IRIS .....	59
FIGURA 33 – LAYER 3 IRIS .....	60
FIGURA 34 – BOTTOM LAYER IRIS .....	60
FIGURA 35 – LAYER ÚNICA LEDS .....	61
FIGURA 36 – LAYER ÚNICA SEPARADOR .....	61
FIGURA 37 – ESQUEMÁTICO 1/7 NUMANTIA.....	63
FIGURA 38 – ESQUEMÁTICO 2/7 NUMANTIA.....	64
FIGURA 39 – ESQUEMÁTICO 3/7 NUMANTIA.....	65
FIGURA 40 – ESQUEMÁTICO 4/7 NUMANTIA.....	66
FIGURA 41 – ESQUEMÁTICO 5/7 NUMANTIA.....	67
FIGURA 42 – ESQUEMÁTICO 6/7 NUMANTIA.....	68
FIGURA 43 – ESQUEMÁTICO 7/7 NUMANTIA.....	69
FIGURA 44 – TOP LAYER NUMANTIA .....	70
FIGURA 45 – LAYER 2 NUMANTIA.....	70
FIGURA 46 – LAYER 3 NUMANTIA.....	71

FIGURA 47 – BOTTOM LAYER NUMANTIA .....	71
FIGURA 48 – BACKEND PROGRAMA PRINCIPAL INTERFAZ DE USUARIO, INICIALIZACIÓN .....	82
FIGURA 49 – BACKEND PROGRAMA PRINCIPAL INTERFAZ DE USUARIO, CONTROL Y VISUALIZACIÓN .....	83
FIGURA 50 – BACKEND PROGRAMA PRINCIPAL INTERFAZ DE USUARIO, MÓDULO GESTOR DE LAS COMUNICACIONES .....	84
FIGURA 51 – BACKEND PROGRAMA PRINCIPAL INTERFAZ DE USUARIO, MÓDULO INTÉRPRETE Y ACONDICIONADOR DE DATOS .....	85
FIGURA 52 – BACKEND PROGRAMA PRINCIPAL INTERFAZ DE USUARIO, MÓDULO GESTOR DEL ALMACENADO DE LAS MEDICIONES .....	86
FIGURA 53 – NOMBRE DE FICHERO GENERADO QUE ALMACENA TODAS LAS MEDICIONES .....	87
FIGURA 54 – POSTERIOR VISUALIZACIÓN DE LAS MEDICIONES ALMACENADAS POR EL INTERFAZ DE USUARIO .....	87
FIGURA 55 – OTRAS OFERTAS RECIBIDAS. TERLEC 1/3 .....	96
FIGURA 56 – OTRAS OFERTAS RECIBIDAS. TERLEC 2/3 .....	97
FIGURA 57 – OTRAS OFERTAS RECIBIDAS. TERLEC 3/3 .....	98

## Lista de Tablas

TABLA 1 – COSTE TEMPORAL ESTIMADO DE LA SOLUCIÓN BASADA EN UN DESARROLLO A MEDIDA .....	27
TABLA 2 – COSTE ECONÓMICO ESTIMADO DE LA SOLUCIÓN BASADA EN UN DESARROLLO A MEDIDA .....	30
TABLA 3 – RESUMEN DE LOS PRIMEROS VALORES OBTENIDOS CON LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL .....	49
TABLA 4 – LISTA DE COMPONENTES DE IRIS .....	62
TABLA 5 – LISTA DE COMPONENTES DE NUMANTIA.....	72
TABLA 6 – TABLA DE MEDICIONES ALMACENADA POR EL INTERFAZ DE USUARIO DE NUMANTIA.....	87

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández



## Acrónimos

<b>TFM</b>	Trabajo Fin de Máster
<b>UVa</b>	Universidad de Valladolid
<b>EIFAB</b>	Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la Bioenergía
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design, Diseño asistido por computadora
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>Isc</b>	Corriente de cortocircuito.
<b>Voc</b>	Voltaje en circuito abierto.
<b>Pmax</b>	Potencia máxima.
<b>IV</b>	Valores de corriente y de tensión referenciados a los ejes Y, X respectivamente, cuando X representa los valores de tensión e Y los valores de corriente.

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Fundamentos

### Funcionamiento

El término fotovoltaico viene del griego *φῶς* (luz) y del nombre del físico italiano *Volta*, de donde proviene también voltio y voltaje. Literalmente significa luz y electricidad [4, 6].

El efecto fotovoltaico fue atribuido por primera vez, en 1839, al físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, sin embargo, no fue hasta 1883 cuando Charles Fritts construyó la primera célula fotovoltaica, recubriendo un semiconductor de selenio por una fina capa de oro, formando las primeras uniones p-n. Este pequeño dispositivo sólo tenía una eficiencia del 1%. Luego Einstein explicó el efecto fotoeléctrico y tuvo el Nobel por ello. Einstein explicó las características del efecto fotoeléctrico, suponiendo que cada electrón absorbía un cuanto de radiación o fotón. La energía de un fotón se obtiene multiplicando la constante  $h$  de Planck por la frecuencia  $f$  de la radiación electromagnética. Russell Ohl patentó la moderna célula solar en 1946. [4,6]

El objetivo básico de una célula fotovoltaica es aprovechar la energía que proviene del sol en forma de radiación electromagnética, la cual posee unas longitudes de onda oscilan entre 0,2 y  $3\mu\text{m}$  [1-, 6,7], y convertirlo lo más eficientemente posible en corriente eléctrica. Éste efecto que se produce en los materiales semiconductores se conoce con el nombre de *fotovoltaico* y consiste en la transformación directa de radiación electromagnética en corriente eléctrica [3, 4].

La energía que proporcionen los fotones al chocar con los electrones de la banda de valencia, será aprovechada para que éstos promocionen a la banda de conducción, siempre y cuando la energía cedida supere a la de la banda prohibida generándose así un par electrón-hueco [3, 4, 6].

La conversión de la luz en corriente eléctrica va a depender de muchas variables tales como son la posición del sol, los materiales del semiconductor, los ángulos de incidencia de la luz, el valor de la irradiación que recibe, de la temperatura, etc. [2, 4].

Uno de los factores más interesantes a tener en cuenta es que la energía producida por una célula solar va a ser proporcional a la intensidad luminosa que reciba del sol [2, 5]. Más adelante se concretarán las ventajas directas que esto conlleva y cómo se han aprovechado.

## Parámetros básicos de una célula fotovoltaica

Los parámetros básicos que se pueden encontrar en una célula fotovoltaica son los siguientes:

$$P_{\text{máx}} = V_{\text{máx}} \times I_{\text{máx}} \quad (1)$$

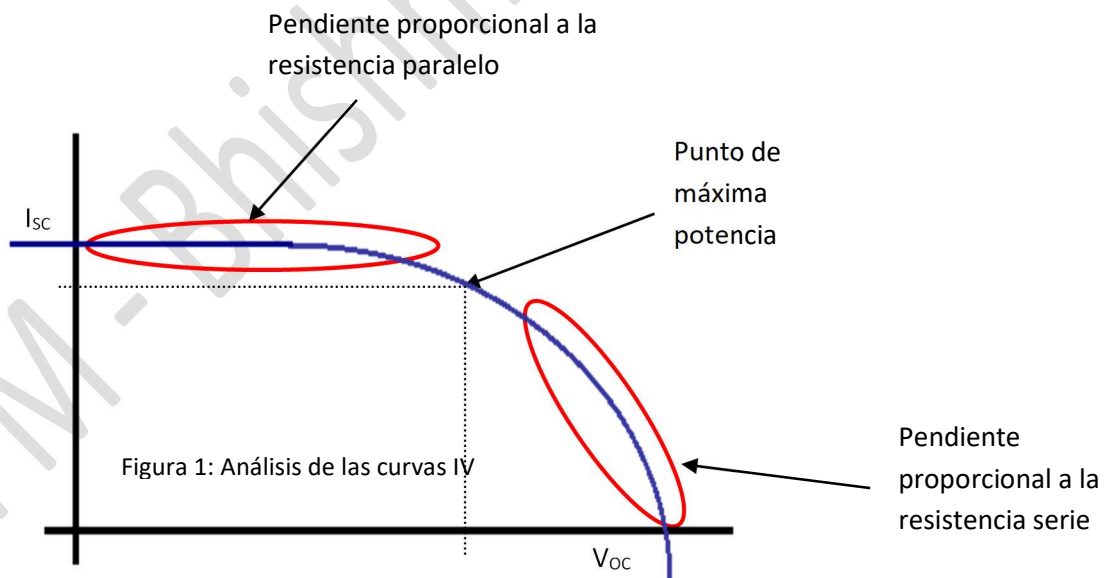
- Punto de Máxima Potencia: (1) Es el valor máximo del producto de tensión e intensidad para que la potencia entregada sea máxima. [2, 3, 5]

$$FF = \frac{V \cdot I|_{\text{máx}}}{V|_{\text{máx}} \cdot I|_{\text{máx}}} = FF = \frac{V \cdot I|_{\text{máx}}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2)$$

- Factor de Forma (Fill Factor): (2) El Factor de Forma o Factor de Relleno (FF), expresa la razón entre el punto de máxima potencia y el producto entre el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito: [2, 3, 4,5]

$$\eta = \frac{P_{\text{máx}}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{inc}} \quad (3)$$

- Factor de Eficiencia: (3) Es la relación ( $\eta$ ) existente entre la máxima potencia producida por la célula fotovoltaica ( $P_{\text{máx}}$ ) y la potencia que incide en ella ( $P_{inc}$ ): [3, 4, 5]

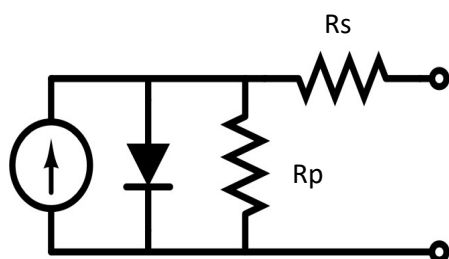


**Figura 1 – Curva IV típica célula/panel solar fotovoltaico**

$I_{sc}$  : Corriente de cortocircuito [2, 3, 4]

$V_{oc}$  : Tensión en circuito abierto [2, 3, 4]

Circuito equivalente de la célula solar [4,5]



$R_s$  : Resistencia serie de la célula  
 $R_p$  : Resistencia paralelo de la célula

**Figura 2 – Circuito equivalente célula solar fotovoltaica**

## 1.2. Motivación del trabajo

Los sistemas solares fotovoltaicos cada vez son más robustos, aunque todavía queda un largo camino por recorrer para terminar de entender y mejorar los fallos que aún se producen. La variedad de sistemas solares fotovoltaicos que nos podemos encontrar y por tanto los instrumentos de medida necesarios, hace que el proceso de investigación sea complicado, necesite muchos recursos y que resulte a veces frustrante por las condiciones de medida cambiantes.

En este sentido, el desarrollo del actual Trabajo Fin de Máster (TFM), va encaminado a superar dichas limitaciones con el fin de poder avanzar mucho más rápido en los estudios y de una manera más consistente. Para ello se ha utilizado una doble estrategia:

- 1- El desarrollo de un sistema de iluminación de bajo coste y escalable.

El poder controlar la iluminación, permitirá poder controlar completamente las condiciones en las que se realizan las medidas y de esta forma propiciar un entorno de investigación controlado y repetible en características.

La lámpara de bajo coste que se ha desarrollado, se ha centrado en una longitud de onda adecuada para que la célula solar fotovoltaica pueda transformarla en electricidad. Además, las dimensiones geométricas elegidas para el diseño coinciden con el tamaño mínimo que posee una célula solar fotovoltaica de 15cm x 15cm.

Se ha desarrollado de tal manera que, asegura una correcta estabilidad térmica gracias a la radiación térmica de la propia placa de aluminio dónde va montada y a un sistema de convección de aire forzado. También permite que se escale su tamaño fácilmente colocando unas lámparas junto a las otras. El diseño realizado se puede conectar consigo mismo gracias a unos conectores laterales que así lo permiten. Además, es un diseño Pokayoke, asegura por geometría una correcto conexionado. Con esta estrategia se evitará la posibilidad de cortocircuitos o mal funcionamiento, debido a un ensamblado incorrecto (por fallo humano) y facilita crear sistemas de iluminación de la potencia luminica que se desee.

Pokayoke, es un término japonés que significa: Poka: “*error no intencionado, equivocación...*” y Yoke: “*evitar*”, es decir, “*evitar equivocaciones*”. Shingeo Shingo desencantado ante la imposibilidad de alcanzar “0” defectos al final del proceso, ideó este método basado en la realización de trabajos “a prueba de errores”.

El sistema de iluminación tiene la posibilidad de encenderse y apagarse remotamente, así como de regular la intensidad luminica para poder crear fenómenos de iluminación cambiante sobre los paneles, como lo puede ser el paso de una nube.

La elección del LED usado para la iluminación, se hizo con especial cuidado para poder instalar con una misma huella de componente varios tipos de LED distintos con longitudes de onda diferentes. Esto da una flexibilidad en la longitud de onda que se quiera utilizar para iluminar, poder crear combinaciones y poder tener diferentes longitudes de onda para generar la irradiancia que escita a los sistemas solares fotovoltaicos.

## 2- El desarrollo de un sistema de medición de curvas IV

Para entender los sistemas solares fotovoltaicos y sus modos de fallos, hay que realizar mediciones de los mismos. Se tendrá que poder medir un sistema de varios amperios y varios voltios, hasta sistemas de muy pocos voltios y varios amperios. Concretamente, en un panel solar fotovoltaico, tendremos que caracterizar el propio funcionamiento del panel, pero también el funcionamiento de cada uno de los strings que lo componen y cada una de las células que componen esos strings.

Esta disparidad entre señales a medir hace que no exista en el mercado ningún instrumento que sea capaz de gestionar las mediciones en campo o laboratorio de todos los elementos fotovoltaicos a la vez.

El instrumento que se ha desarrollado, ha sido pensado para permitir realizar mediciones, tanto de sistemas fotovoltaicos grandes como lo puede ser un módulo, hasta sistemas pequeños como lo puede ser una sola célula solar fotovoltaica.

Para poder maximizar la precisión de las medidas, se han previsto dos entradas. Una de ellas medirá tensiones de 60V y corrientes de 10A, la otra, medirá tensiones de hasta 1V y corrientes de 10A. El diseño del segundo caso, es especialmente crítico debido a que ha sido necesario asegurar una resistencia máxima en todo el camino de medición de 5mohms.

El sistema posee un interruptor para poder desconectar remotamente el medidor de la unidad a medir, si fuera necesario. Es el caso de que se quieran realizar experimentos de fotoluminiscencia. Para realizar un experimento de fotoluminiscencia, se debe someter al sistema solar fotovoltaico a una tensión inversa que quemaría el instrumento de medida diseñado. Gracias al interruptor, podremos introducir la rutina de desconexión dentro del propio programa de test que se realice. Nos permite automatizar el test, que no sea necesario realizar manipulaciones entre tests, evitar la intervención humana durante todo el proceso de medida y test y así, evitar potenciales errores en los procedimientos de testado.

El sistema desarrollado se ha pensado para ser compatible con la plataforma de desarrollo de Arduino, que es hardware y software libre. Gracias a Arduino, se agiliza el desarrollo. A través de Arduino gestionamos las comunicaciones entre el instrumento de medida y el interfaz de usuario y su control.

Puede ser necesario realizar mediciones que requieran una gran precisión, para ello se ha facilitado la posibilidad de realizar mediciones a 4 puntas. También mide varias temperaturas: la ambiente y la de dos puntos diferentes por medio de dos sondas.

Todo el instrumento se puede controlar cómodamente desde un interfaz de usuario que se ha desarrollado también como parte de éste Trabajo Fin de Máster para facilitar el manejo del mismo. El poder manejar toda la instrumentación de una manera sencilla e intuitiva facilita los procesos de testing.

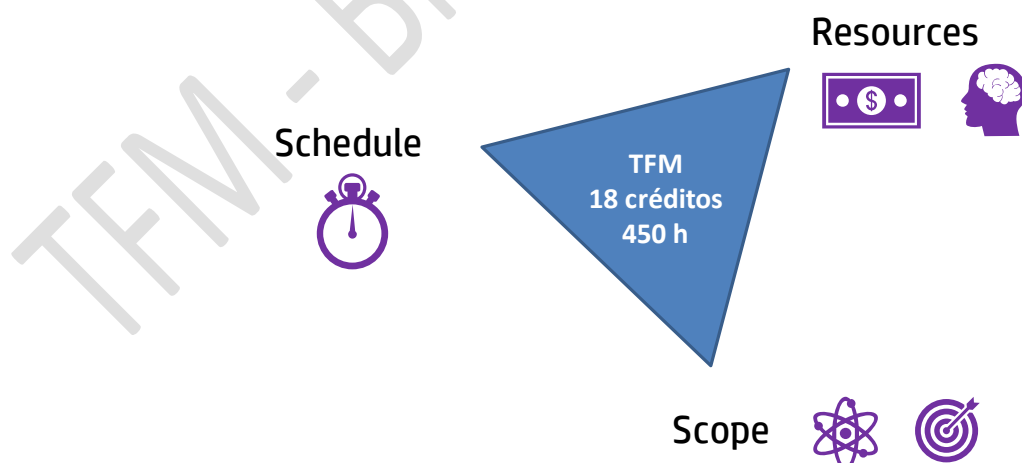
Con la puesta en marcha de ambos sistemas, se van a poder agilizar y obtener más precisión y más cantidad de información de los sistemas solares fotovoltaicos que se quieren investigar. El agilizar las tareas y permitir un entorno controlado y constante de test, facilita los procesos de análisis y obtención de conclusiones.

### 1.3. Proyectos

El trabajo fin de máster corresponde con un desarrollo que se englobe en la última parte de los estudios. En éste caso, corresponde con un desarrollo innovador y alineado con las investigaciones que se están realizando en el departamento del Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal de la Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la Bioenergía (EIFAB) de una Universidad de Valladolid (UVa).

Antes de comenzar con los desarrollos, se puso de manifiesto los principios elementales en el desarrollo de proyectos. En la Figura 3, podemos ver lo que se conoce cómo el triángulo básico en un proyecto. Hay tres esquinas diferentes que están convenientemente balanceadas. [8]

- Schedule, o calendario. Corresponderá con el tiempo de desarrollo que se prevé que tendrá un proyecto.
- Resources, o recursos. Corresponde con los medios de que se dispone: personas, instrumentación, capital.
- Scope. Corresponde con el objetivo que se busca en la realización de un proyecto.



**Figura 3 – Triángulo básico de un proyecto**

Los tres están íntimamente relacionados. Por ejemplo, si se quiere reducir el tiempo de ejecución, o bien se debe reducir el número de objetivos o aumentar el número de recursos. Cuantas más personas tengamos desarrollando un proyecto menos tardará en finalizarse, pero más nos costará.

En el caso de éste Trabajo Fin de Máster, el desarrollo será íntegramente realizado por mí. Los costes económicos son muy limitados y debería ser la Universidad la que corriera cargo de ellos. Por último, el Schedule se debe ajustar lo mejor posible al número de créditos asignados, en éste caso 450 horas.

#### 1.4. Necesidades y enunciado del problema

La medida de paneles solares fotovoltaicos en condiciones reales de medición, trae inherente al propio proceso de medición, variables que será complicado controlar y mantener constantes a lo largo de todo el proceso de medición.

La fuente principal necesaria para realizar las medidas será el sol. La variación de la luminosidad que nos llega en un día u otro es grande y va directamente ligada a la meteorología: nubes, humedad ambiental, etc. El tener unas condiciones de iluminación cambiantes hace que sea complejo comparar las mediciones de diferentes días.

Uno de los primeros objetivos es, por tanto, la creación de un sistema que ayude a crear unas condiciones de iluminación controladas y que sean repetibles a lo largo del tiempo. De esta manera se podrán comparar mediciones entre sí y poder ver claramente potenciales evoluciones en las medidas.

También es importante el instrumento de medida que se utilice para realizar los experimentos. Las necesidades de medición para un panel solar fotovoltaico son muy diferentes a las necesarias para una célula solar fotovoltaica. No existe un instrumento que dé solución a ambas necesidades, y que lo haga a un coste razonable.

Otro aspecto a tener en cuenta será que, se debe facilitar de una forma sencilla la inclusión de otros dispositivos que potencialmente pueden ser necesarios gestionar en el futuro. La solución elegida, no solo deberá entonces cubrir las necesidades, sino que, también tendrá que ser lo suficientemente flexible para que se pueda modificar y escalar en funcionalidad.

De aquí surgió la segunda necesidad que se cubrirá en el desarrollo de éste Trabajo Fin de Máster. Será necesario facilitar al grupo de investigación una solución que cubra las necesidades de medición que se tienen, con el fin de poder agilizar las investigaciones que actualmente se están llevando a cabo.

Durante las siguientes páginas se procederá a explicar con más detalle las potenciales alternativas que se barajaron, así como las decisiones tomadas. También se hará un análisis a alto nivel de las soluciones llevadas a cabo, así como de la información creada y disponible.

Partimos por tanto de 3 requerimientos básicos:

- Cubrir necesidades de iluminación.
- Cubrir necesidades de medida.
- Flexibilidad para potenciales futuras ampliaciones de funcionalidad.



Además, se deberá asegurar un correcto funcionamiento después del montado manual de los componentes. Dicho requerimiento viene por motivos económicos. También deberá tener un interfaz con el usuario sencillo e intuitivo.

### 1.5. Solución propuesta

Debido a las restricciones económicas que se plantearon desde el principio, se tuvo que optar por la solución que mayor riesgo representaba, pero menor coste. El elevado riesgo viene debido al gran número de desarrollos originales que se van a tener que realizar para poder cumplir con todas las necesidades planteadas.

Es una solución basada en un desarrollo a medida. Podemos ver la propuesta de solución realizada en la Figura 4. Es necesario crear un programa de gestión de los instrumentos y el correspondiente almacenado de los datos tomados. Además, habría que crear un instrumento de iluminación, un instrumento de medida, una programación a bajo nivel para poder implementar la funcionalidad necesaria y, una programación a alto nivel para simplificar la interacción del usuario con el sistema.

Como ventaja se tiene que, el coste en materiales es reducido y se tendrá una solución a medida.

La complejidad radicaría en:

- Diseñar el equipo de iluminación.
- Encontrar los componentes adecuados del equipo de iluminación.
- Diseñar la placa dónde irán montados los componentes del equipo de iluminación.
- Desarrollar una metodología para escalar fácilmente el sistema de iluminación.
- Montar a mano cada uno de los componentes del equipo de iluminación.
- Diseñar el equipo de medida.
- Encontrar los componentes adecuados del equipo de medida.
- Diseñar la placa dónde irán montados los componentes del equipo de medida.
- Montar a mano cada uno de los componentes del equipo de medida.
- Desarrollar la programación a bajo nivel del equipo de medida.
- Desarrollar la programación del interfaz de usuario del equipo de medida.
- Asegurarse de validar los diseños, ver que funcionen y poner en marcha el sistema de medición.

El desarrollo de una solución a medida presenta varias incertidumbres, entre ellas, un potencial error en el diseño que haga que no sea usable. También la fiabilidad, al ser un prototipo montado completamente a mano, será menor que en el caso de un sistema estándar. La previsión de tiempo que llevará poner todo el sistema, es muchísimo mayor que en el caso anterior.



la placa de electrónica. Cuando se refiera a alto nivel, corresponderá con la programación que vaya encaminada a realizar una interfaz intuitiva y que sea el que interaccione con el usuario. Dicha interfaz funcionará en un ordenador con sistema operativo y tendrá un entorno gráfico.

Todo lo anterior corresponderá con lo que entendemos como puramente desarrollo. El desarrollador se tendrá que enfrentar a diferentes folios en blanco que tendrá que ir rellenando y completando adecuadamente, con creatividad, para conseguir los objetivos marcados.

En la Tabla 1 se encuentra un resumen de las estimaciones temporales que serían necesarias para realizar. La dificultad que conlleva realizar dos diseños y ponerlos en marcha hace que, esta propuesta resulte más compleja que la anterior. Al tenerse que realizar dos diseños especiales, también el nivel de riesgo es un factor que habrá que tener en cuenta. Existe la posibilidad de que en alguna parte del diseño se pueda encontrar alguna errata que haga que no funcione correctamente.

	Necesidades	Tareas	tiempo
Trazador IV	Instrumento	Puesta en marcha del SW EE	15h
		Diseño	60h
Búsqueda componentes		25h	
Fabricación		20h	
Programación		30h	
Start up		50h	
Setup		60h	
	Control	Puesta en marcha del SW LV	5h
		Configuración	10h
Toma de datos		20h	
Gestión de datos		30h	
Sol artificial	Instrumento	Diseño	60 h
		Búsqueda componentes	25 h
Fabricación		20 h	
Programación		5 h	
Start up		25 h	
Setup		25 h	
	Control	Configuración	5 h
		Toma de datos	
Gestión de datos			
Instrumentación	Control (Por dispositivo)	Configuración	15 h
		Toma de datos	15 h
		Gestión de datos	15 h
<b>TOTAL: 535h (67 días)</b>			

**Tabla 1 – Coste temporal estimado de la solución basada en un desarrollo a medida**

Se deberá tener en cuenta además del tiempo del propio proceso de desarrollo, el tiempo necesario para realizar un montaje y soldado manual de los componentes.

Otro factor a tener en cuenta en ambas propuestas, será el tiempo que es necesario para la redacción del propio Trabajo Fin de Máster.

Las necesidades a cubrir, constan de dos partes:

- El desarrollo de un sistema de iluminación que llamaremos Iris.

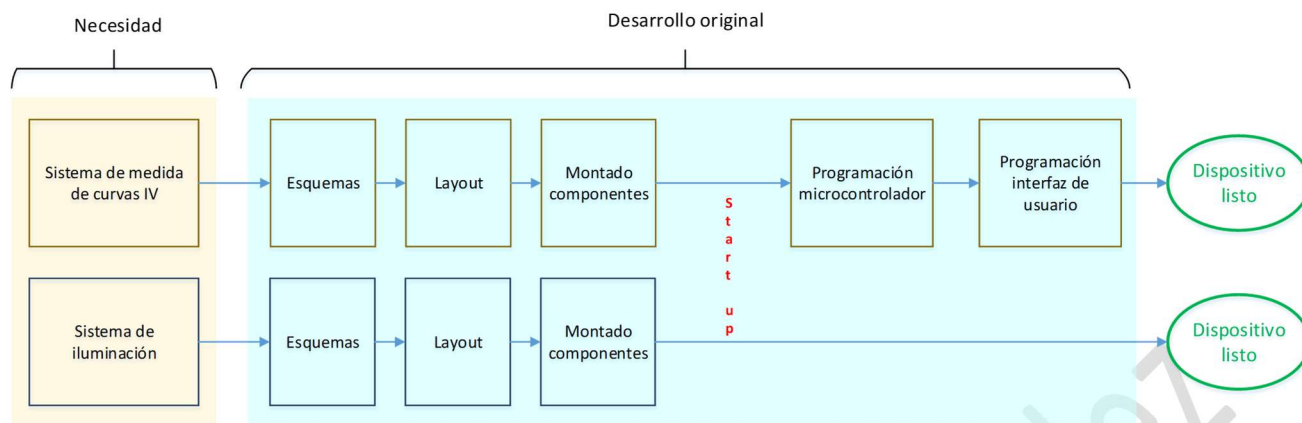
Corresponde con un desarrollo electrónico de un dispositivo que se encargará de realizar una iluminación bajo condiciones controladas. Será necesario su desarrollo puesto que facilitará las investigaciones en paneles solares fotovoltaicos que se están llevando a cabo en el Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal de la Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la Bioenergía (EIFAB) de la Universidad de Valladolid.

Constará de una etapa de diseño electrónico. El diseño electrónico será, no solo el diseño teórico de la propia solución sino, la búsqueda de los componentes necesarios. También se asegurará una correcta fabricación. Posteriormente con los prototipos implementados, habrá una fase de puesta en marcha e instalación en el laboratorio del sistema de medida.

- Desarrollo de un sistema de medición y control basado en instrumentación estándar.

Igual que en el caso anterior, será una solución original y única que habrá que desarrollar desde cero. Habrá que crear partes hardware, partes firmware y partes software que se tendrán que comprobar una a una su correcto funcionamiento. Esto será necesario para poder asegurar el cubrir las necesidades planteadas. Cada una de las partes posee una complejidad específica importante y diferente al resto, debido a la variedad de las áreas de conocimiento que será necesario aplicar para desarrollarlas.

Debe entenderse que unas actividades irán íntimamente relacionadas con otras. Dependiendo de cómo se haga la implementación hardware, se tendrá una programación determinada, tanto a nivel firmware como a nivel software. Si uno de los pasos falla, habrá posibilidad de no poder tener funcional el prototipo, situación que incrementa la complejidad al tener muchos detalles que controlar.



**Figura 5 – Pasos que habrá que dar para desarrollar del TFM**

Los costes será otro de los factores críticos.

Se hizo una estimación previa en base a experiencias anteriores. Vemos que conjuntamente estimamos un coste de 1400€. Si vemos los diferentes presupuestos que se nos facilitaron (ANEXO XII: Presupuestos. Otras ofertas), comprobamos que las estimaciones estuvieron muy cercanas a la realidad.

Se puede encontrar el desglose del coste real que ha tenido en el ANEXO XI: Facturas, que corresponde con **912.26€**.

A los costes reflejados en la tabla, habrá que añadir el de ingeniería. En mi caso soy Ingeniero Electrónico titulado. Por deferencia al programa, tomaré como referencia coste asociado a la actividad de un ingeniero técnico, y no de uno superior como es mi caso, de 50€/hora. Suponiendo las teóricas 450h que se deben dedicar al desarrollo del mismo, habría que añadir un **coste en ingeniería de 22500€**.

	Necesidades	Tareas	Coste
Trazador IV	Instrumento	Puesta en marcha del SW EE	200 €
		Diseño	300 €
		Búsqueda componentes	100 €
		Fabricación	
		Programación	
		Start up	
		Setup	
	Control	Puesta en marcha del SW LV	50 €
		Configuración	
		Toma de datos	
		Gestión de datos	
Sol artificial	Instrumento	Diseño	200 €
		Búsqueda componentes	100 €
		Fabricación	
		Programación	
		Start up	
		Setup	
	Control	Configuración	50 €
		Toma de datos	
		Gestión de datos	
Instrumentación	Control (Por dispositivo)	Configuración	400 €
		Toma de datos	
		Gestión de datos	
<b>TOTAL:</b>			<b>1400 €</b>

**Tabla 2 – Coste económico estimado de la solución basada en un desarrollo a medida**

## 2. IRIS

### 2.1. Funcionalidad

El sistema de iluminación ha sido necesario desarrollarse a medida para poder asegurar unas condiciones constantes y repetibles a lo largo del tiempo. Se necesita asegurar para las diferentes medidas unas condiciones que se puedan tomar como referencia para realizar comparaciones entre mediciones de células y paneles fotovoltaicos entre sí, sin necesidad de aplicar algoritmos de normalización de medidas que podrían introducir errores.

Por otra parte, será un sistema que fácilmente podrá ser escalable. Está diseñado para que pueda realizarse una teselación con la propia placa de iluminación y poder crecer de una manera sencilla en la potencia lumínica.

La geometría que tiene la PCB corresponde con el mismo tamaño de una célula solar fotovoltaica. De esta forma se podrá adaptar fácilmente para dar una iluminación focalizada. Se ha diseñado para que se pueda controlar remotamente con una señal externa la intensidad lumínica y el encendido y apagado en caso de ser necesario.

El componente de iluminación LED elegido, es compatible con diferentes versiones que poseen otras longitudes de onda, haciendo posible modificar de una forma sencilla el tipo de iluminación. La iluminación seleccionada, tendrá una longitud de onda centrada en 860nm, con un flujo de radiación lumínica de 1030mW. Se ha diseñado con este grado de libertad extra para poder intercalar diferentes diseños que pudieran tener diferentes soluciones de iluminación. A continuación, podemos ver características de algunos de los componentes compatibles que se podrían utilizar:

	Flujo radiado
SFH 4727AS (950nm)	→ $\Phi_e = 1030 \text{ mW}$
SFH 4715S (860nm)	→ $\Phi_e = 1030 \text{ mW}$
GF CSSPM1.24 (730nm)	→ $\Phi_e = 300 \text{ mW}$

Cada uno de los prototipos de iluminación, contiene 42 LED. La capacidad de iluminación será de 43,26W teóricos. Con un consumo eléctrico de 3A @ 22V. A la hora de diseñarlo, se ha tenido especial cuidado en dimensionar el manejo del calor. Hacerlo de una forma adecuada impactará directamente sobre la estabilidad de la iluminación y por tanto sobre la fiabilidad de las medidas. Se han tomado todas las medidas oportunas para poder asegurar unas condiciones estables durante toda la vida del prototipo.

El diseño consta de 3 partes:

- Una PCB de 4 capas FR4 que tiene toda la electrónica de control y conexionado. Figura 6
- Siete PCB de 2 capas FR4 que se utilizara como interconexionado. Figura 7
- Una PCB de aluminio de una capa dónde irán todos los LED. Figura 8

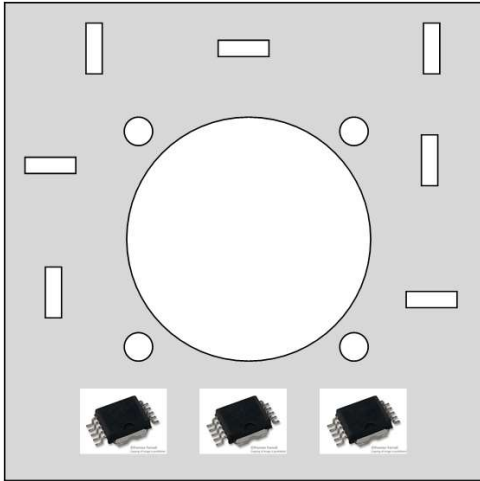


Figura 6 – Forma PCB de control

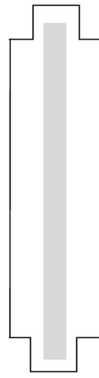


Figura 7 – Forma PCB separador

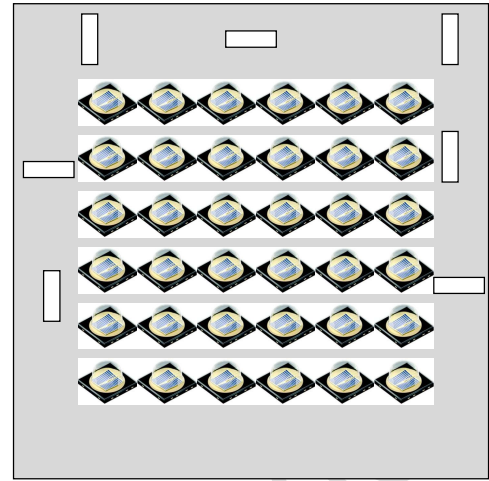


Figura 8 – Forma PCB iluminación

## 2.2. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques que tiene IRIS, se puede ver en la Figura 9. Consta de un driver LED que puede regular la corriente que circula por el mismo gracias a una señal PWM que tiene de entrada. También puede habilitarse o deshabilitarse completamente permitiendo la funcionalidad de encender y apagar todo el sistema a la vez. Cada uno de los drivers viene configurado por HW a una corriente máxima de 1A que será la necesaria para poder polarizar a los LED. Cada uno de los driver controlará 14 LED.

En cada una de las PCB podremos encontrarnos triplicada esta estructura hasta poder completar el control de los 42 LED que se utilizarán para la iluminación.

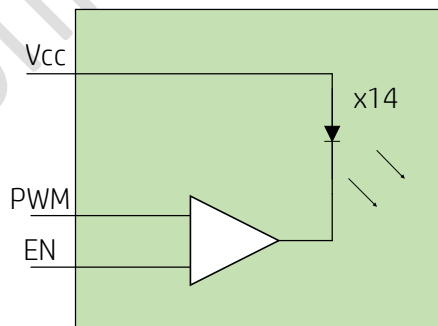


Figura 9 – Diagrama de bloques IRIS

En el diseño de la PCB de control, se añadió un conector para poder conectar un ventilador. Éste será necesario para poder asegurar bajo cualquier condición una correcta estabilidad térmica y disipar de esta manera el calor que pueda ser generado por los LED o dispositivos de potencia.



### 2.3. Escalabilidad

La escalabilidad será necesaria para poder iluminar si fuera necesario un panel fotovoltaico completo. Para ello, se tomará la unidad IRIS básica y se podrá ir interconectando una con las otras entre sí, sin necesidad de añadir controles o cables extra. Esto es gracias a que tiene una figura geométrica que permite la teselación al mismo tiempo que el interconexionado de placas. El objetivo de conectar un determinado número de placas es conseguir una potencia lumínica específica mayor que la de una sola lámpara.

El diseño será pokayoke. Solo hay una posibilidad de interconectar las placas entre sí, evitando de esta forma que puedan ser dañadas por un mal conexionado o una inversión de polaridad. De esta manera aseguramos por diseño que el montaje del dispositivo se haga correctamente. En la Figura 10 se ven los conectores colocados en el perímetro de la PCB que facilitan el conexionado.

Cada una de las placas IRIS que se conecten, añadirán 42 W de flujo luminoso.

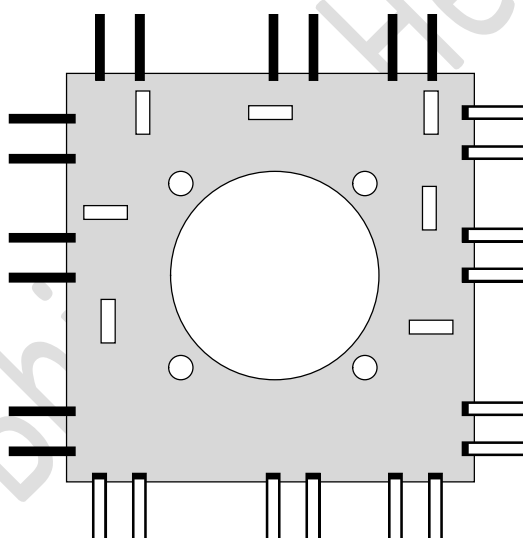


Figura 10 – Conectores IRIS que aseguran el Pokayoke

## 2.4. Layout y esquemas

Una de las partes más importantes de este TFM corresponde con el diseño del propio sistema, cuya explicación se escapa a los objetivos planteados para este documento. Pese a todo, es importante resaltar que corresponden con la parte más crítica del desarrollo y, es el desarrollo teórico y físico que luego será implementado para que con su funcionamiento se cubran las necesidades planteadas.

Puede encontrarse toda la información con detalle en los ANEXOS:

**7.1 ANEXO I: Esquemáticos de IRIS.**

**7.2 ANEXO II: Layout de IRIS.**

**7.3 ANEXO III: Bill of Materials IRIS.**

## 2.5. Proceso de montaje

El paso del desarrollo teórico a la implementación física también es un proceso crítico. De esta fase depende que el sistema funcione correctamente o no. Pese a poder haberse diseñado correctamente, si en esta etapa no se hacen los dimensionados correctos, el sistema podría fallar.

Una vez que se tienen los componentes, la PCB y el stencil, se tendrá que pasar al montaje. Los pasos básicos que se van a tener que dar para realizar un montaje superficial, como es el que hemos elegido a la hora de diseñar serán:

- Alineamiento Stencil con PCB.
- Aplicación de la pasta de soldadura.
- Colocación adecuada de los componentes, uno a uno en posición y orientación.
- Proceso de soldadura en un horno que reproduzca la curva de soldado necesaria.
- Comprobación de que los componentes se encuentran en la posición correcta.

EL sustrato físico dónde irán montados los componentes y que es la representación física del diseño teórico que se hace, viene mostrados en la Figura 11. Podemos ver en color blanco las PCB correspondientes al diseño de IRIS y en color azul la correspondiente a NUMANTIA.



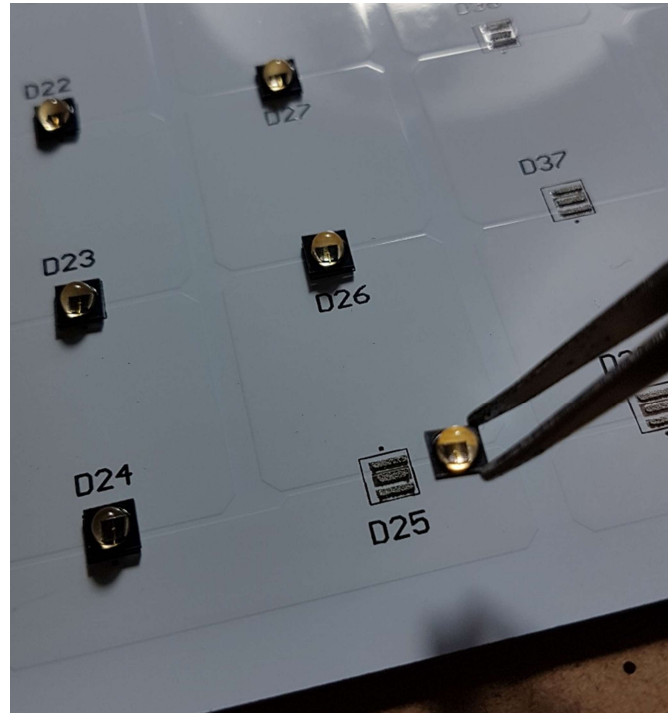
**Figura 11 – PCB que se recibieron**

En la Figura 12 se muestra el componente elegido para la iluminación, el SFH 4715S. Como se puede apreciar en la figura, es un componente de gran tamaño debido a sus características especiales para la disipación térmica, ya que es un componente de potencia.



**Figura 12 – Fotografía del LED de potencia SFH 4715S**

La Figura 13 captura el momento en el que ya se ha aplicado la pasta de soldadura sobre la PCB. Se puede ver como los LED de 22, 23, 24, 26 y 26 ya están colocados. Se ve cómo se está colocando el LED D25 y como quedan los siguientes por colocar aún en sus correspondientes ubicaciones.



**Figura 13 – Colocación de los LED SFH 4715S una vez aplicada la pasta de soldadura**

La IRIS PCB se diseñó con 42 LED, de los cuales, si falla uno, falla toda la iluminación. Es una topología que se utiliza normalmente en la industria por dos motivos: por coste y por espacio. En nuestro caso, después del proceso de soldado apareció un LED que se movió y soldó incorrectamente en el momento de la refusión de la soldadura. Esto ocasionó que los 14 LED correspondientes al array de LED central no funcionaran.

En la Figura 14 está señalado el LED D36 que encontramos mal posicionado y soldado, y que hizo que el prototipo de iluminación no funcionara desde un primer momento. El proceso de reparación, para poder poner en marcha completamente el prototipo fue complejo. Debido a la PCB de aluminio no era posible calentar con aire caliente y soldador ya que disipaba más calor del que se aplicaba no pudiendo de esta manera poder llegar al punto de licuefacción de la soldadura. Se tuvo que poner la PCB de aluminio en una estufa con la temperatura controlada y, junto con unas pinzas poder reubicar correctamente el LED. Es un proceso complejo debido a que se deben calentar todos los componentes a la vez. Los fabricantes de componentes electrónicos desaconsejan aplicar más de dos ciclos térmicos de soldadura a un componente. En la Figura 15 podemos ver el prototipo funcionando. Pese a tener una longitud que a priori se escapa de la visible, debido a ese espectro Gaussiano que posee podemos ver a simple vista, parte de la iluminación que produce.

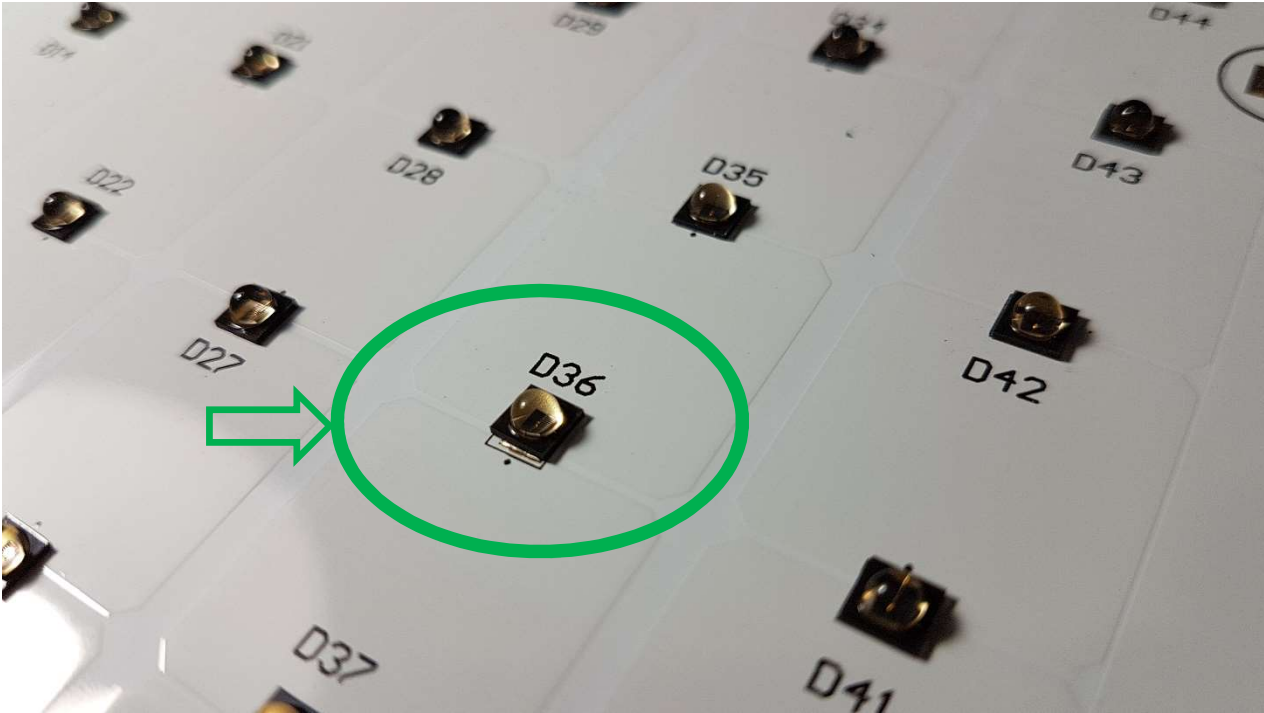


Figura 14 – LED D36 mal soldado.



Figura 15 – Prototipo IRIS puesto en marcha.

En la Figura 16 aparece el montaje final. En la parte superior está la zona de iluminación y con más restricciones térmicas. En la parte intermedia se encuentran los separadores que también cumplen la función de interconexión. En la zona inferior de la figura se encuentran los drivers de control y conexionado de todo el sistema.



Figura 16 – Montaje final del sistema de iluminación IRIS

## 3. NUMANTIA

### 3.1. Funcionalidad

El dispositivo constará de dos entradas de alimentación que serán a través de un conector USB. El primero será para alimentar la placa de Arduino y la segunda, para alimentar la placa de Numantia. Pese a que son dos entradas con similares características, se ha querido repartir en dos entradas diferentes para asegurar que se cumple los límites de potencia asociados a los propios conectores USB. La parte digital, estará alimentado a 5V por dos entradas que tendrán un consumo máximo de 500mA.

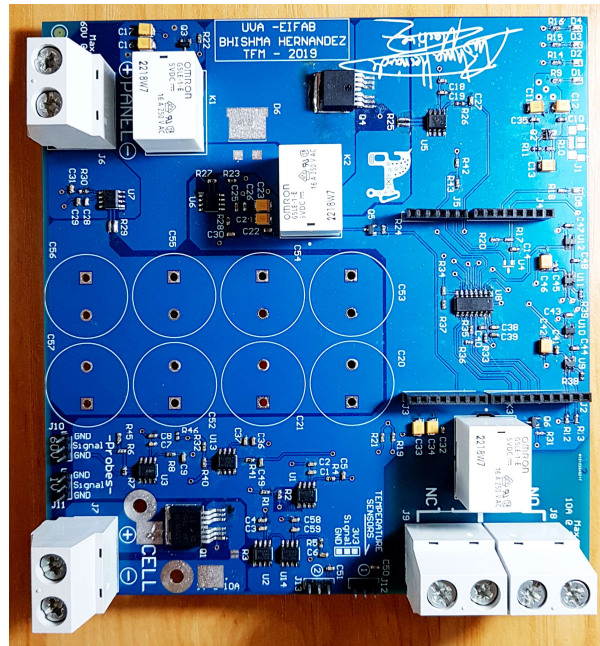
En cuanto a las entradas de medición, se ha provisto al diseño con dos puertos de entrada diferentes para medir los sistemas solares fotovoltaicos. Una de ellas será de potencia para sistemas que puedan alcanzar hasta 60V y una corriente máxima de 10A. La segunda entrada se ha diseñado para tensiones muy pequeñas, de hasta 1V y una corriente también de 10A. Se han puesto diferenciadas puesto que, en el segundo caso, el camino que la corriente va a recorrer a través del prototipo, se debe asegurar que no tenga más de 5mohms.

### 3.2. Diagrama de bloques

Se ha diseñado Numantia PCA de tal forma que pueda ser fácilmente controlable. Para ello se utiliza una plataforma Hardware bien desarrollada y documentada que es la de Arduino. En nuestro caso, se utiliza Arduino M0 para realizar el control de todos los sistemas, pero los sistemas necesarios especiales asociados al propio sistema de medición necesario, están implementados en Numantia. Ambas placas estarán interconectadas, por ello, Numantia tuvo que diseñarse para ser compatible con las señales y funcionalidad ya existentes en Arduino M0. En la Figura 17 y Figura 18, puede verse una imagen de cómo son ambas placas.



**Figura 17 – Arduino M0**



**Figura 18 – Numantia PCA**

Podríamos decir que cada una de las placas electrónicas consta de:

Ardino M0:

- Comunicaciones USB.
- Comunicaciones I2C.
- Señales I/O digitales.
- Señales medición de una señal analógica de referencia.

Numantia:

- Medición de señales analógicas.
- Generación de señales analógicas.
- Conmutadores y sistemas de control de potencia.
- Indicadores luminosos de usuario.
- Medición de temperaturas.

Un posible diagrama de bloques podría ser el que se presenta en la figura de a continuación. El microcontrolador es el que se encarga de comunicarse con el resto de dispositivos. Por una parte, con el usuario y el ordenador dónde están las configuraciones principales y la visualización de los datos tomados. Por otra parte, se comunicará con los sistemas de medición y control que estarán instalados en Numantia, gestionará adecuadamente la información y la procesará.



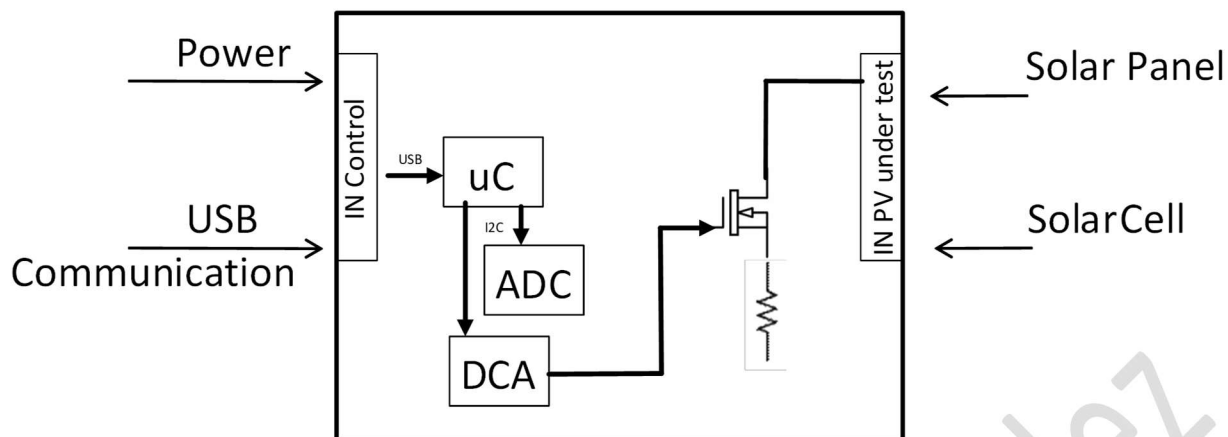


Figura 19 – Diagrama de bloques Numantia PCA

### 3.3. Escalabilidad

En el caso del instrumento de medida desarrollado, se ha pensado de tal forma que pueda facilitar la escalabilidad. Se podrán usar tantos dispositivos como se desee por medio de conexiones USB con el ordenador que los controlará.

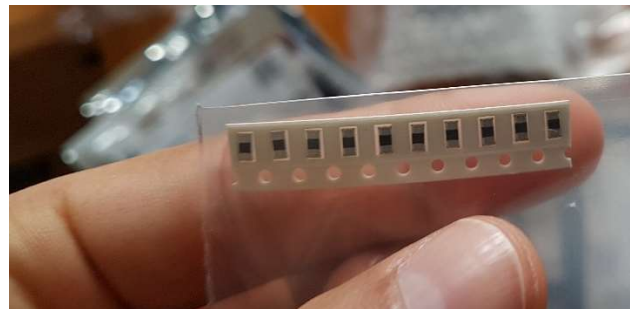
También, si fuera necesario y, gracias a la plataforma Arduino, sería muy sencillo poder utilizar otro tipo de placas de control diferente al Arduino M0. Esto es gracias a que la funcionalidad y la posición de los pines, se mantiene en toda la plataforma Arduino en las mismas posiciones y con las mismas características. Por ejemplo, podríamos usar Arduino Primo y tener en la propia placa conectividad Wifi, Bluetooth e infrarrojos sin necesidad de hacer ningún cambio en el hardware diseñado para Numantia.

### 3.4. Proceso de montaje



**Figura 20 – Componentes necesarios para el montaje.**

El tamaño elegido preferentemente para los componentes pasivos es el 0603. Es un encapsulado con unas propiedades geométricas que son: 1.6mm de largo por 0.8mm de ancho. En la Figura 21 aparecen unos condensadores con las características comentadas y referencialmente su tamaño con respecto a un dedo.



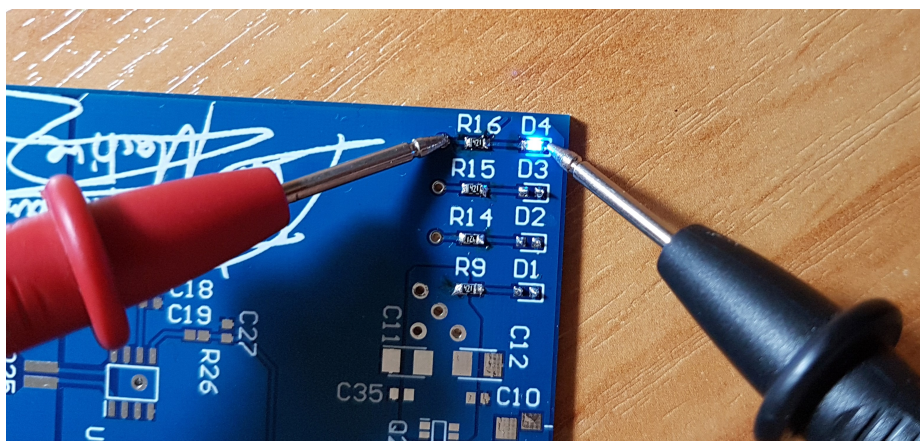
**Figura 21 – Tamaño 0603 de la mayoría de componentes**

El proceso de montaje elegido en este caso, debido a la complejidad y de la variedad de componentes fue soldar uno a uno a mano, de esta forma asegurar su correcto funcionamiento. En algunas ocasiones, se pudo comprobar el funcionamiento y la conectividad de los componentes recién soldados, como fue el caso mostrado en la Figura 22. Sobre todo, en el caso de los componentes pasivos.

La recepción del material es una tarea que se debe hacer de manera ordenada y metódica para asegurar que no se pierde ningún componente. El caso de Numantia corresponde con un diseño sencillo, posee 146 componentes, de los cuales, son diferentes entre sí un total de 32.

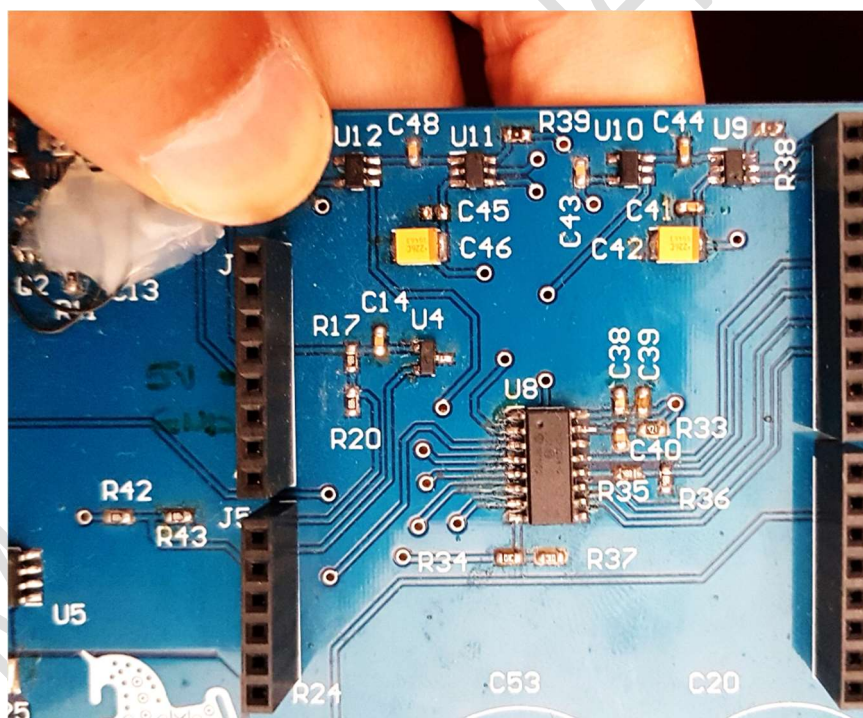
Cada uno posee sus características especiales, posición y polaridad. Es muy importante tener en cuenta la polaridad porque hay muchos componentes que solo funcionan en una sola posición, que se debe respetar para no ser dañados. Será especialmente importante a la hora de realizar el montaje a mano.

En la Figura 20 tenemos todos los componentes recibidos para poder realizar y completar el montaje.



**Figura 22 – Comprobación de funcionamiento de los indicadores luminosos recién soldado**

Respecto a los componentes activos, como los mostrados en la Figura 23, se puede ver la disparidad de formas y su tamaño relativo. Los componentes activos, debido a su tamaño y condiciones especiales, fue muy importante asegurar un correcto proceso de soldadura para evitar que se dañara el componente en el propio proceso.



**Figura 23 – Detalle de diferentes componentes activos usados en Numantia.**

### 3.5. Programa de control Backend

Una vez que el hardware está montado, hay que darle la funcionalidad adecuada. Es necesario programar el microcontrolador para realizar las tareas necesarias que se desea para el instrumento. La electrónica por sí sola no tiene ninguna funcionalidad, tiene que ir asociada a un programa que la gestione.

Se han desarrollado algoritmos especiales para realizar las medidas, las comunicaciones con los componentes, funciones para el control adecuado de los diferentes partes y capacidad para controlar y visualizar todo más allá del microcontrolador, en nuestro caso, desde el ordenador.

La programación correspondiente al microcontrolador, se puede encontrar en el ANEXO VII: Backend microcontrolador NUMANTIA.

También ha sido necesario programar la aplicación que va a funcionar en el ordenador y se va a encargar de comunicarse con el prototipo, mostrar los datos al usuario y almacenarlos adecuadamente para que puedan ser tratados con posterioridad si fuera necesario. La programación correspondiente a la aplicación realizada para el ordenador, se puede encontrar en el ANEXO VIII: Backend programa de usuario NUMANTIA.

### 3.6. Programa de control Frontend

Corresponde con el interfaz que el usuario visualiza y puede configurar. En la Figura 24 presentamos la captura de pantalla del mismo. En la parte superior derecha, vemos que tiene una parte de visualización gráfica de los valores medidos. En la esquina inferior derecha aparecen unos indicadores numéricos con los valores que pueden resultar más interesantes después de realizar la medición de los puntos. Todos los puntos medidos deberían conformar lo que llamamos curvas IV, cuya obtención es la motivación principal de las mediciones.

Se ha añadido la posibilidad de poder guardar los valores medidos en un archivo CSV para poder post procesarlos con otros programas como Excel. Se ha dado la opción de añadir comentarios que serán guardados en el mismo fichero con el objetivo de facilitar la procedencia y comprensión de los datos tomados y almacenados. Por ejemplo, un dato interesante que podría guardarse es la irradiancia que hay en el momento de realizar las mediciones.

También hay visualizadores que nos indican la temperatura que está midiendo el sistema. Es otro de los valores que es importante medir junto con las curvas IV para entender las variables medioambientales a las que estaba sometida la unidad medida.

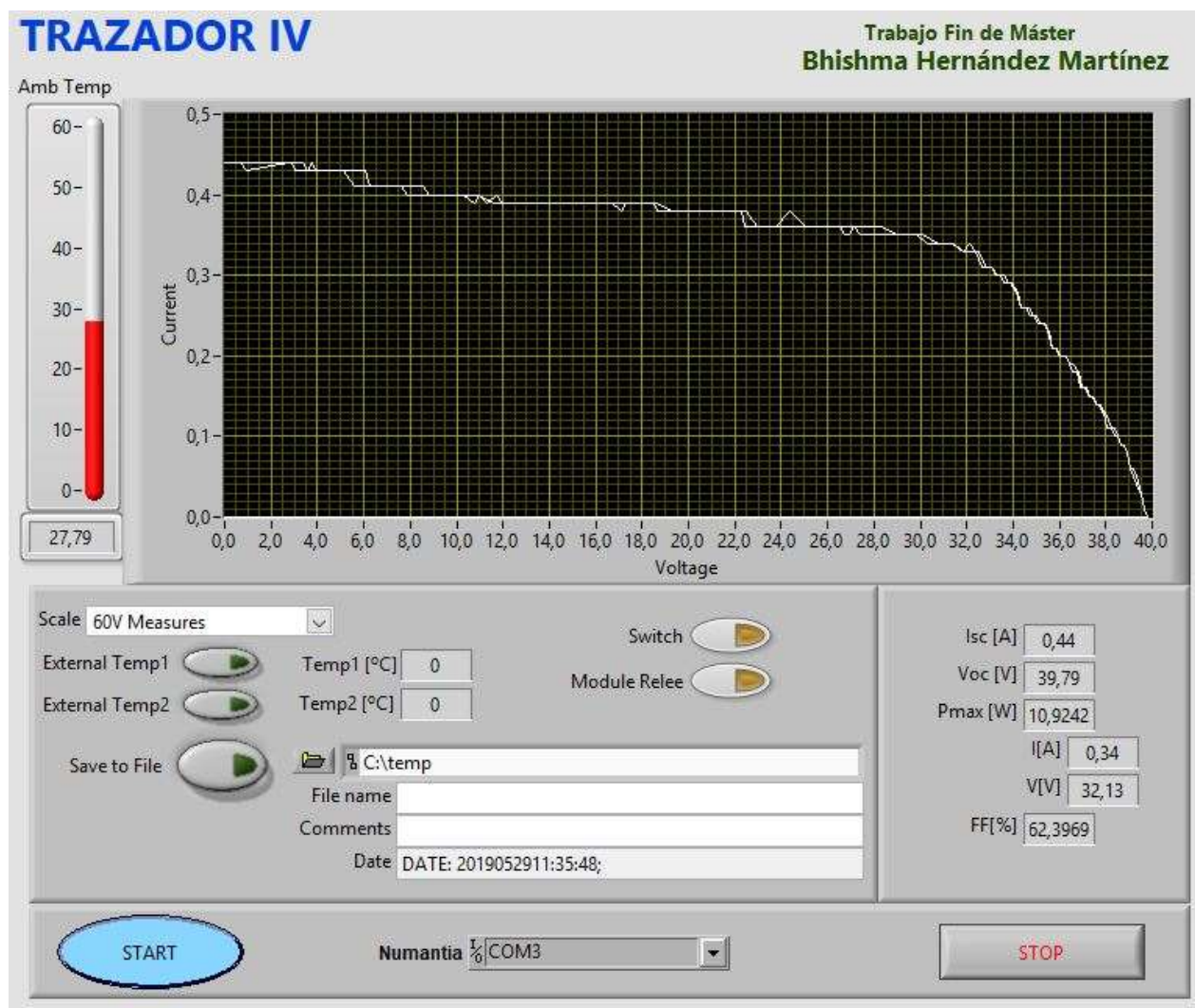


Figura 24 – Interfaz de usuario para controlar el instrumento de medida Numantia

### 3.7. Layout y esquemas

Una de las partes más importantes de este TFM corresponde con el diseño del propio sistema, cuya explicación se escapa a los objetivos planteados para este documento.

Pese a todo, es importante resaltar que corresponden con la parte más crítica es el desarrollo teórico y físico que luego será implementado para que con su funcionamiento se cubran las necesidades planteadas.

Puede encontrarse toda la información con detalle en los ANEXOS:

ANEXO IV: Esquemáticos de NUMANTIA.

ANEXO V: Layout de NUMANTIA.

ANEXO VI: Bill of Materials NUMANTIA.

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

## 4. MEJORAS PROPUESTAS

Como parte del propio proceso de prototipado, se encuentra el análisis del mismo y la detección de posibles mejoras. El prototipo nos dará información muy valiosa y ayuda a ver mejorar que ayudarían a simplificar un potencial proceso de industrialización.

### 4.1. Montado

#### IRIS

- Uno de los Led D36 en IRIS tuvo un proceso de soldado incorrecto. Hay que analizar bien la forma de los pad para poder facilitar el proceso de soldadura y reducir potenciales fallos.

### 4.2. Diseño

#### IRIS

- En la placa de LED uno de los fiducials hay que marcarlo mejor para facilitar a la máquina de pick and place el posicionado de los componentes.
- PAD de los drivers led hay que adaptados mejor al componente real.
- Bajar iluminación LED disminuyendo la corriente que pasa por los mismos.

#### NUMANTIA

- Numantia conector USB. Cambiar de conector por uno que se adapte mejor. El conector bueno es ZX62R-B-5P(30) el que se ha pedido es ZX62M-B-5P(30)
- La capa inferior de protección hay que añadirla a la PCB en futuras fabricaciones.

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández



## 5. PRIMERAS MEDICIONES

### 5.1. Primeras mediciones IRIS

Los resultados obtenidos de los experimentos preliminares son muy positivos e indican que las suposiciones iniciales que se habían hecho sobre la viabilidad de iluminar con una sola longitud de onda, podrían ser correctas. Queda mucho por medir para poder caracterizar completamente el sistema diseñado y su funcionamiento como fuente de iluminación. Una de las siguientes pruebas que se debería hacer es, ver cómo varía la iluminación con el tiempo y medir al mismo tiempo la temperatura de la placa de aluminio dónde están soldados los LED.

En la Tabla 3 vienen resumidos los principales valores medidos en los experimentos preliminares:

	Voc[mV]	Isc[A]	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	Distancia a
Iluminación SOL	562	1.57	736	∞
Iluminación IRIS	583	1.89	809	15 cm

**Tabla 3 – Resumen de los primeros valores obtenidos con la iluminación artificial**

En la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 muestran el momento en el que se realizaron los primeros experimentos con el prototipo de IRIS para proporcionar iluminación a una célula solar fotovoltaica. En ellas se puede ver la corriente de corto circuito producida gracias a la iluminación artificial generada en el laboratorio generando 1.89A y el valor de irradiancia de 809 W/m<sup>2</sup> que se tenía en esas condiciones. También se reprodujo en mismo experimento bajo la eliminación del sol para poder tener una referencia con la que comparar los resultados obtenidos en el laboratorio.

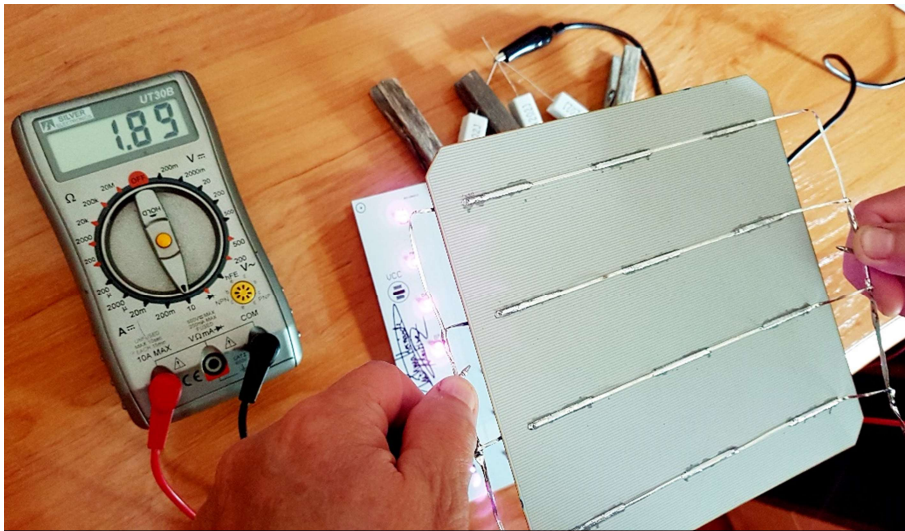


Figura 25 – Corriente  $I_{sc}$  producida por la célula FV cuando la iluminamos con IRIS.

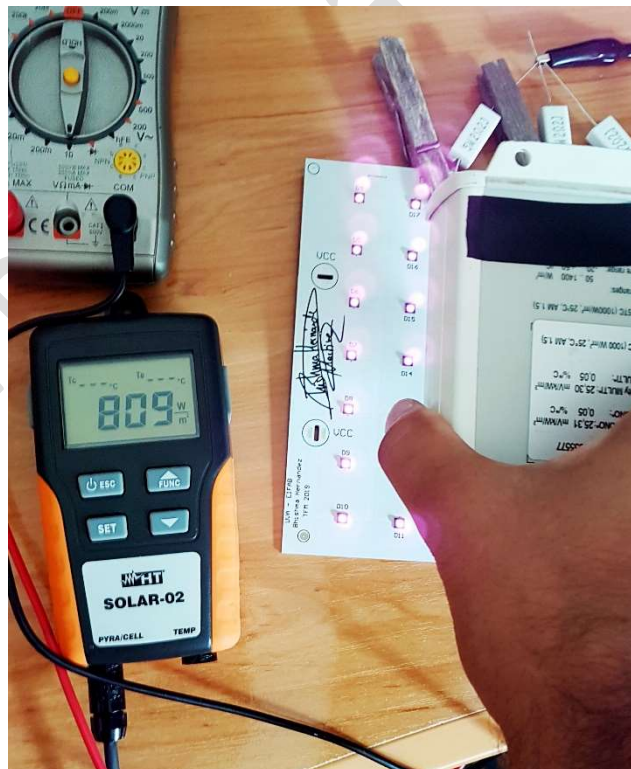


Figura 26 – Irradiancia medida a cm de la IRIS



Figura 27 – Irradiancia y corriente  $I_{sc}$  medida bajo el SOL en condiciones reales

5.2. Primeras mediciones NUMANTIA

Para poner en marcha el dispositivo, se tuvo que desarrollar todo el entorno de trabajo necesario que facilitara el control de los diferentes componentes con el fin de poder validar su funcionamiento y su posterior utilización.

La Figura 28 muestra la información que se saca por pantalla cuando se conecta el dispositivo al puesto serie del ordenador a 115200 baudios. Toda la información mostrada, así como los comandos que se pueden utilizar han tenido que ser previamente programadas y es parte también de este Trabajo Fin de Máster.

```
=====
WELCOME. I was taught the way of progress is neither swift nor easy

      bsdfg      .      s/
      `t-+shd Nd: `My      :ddo      /N`
      .:ohh yM Mo Ny      `sd      `M/
      -dd+- /Mo NN` ms      hs`+s.      `/s+xryy- .oys.      _.-:-.
      +MNhsydh: BHISHMA ++      -ossyo sN dd `h Mo sNsd -dh      :yy +oN/
      :My `dN. Nm Ny      :M/      -Nh      oM /M-      dM MM- dh      `Ns` +M/
      -Md -mN. NM Ms` hN`      -//ody` yM Ms      hM Md hh      sd+ dN+.
      sMN+ mh- mM Ms` dN      Nh` ym mh      hM- Mh +myy:      bhishmasysso
      TFM-2019 Nd dNds .syys BHISHMA` gh 78      op ty 789      -*//

GOOD!!! NUMANTIA IS PRESENT :-)

= COMMANDS:
? --> Print all available commands
TempPCB --> Print ambient temperature in ADC counts
TempPCB_d --> Print ambient temperature on degrees
Meas60v --> Print all IV values from 60V channels
CharacFPanel
Temperature today = 27.96 °C

=====
SOLAR MODULE CHARACTERIZATION
Voc = 19.76 [V] Ioc = 0.00 [A]
Vmax = 15.44 [V] Imax = 0.39 [A] Pmax = 5.98 [W]
Vsc = 0.00 [V] Isc = 0.42 [A]
FF = 0.71
FIN;
```

Figura 28 – Imagen backend firmware Numantia

La consola serie es un entorno en el que solo puede aparecer texto. Para comprobar que el dispositivo realizaba las mediciones correctamente, se hicieron varias pruebas con excitaciones conocidas comprobando patrones de tensiones y corrientes conocidas.

Una vez realizada la validación inicial, se comenzó a desarrollar un algoritmo especial para poder realizar la medición de una curva IV típica de un sistema solar fotovoltaico y mostrar los valores principales: Corriente de cortocircuito (Isc), tensión de circuito abierto (Voc) y potencia máxima (Pmax).

En el caso de la Figura 28, las mediciones corresponden con un módulo solar pequeño, que produjo una Isc=0.42A, Voc=19,76V y una Pmax=5.98W.

## 6. CONCLUSIONES

Gracias al desarrollo de este TFM, junto con las medidas realizadas y presentadas a lo largo de este documento, queda demostrado que los objetivos propuestos inicialmente quedan cubiertos.

De acuerdo a lo que se planteaba:

- Demostración de que el diseño propuesto es industrializable.

Se gestionó la fabricación de los prototipos por medio de industrias especializadas en el sector, en este caso, un fabricante asiático. Fueron cubiertas las cuestiones previas y se obtuvieron físicamente los diseños que posteriormente fueron usados para montar los componentes electrónicos, programación, puesta en marcha y comprobar funcionalidad.

- Instrumento de iluminación constante y de bajo coste.

Las mediciones iniciales que se hicieron demuestran que la solución planteada es válida para poder ser utilizada. Será necesario dentro del proceso de investigación, caracterizar perfectamente sus características a lo largo de largos periodos de tiempo, así como realizar una serie de medidas si se quiere tener una mayor información de su funcionamiento.

- Instrumento de medida polivalente para ser usado con diferentes dispositivos solares fotovoltaicos.

Gracias a la industrialización y puesta en marcha del diseño que se propuso como parte de este TFM, se pudieron realizar medidas en diferentes sistemas fotovoltaicos, demostrando la capacidad planteada inicialmente de superar las limitaciones de los instrumentos actuales. Las mediciones, parte de ellas presentadas en éste TFM, tienen resultados prometedores que abren nuevas posibilidades de investigación.

- Interfaz de usuario que facilite la interacción con el instrumento de medida.

El manejo del instrumento propuesto es sencillo y gracias a ello, se pudo hacer parte del proceso de medida y control del instrumento, en un ordenador y por una persona ajenas al desarrollo, pero que sí tenía las necesidades de uso del mismo. El poder utilizar de manera sencilla el dispositivo en un ordenador cualquiera, demuestra la facilidad y versatilidad que proporciona el interfaz de usuario desarrollado y propuesto.

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández

## 7. ANEXOS

Toda la información que se presenta a continuación, corresponde con el desarrollo original que se ha hecho para llevar a cabo este Trabajo Fin de Máster. Pasemos a explicar cada uno de los apartados.

### IRIS:

ANEXO I: Esquemáticos de IRIS.

Representación pictórica del circuito eléctrico que implementa la funcionalidad de IRIS.

ANEXO II: Layout de IRIS.

Definición del diseño de IRIS en términos de topología física.

ANEXO III: Bill of Materials IRIS.

Listado de componentes presentes en el esquema electrónico de IRIS.

### Numantia:

ANEXO IV: Esquemáticos de NUMANTIA.

Representación pictórica del circuito eléctrico que implementa la funcionalidad de Numantia.

ANEXO V: Layout de NUMANTIA.

Definición del diseño de Numantia en términos de topología física.

ANEXO VI: Bill of Materials NUMANTIA.

Listado de componentes presentes en el esquema electrónico de Numantia.

ANEXO VII: Backend microcontrolador NUMANTIA.

Programación que se realiza a bajo nivel para implementar funcionalidad en un microcontrolador.

ANEXO VIII: Backend programa de usuario NUMANTIA.

Programación de alto nivel que se realiza para implementar funcionalidad en un ordenador.

ANEXO IX: Ficheros que genera el interfaz de usuario para ser archivados

Nombre de fichero y estructura que ha sido programada para almacenar las mediciones.

**Producción:**

ANEXO X: Cuestiones línea de producción

Preguntas que surgen en la línea de producción al interpretar toda la información anterior para poder realizar físicamente el diseño.

ANEXO XI: Facturas

Costes asociados al desarrollo del Trabajo Fin de Máster asociados a componentes y producción.

ANEXO XII: Presupuestos. Otras ofertas

Otras ofertas recibidas para llevar a cabo la producción de los dispositivos diseñados.

**Investigaciones:**

ANEXO XIII: Publicaciones que han venido propiciadas a partir de este TFM.



7.1. ANEXO I: Esquemáticos de IRIS.

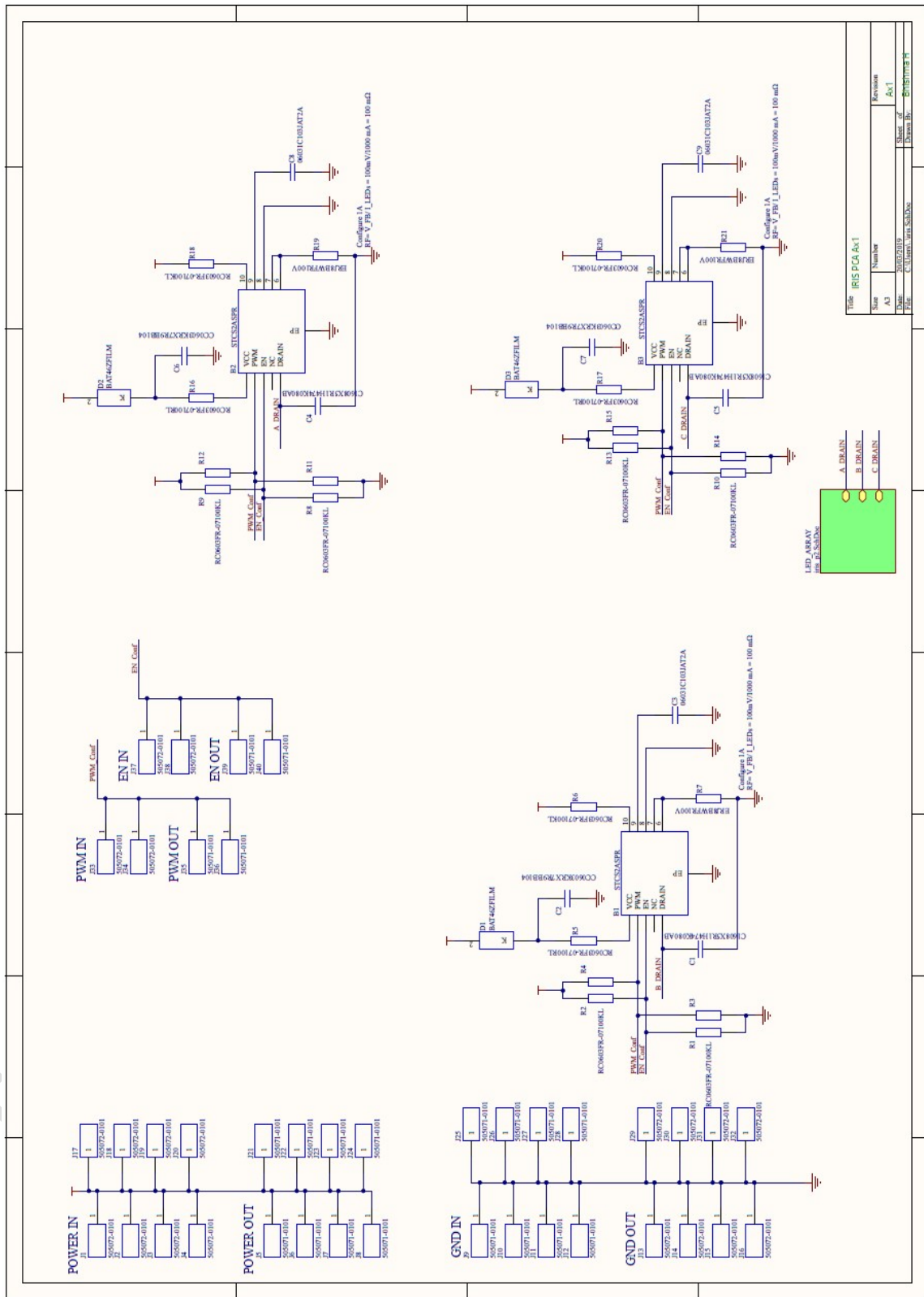


Figura 29 – Esquemático 1/2 IRIS

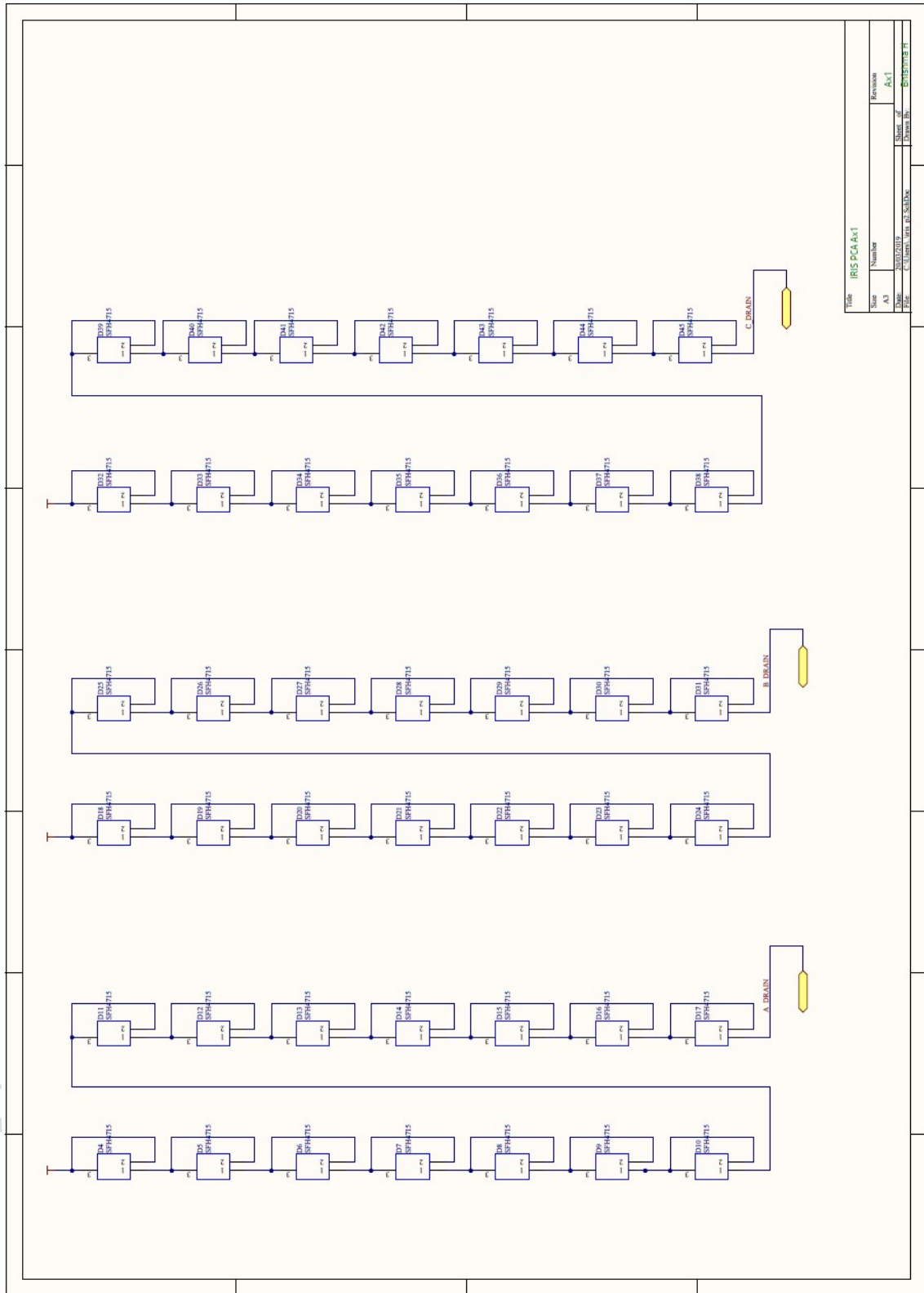


Figura 30 – Esquemáticos 2/2 IRIS

7.2. ANEXO II: Layout de IRIS.

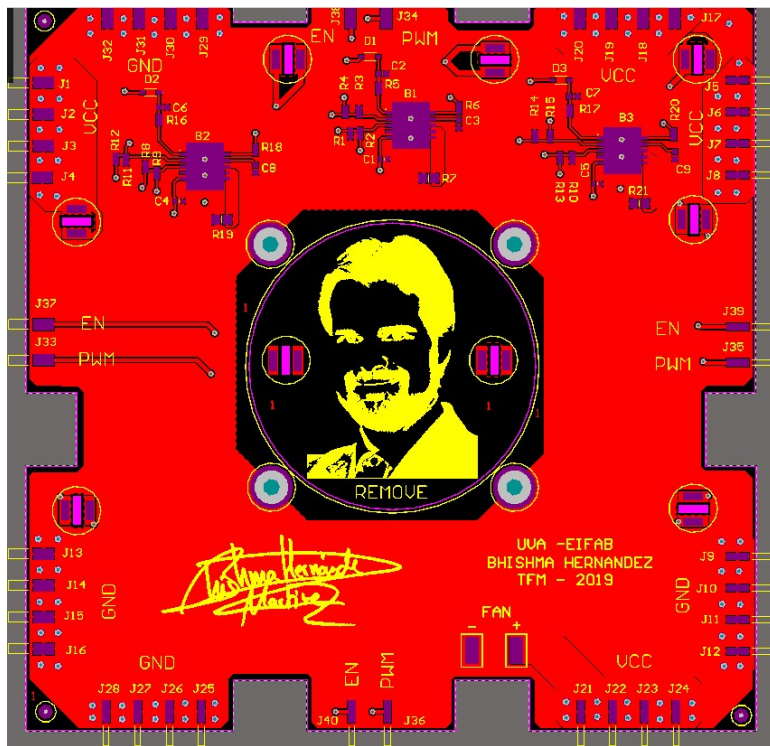


Figura 31 – Top Layer IRIS

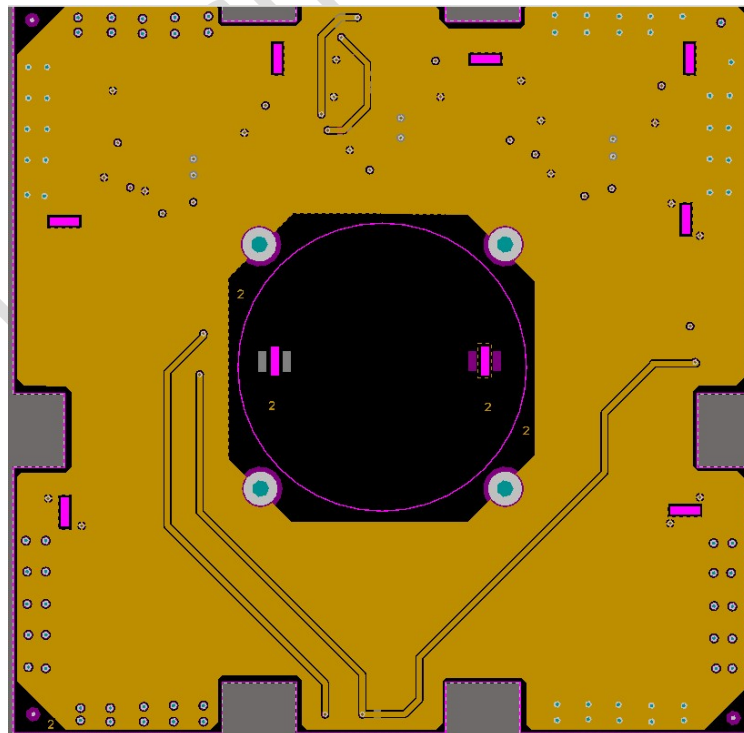


Figura 32 – Layer 2 IRIS

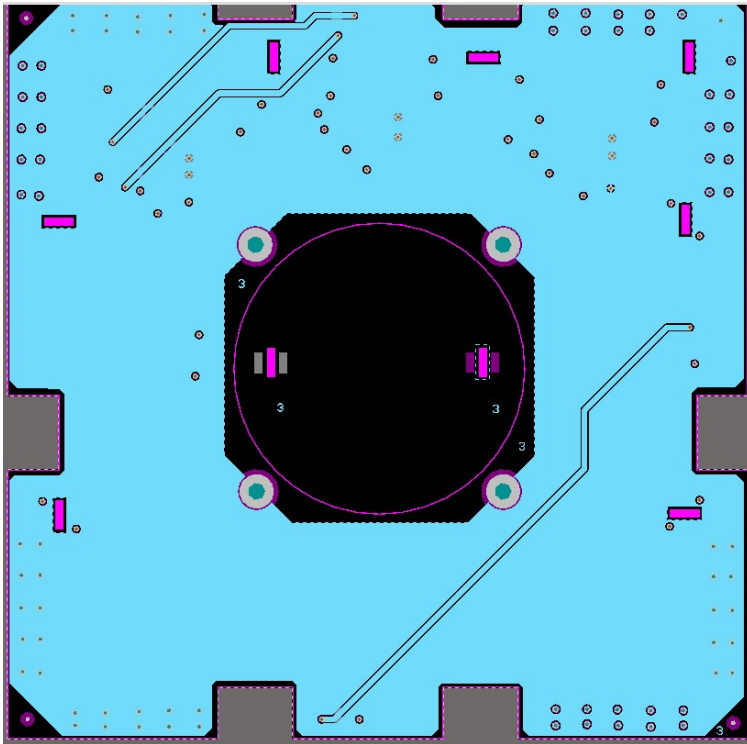


Figura 33 – Layer 3 IRIS

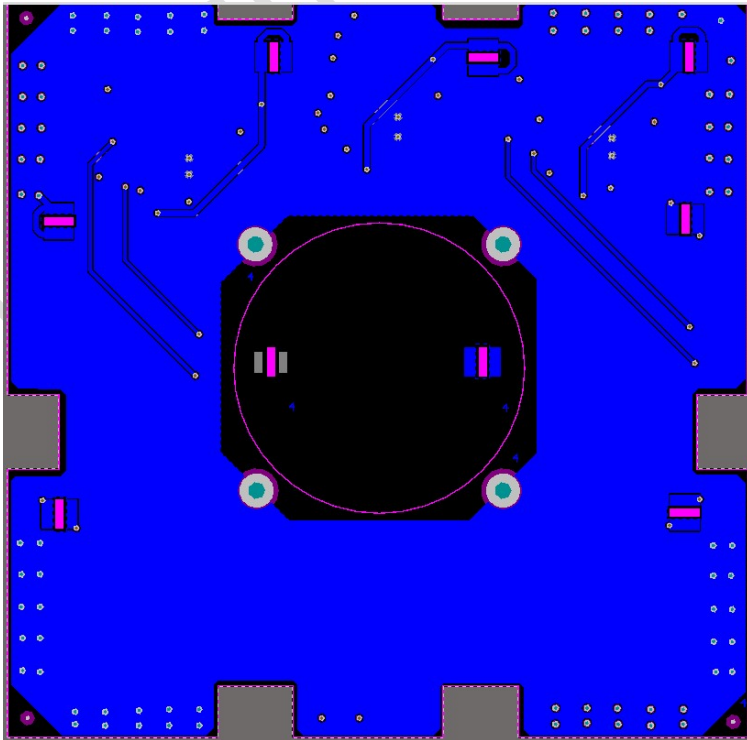


Figura 34 – Bottom Layer IRIS

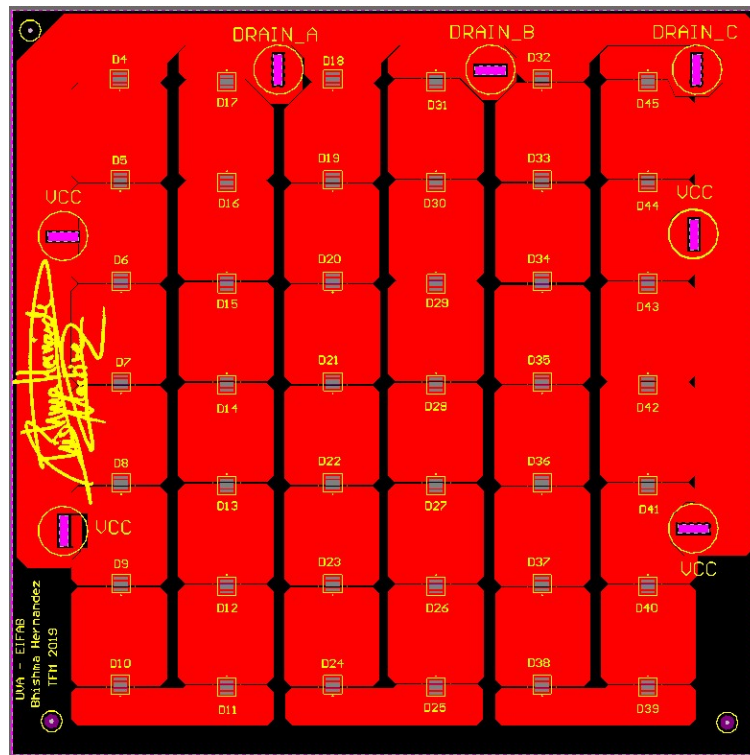


Figura 35 – Layer única LEDES



Figura 36 – Layer única separador

7.3. ANEXO III: Bill of Materials IRIS.

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
STCS2ASPR	2A Constant Current LED Driver PowerSO10 5TMicroelectronics STCS2ASPR, LED Display Driver, 10-Pin PowerS	B1, B2, B3	SONI27P940X75	STCS2ASPR	3
C1608X5R1H474K080AB	TDK - C1608X5R1H474K080AB - CAP, MLCC, X5R, 470NF, 50V, 0603	C1, C4, C5	CAPC1608X80N	C1608X5R1H474	3
CC0603KRX7R9BB104	CAPACITOR, 0603 100nF 10% 50V	C2, C6, C7	CAPC1608X90N	CC0603KRX7R9B	3
06031C103JAT2A	Capacitor Ceramic 0.01uF 100Vdc SMD AVX 0603 10nF Ceramic Multilayer Capacitor, 100 V dc, +125degC, X7R	C3, C8, C9	CAPC1608X90N	06031C103JAT2	3
BAT46ZFILM	BAT46ZFILM, Schottky Diode, 0.15A max, 100V, 2-Pin, SOD-123	D1, D2, D3	STPS0560Z	BAT46ZFILM	3
SFH4715	EMITTER IR 860NM 1A SMD	D4, D5, D6, D7, D8, D9	SFH4735	SFH4715	42
505072-0101	MOLEX - 505072-0101 - CONNECTOR, RECEPTACLE, 1POS, 1ROW	J1, J2, J3, J4, J13, J14	5050720101	505072-0101	20
505071-0101	MOLEX - 505071-0101 - CONNECTOR, PLUG, 1POS, 1ROW	J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11	5050710101	505071-0101	20
RC0603FR-07100KL	YAGEO (PHYCOMP) - RC0603FR-07100KL - RES, THICK FILM, 100K, 1%, 0.1W, 0603	R1, R2, R3, R4, R6, R8	RESC1608X55N	RC0603FR-07100	15
RC0603FR-07100RL	Yageo RC Series Thick Film Surface Mount Resistor 0603 Case 100	R5, R16, R17	RESC1608X55N	RC0603FR-07100	3
ERJ8BWR100V	Panasonic ERJ8BW Series Thick Film Low Ohmic Surface Mount Resistor 1206 Case 100m 1% 1W 100ppm/C	R7, R19, R21	RESC3116X75N	ERJ8BWR100V	3
				<b>TOTAL</b>	<b>118</b>

Tabla 4 – Lista de componentes de IRIS

7.4. ANEXO IV: Esquemáticos de NUMANTIA.

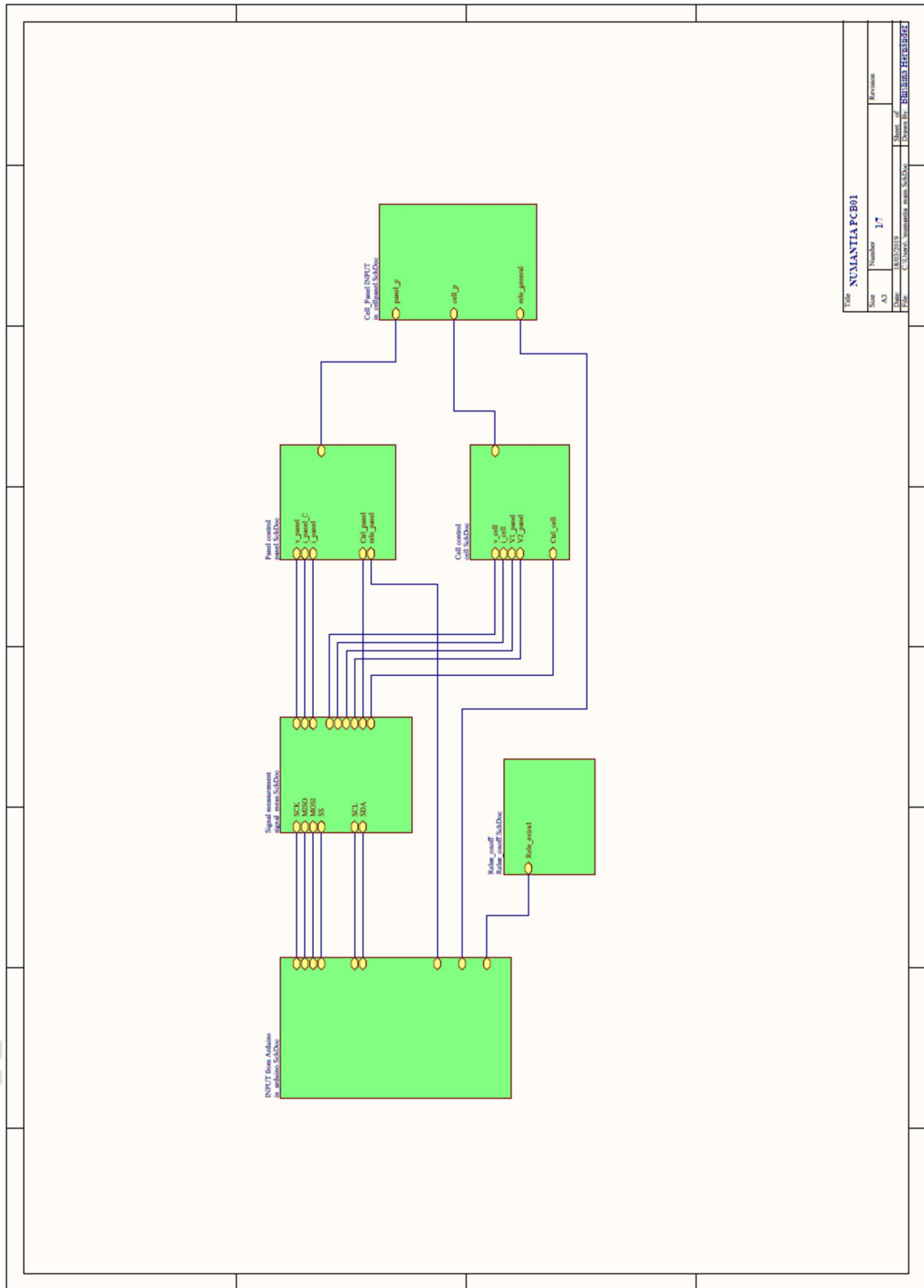


Figura 37 – Esquemático 1/7 Numantia

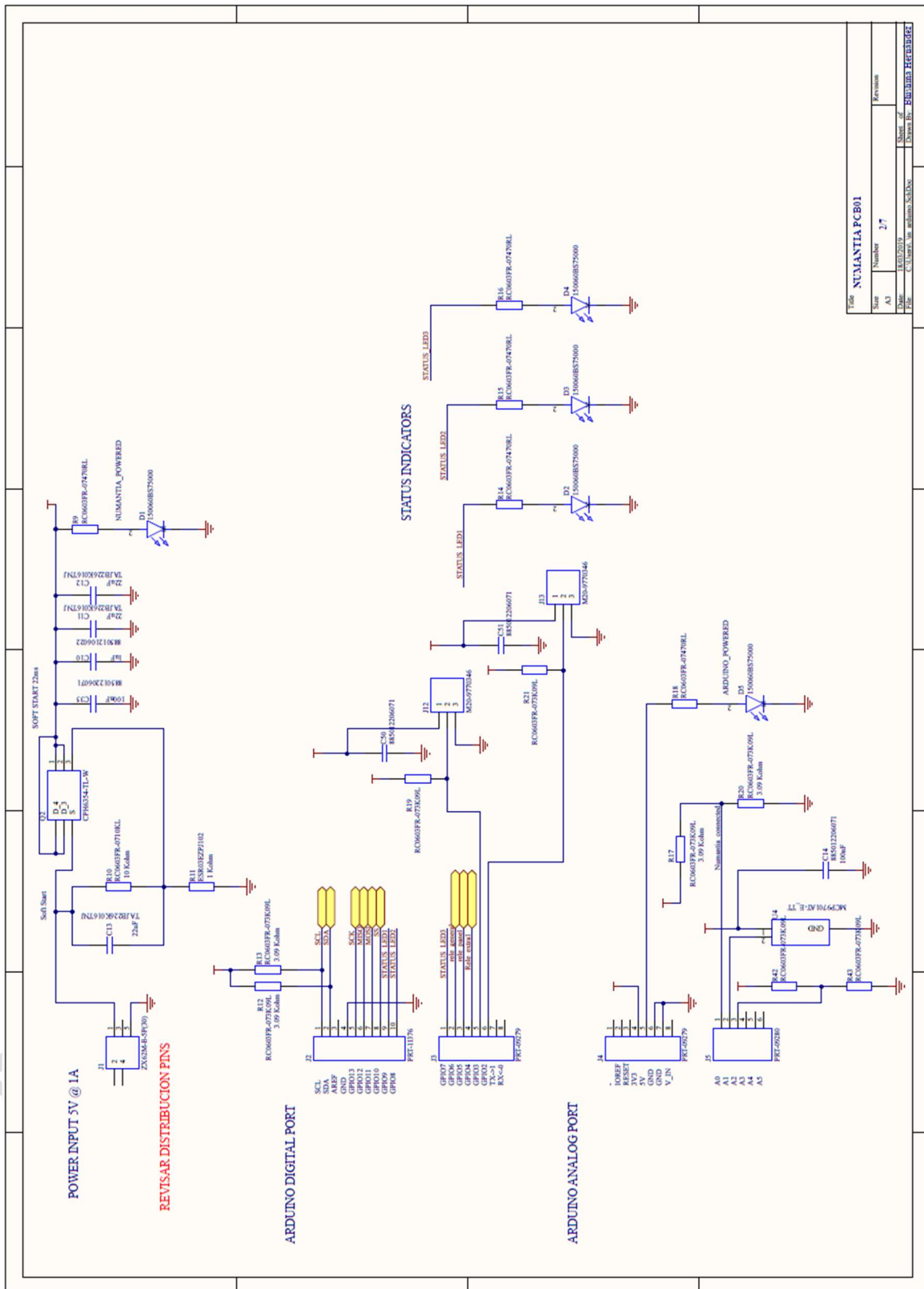
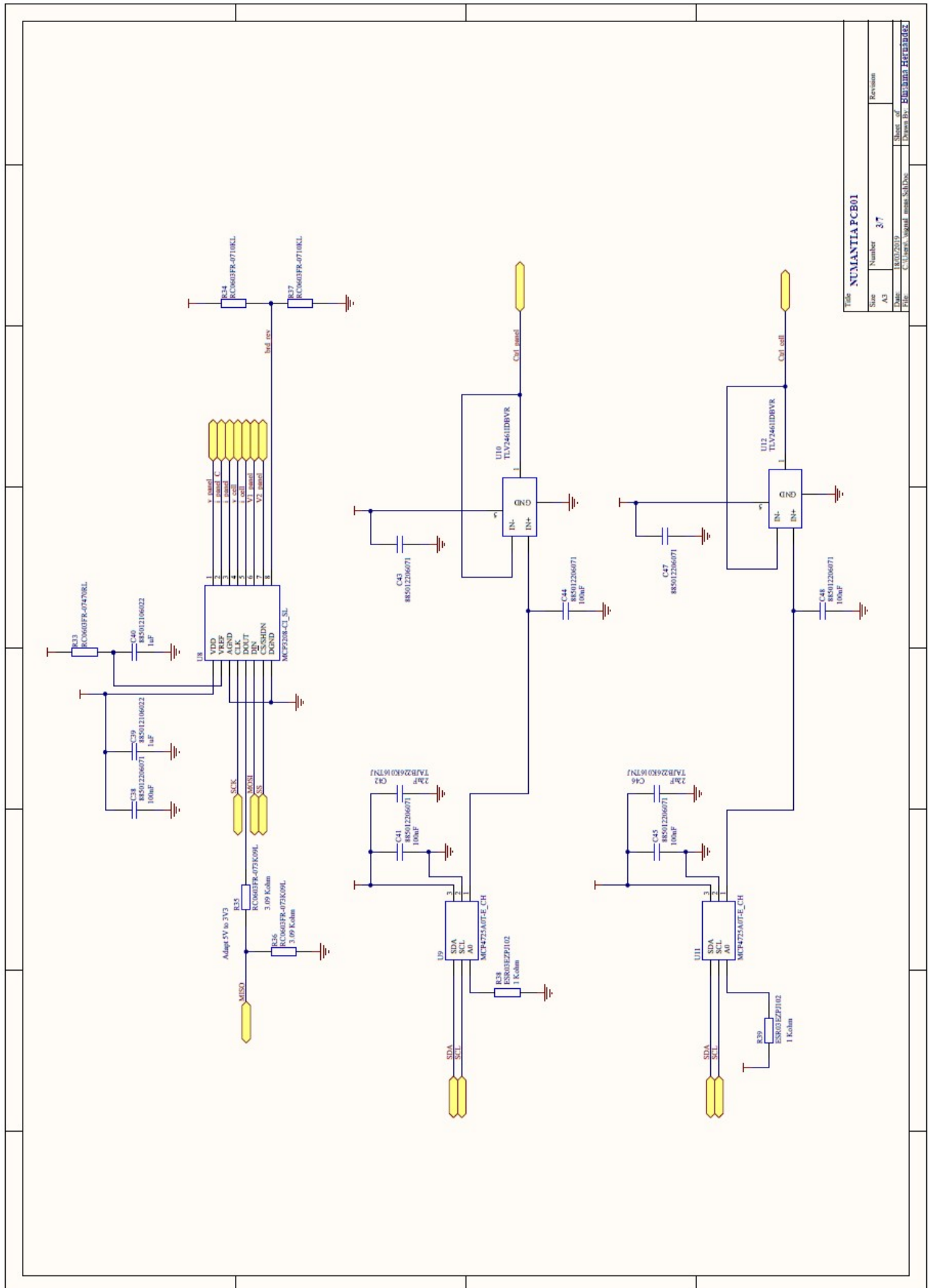


Figura 38 – Esquemático 2/7 Numantia





File: NUMANTIA PCB01			
Size	Number	Revision	
A3	3/7		
Date:	Rev:	Sheet of	Drawn by:
18/10/2019	1	3/7	BHISHMA HERNANDEZ
File: C:\Users\Signal\Desktop\...			

Figura 39 – Esquemático 3/7 Numantia

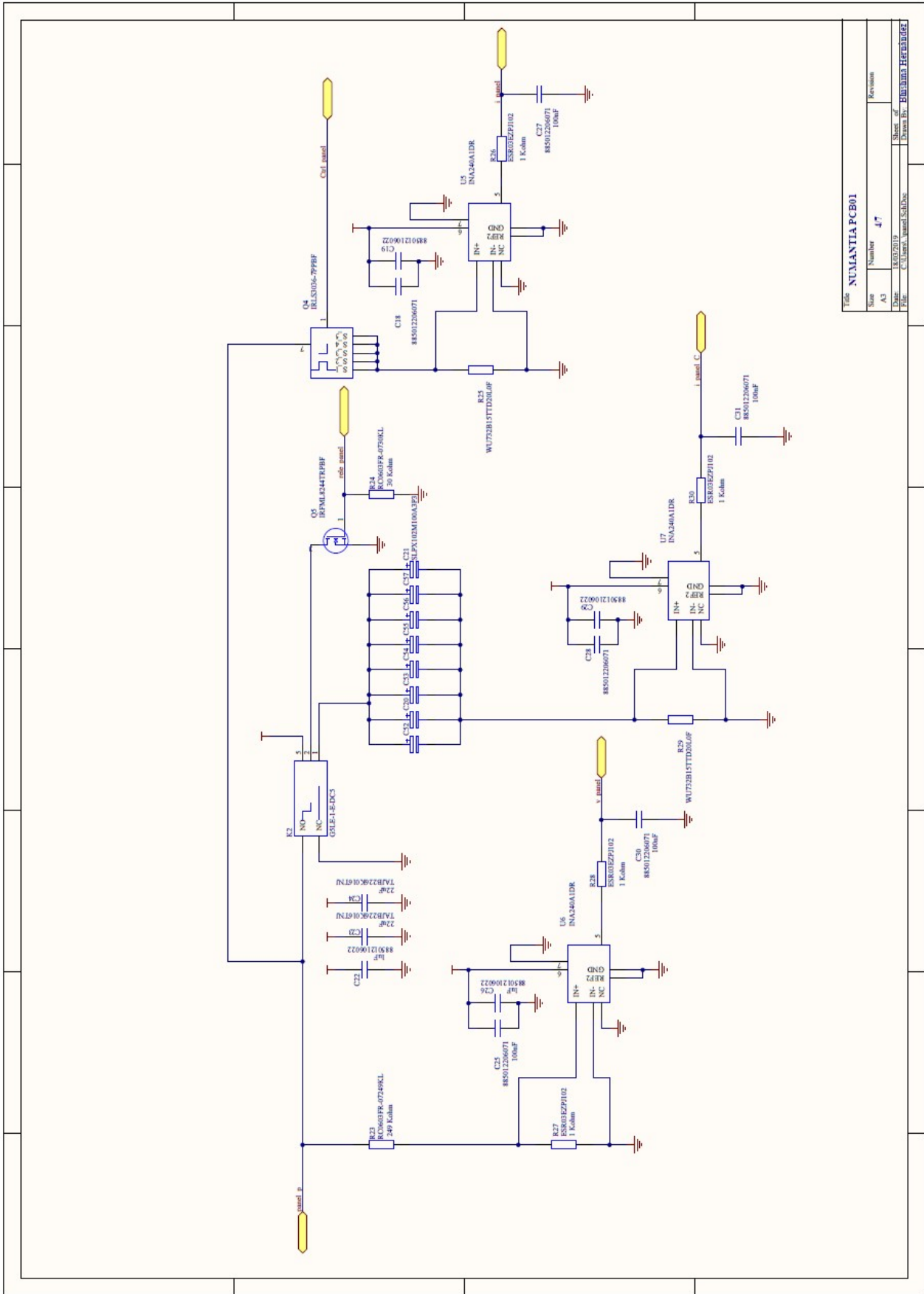


Figura 40 – Esquemático 4/7 Numantia

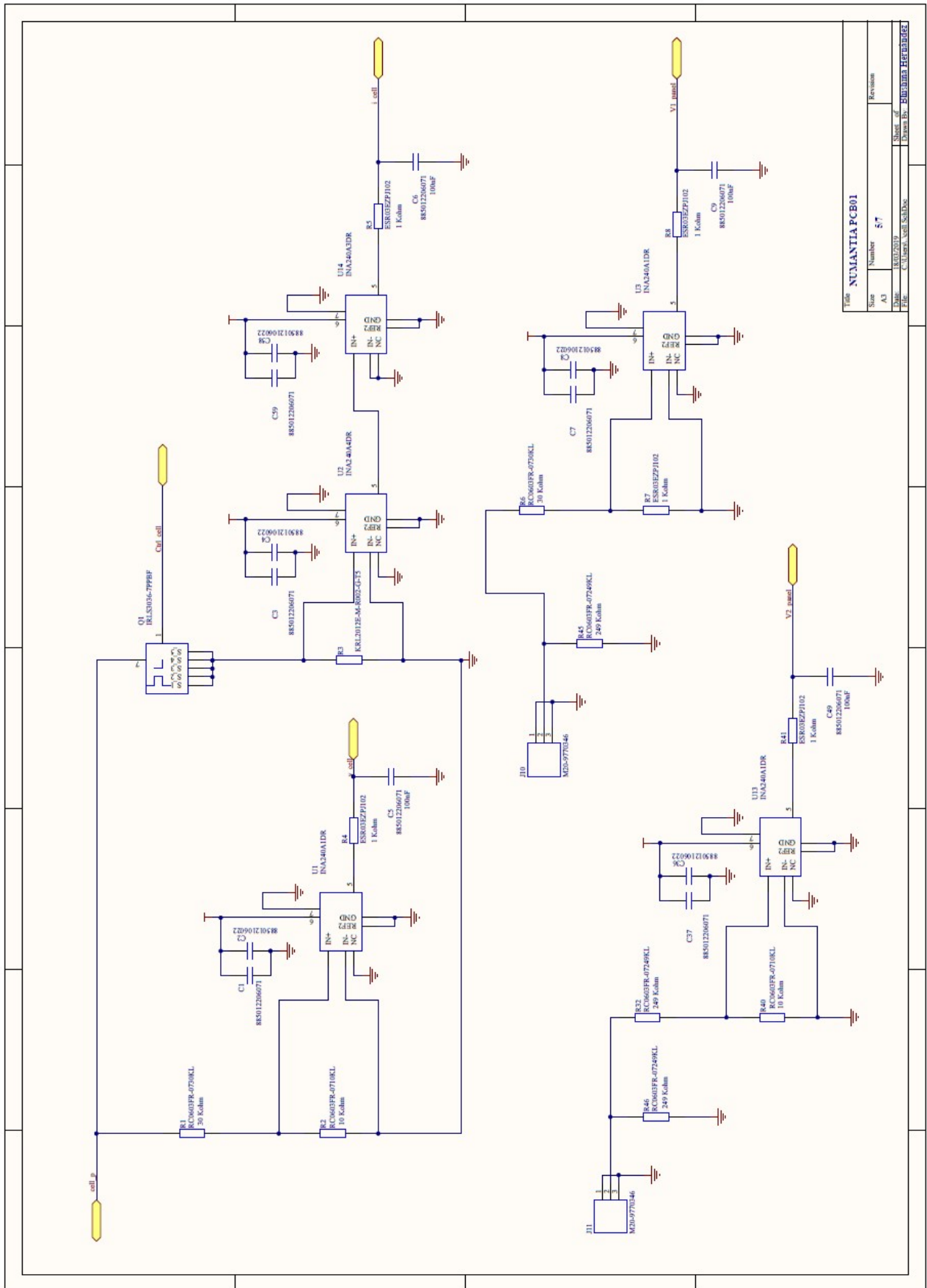


Figura 41 – Esquemático 5/7 Numantia

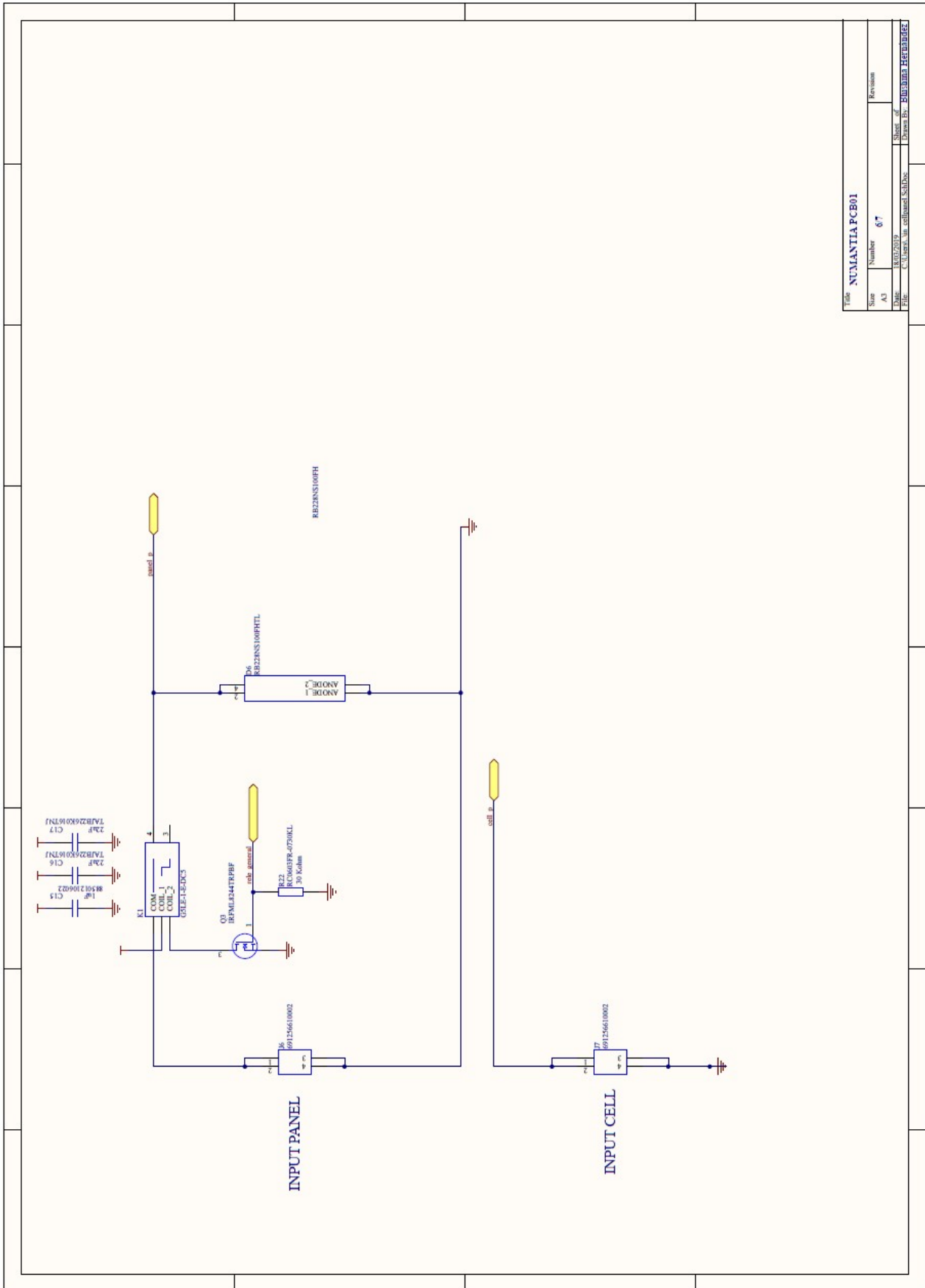
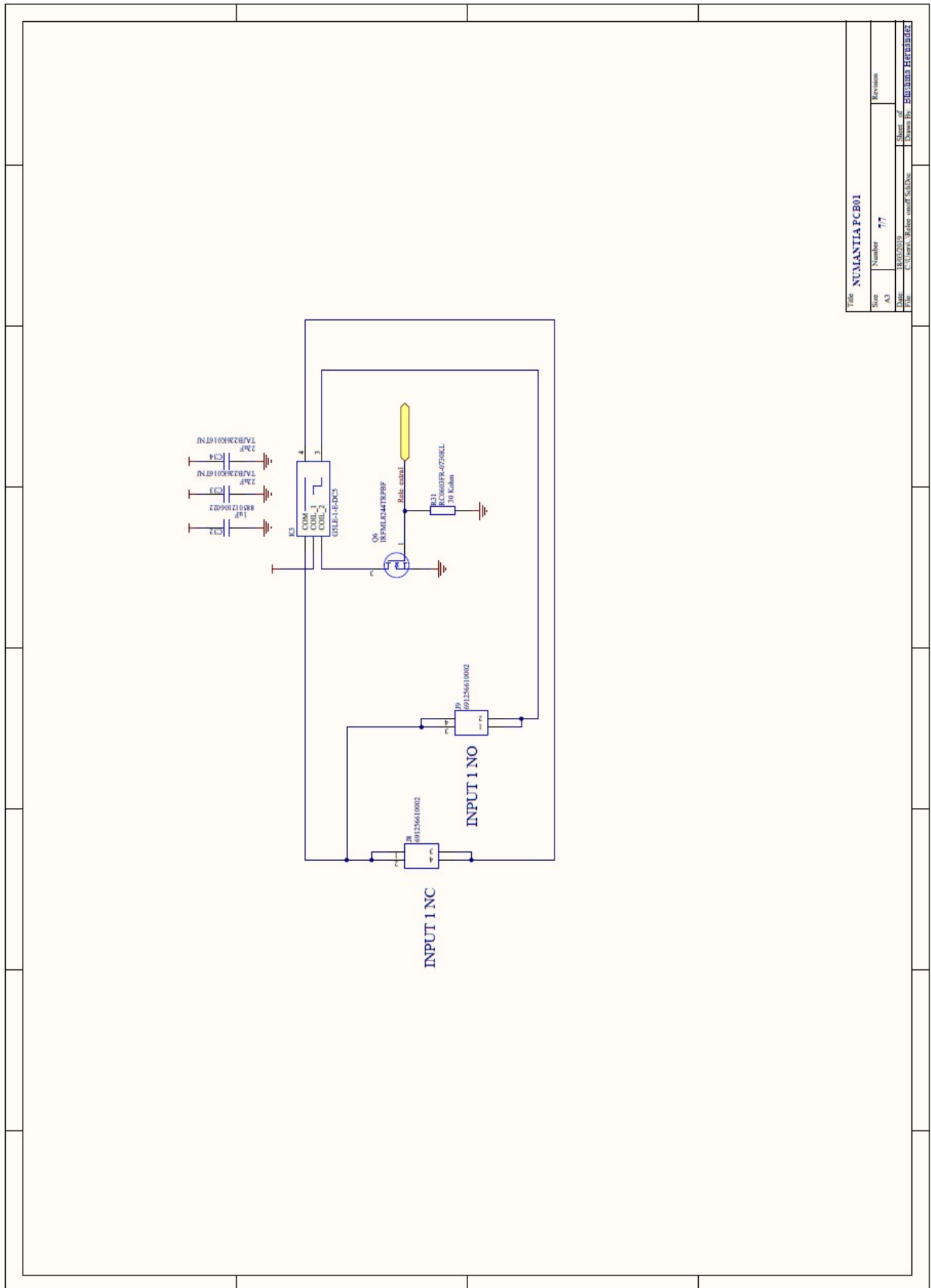


Figura 42 – Esquemático 6/7 Numantia



Title		NUMANTIA PCB01	
Size	Number	Revision	
A3	7/7		
Date	13/02/2019	Sheet of	2
File	C:\Users\Bhishma\Documents	Drawn By	BHISHMA HERNANDEZ

Figura 43 – Esquemático 7/7 Numantia

7.5. ANEXO V: Layout de NUMANTIA.

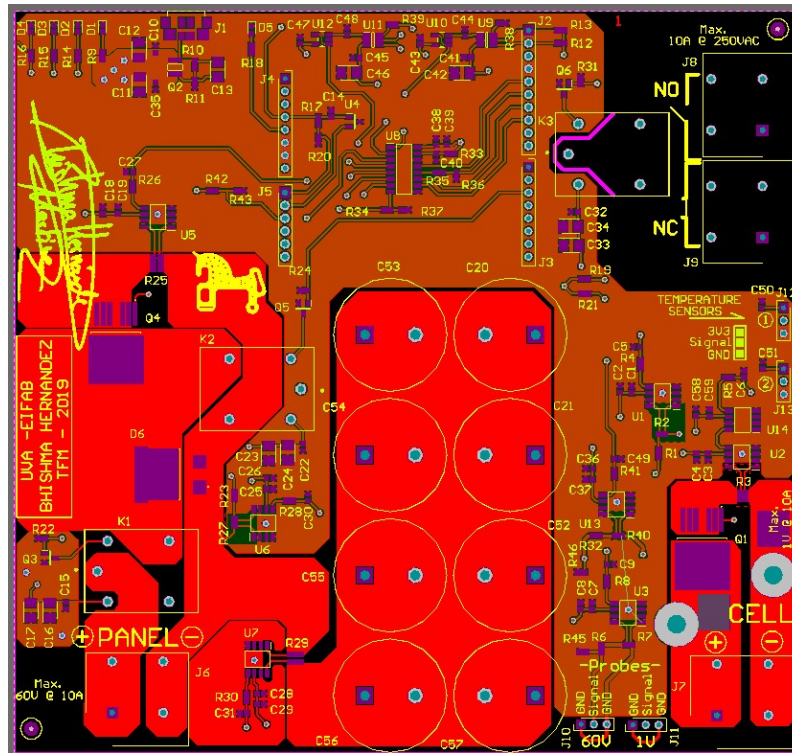


Figura 44 – Top Layer Numantia

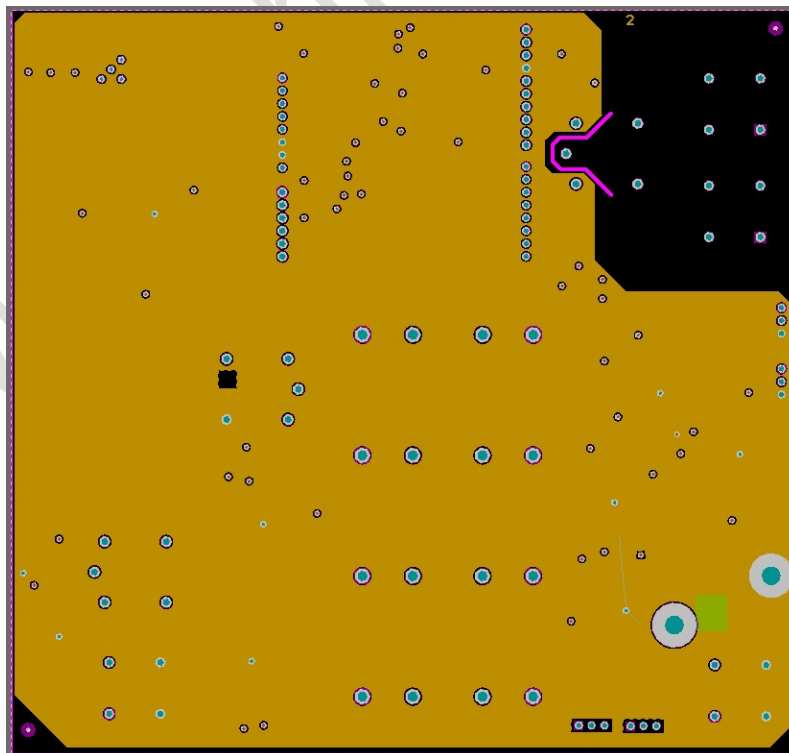


Figura 45 – Layer 2 Numantia

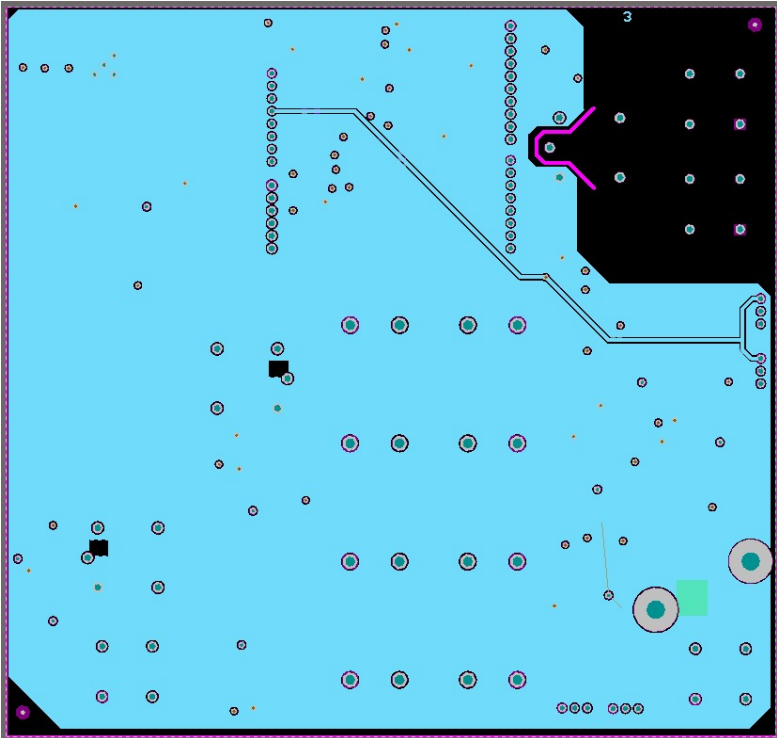


Figura 46 – Layer 3 Numantia

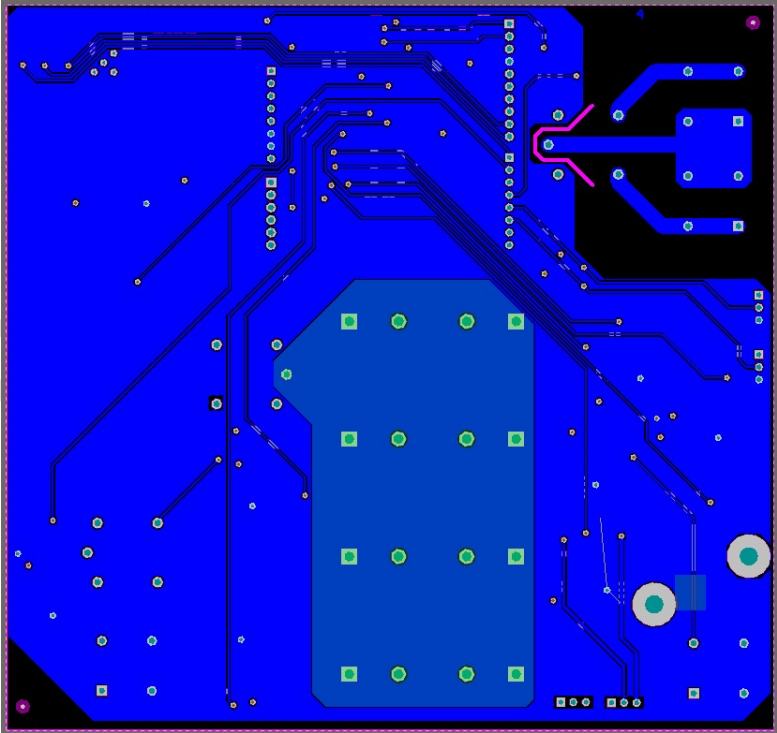


Figura 47 – Bottom Layer Numantia

7.6. ANEXO VI: Bill of Materials NUMANTIA.

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
885012206071	Würth Elektronik 0603 WCAP-C5GP 100nF Ceramic Multilayer Capacitor, 25 V dc, +125C, X7R Dielectric, 10%	C1, C3, C5, C6, C7, C9, C14, C18, C25, C27, C	CAPC1608X100N	885012206071	26
885012106022	Würth Elektronik 0603 WCAP-C5GP1F Ceramic Multilayer Capacitor, 25 V dc, +85C, X5R Dielectric, 20%	C2, C4, C8, C10, C15, C19, C22, C26, C29, C3	CAPC1608X95N	885012106022	14
TAJ1B226K0161TUJ	Tantalum Capacitors - Solid SMD 16volts 22uF 10% 1210 SMD Auto	C11, C12, C13, C16, C17, C23, C24, C33, C34	CAPP3328X210N	TAJ1B226K0161TUJ	11
SLPX102M100A3P3	Cornell-Dubilier Aluminum Electrolytic Capacitor SLPX Series 100V dc 1000uF, Through Hole Electrolytic, +/-20%, +85C	C20, C21, C52, C53, C54, C55, C56, C57	CAPP4D100W190D2250H3200	SLPX102M100A3P3	8
1500608575000	LED, Würth Elektronik, 1500608575000 Würth Elektronik 1500608575000, WL-SMCMW Series Blue LED, 470 nm 1608 (0603) (4)	D1, D2, D3, D4, D5	LED1608X80N	1500608575000	5
RB228N5100FH1L	Schottky Diodes & Rectifiers 100V Vr 30A Io SBD TO-263S(2PAK) SA	D6	RB228N5100FH1L	RB228N5100FH1L	1
ZX62M-B-5P(30)	HIROSE(HRS) - ZX62M-B-5P(30) - MICRO USB, 2.0 TYPE B, RCPT, SMT	J1	ZX62M-B-5P(30)	ZX62M-B-5P(30)	1
PRT-11376	2.54mm pitch Socket, single row, straight, 10 position	J2	SHDR10W107PDX254_T1X0_2595X250X865F	PRT-11376	1
PRT-09279	2.54mm pitch Socket, single row, straight, 8 position	J3, J4	SHDR6W64POX254_T1X8_2082X250X870P	PRT-09279	2
PRT-09280	Arduino Stackable Header - 6 Pin	J5	SHDR6W80POX254_T1X6_1579X250X865P	PRT-09280	1
691256610002	2 Position Wire to Board Terminal Block Horizontal with Beard 0.400 (10.16mm) Through Hole*	J6, J7, J8, J9	SHDR4W120P1016_2X2_2032X1830X2940P	691256610002	4
M20-9770346	Headers & Wire Housings 03 SIL VERTICAL PIN HEADER TIN	J10, J11, J12, J13	HDR3W3M66POX254_T1X3_762X254X830P	M20-9770346	4
G5LE-1-E-DC5	General Purpose Relay Power PCB Relay 5PDT 5VDC	K1, K2, K3	G5LE-1	G5LE-1-E-DC5	3
CPH6354-TL-W	ON SEMICONDUCTOR - CPH6354-TL-W - MOSFET, P-CH, -60V, -4A, SOT-26	Q1, Q4	IRB240N0454R9ATMA1	IRLS3036-7PPBF	2
IRFML8244TRPBF	MOSFET MOSFT 25V 5.8A 24mOhm 5.4 Qg	Q3, Q5, Q6	SOT195P280X105-SN	CPH6354-TL-W	1
RC0603FR-0730KL	Thick Film Resistors - SMD 30K OHM 1%	R1, R6, R22, R24, R31	SOT195P237X112-3N	IRFML8244TRPBF	3
RC0603FR-0710KL	Yageo RC Series Thick Film Surface Mount Resistor 0603 Case 10k	R2, R10, R34, R37, R40	RES1608X55N	RC0603FR-0730KL	5
KRL2012E-M-R002-G	Current Sense Resistors - SMD 1W 2m ohm 2%	R3	RES1608X55N	KRL2012E-M-R002-G	1
ESR03EPJ102	Thick Film Resistors - SMD 0603 1kohm 5% Ant Surge AEC-Q200	R4, R5, R7, R8, R11, R26, R27, R28, R30, R3	RES1608X55N	ESR03EPJ102	12
RC0603FR-073K09L	YAGEO - RC0603FR-07470RL - RES, THICK FILM, 470R, 1%, 0.1W, 0603, REEL	R9, R14, R15, R16, R18, R33	RES1608X55N	RC0603FR-073K09L	6
RC0603FR-07249KL	Thick Film Resistors - SMD 249K OHM 1%	R23, R32, R45, R46	RES1608X55N	RC0603FR-07249KL	4
WU732B15TTD20L0F	Current Sense Resistors - SMD 20m ohm 1% 1.5W AEC-Q200	R25, R29	RES1631X70N	WU732B15TTD20L0F	2
INA240A1DR	80V, Low-/High-Side, Bi-Directional, Zero-Drift, Current Sense Amp w/Enhanced PWM Rejection	U1, U3, U5, U6, U7, U13	SOIC127P600X175-8N	INA240A1DR	6
INA240A4DR	80V, Low-/High-Side, Bi-Directional, Zero-Drift, Current Sense Amp w/Enhanced PWM Rejection	U2	SOIC127P600X175-8N	INA240A4DR	1
MCP9701AT-E_TT	Temperature sensor -40 to +125 degC Microchip MCP9701AT-E-TT Temperature Sensor, -40 +125 C, 3-Pin SOT-23	U4	SOT195P237X112-3N	MCP9701AT-E_TT	1
MCP3208-CL5L	12bit A-D Converter, MCP3208-CL5L T550P16	U8	SOIC127P600X175-16N	MCP3208-CL5L	1
MCP4725A0T-E-CH	D/A Converter 12-Bit EEPROM 12C SOT23-6	U9, U11	SOT195P270X145-5N	MCP4725A0T-E-CH	2
TLV2461DBVR	Family of Low power rail to rail input/output operational amplifiers with shutdown	U10, U12	SOT195P280X145-5N	TLV2461DBVR	2
INA240A3DR	80V, Low-/High-Side, Bi-Directional, Zero-Drift, Current Sense Amp w/Enhanced PWM Rejection	U14	SOIC127P600X175-8N	INA240A3DR	1
<b>TOTAL</b>					<b>146</b>

Tabla 5 – Lista de componentes de Numantia



## 7.7. ANEXO VII: Backend microcontrolador NUMANTIA.

```

/*
 * BHISHMA HERNANDEZ MARTINEZ
 * TRABAJO FIN DE MASTER 2019
 * UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
 *
 * DATE:20190128
 * VERSION v0.1
 */

#define VERSION "0.1"

// #include <avr/dtostrf.h>
// #include <stdlib.h>
#include <SPI.h>
// #include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

#include <DallasTemperature.h>
// Data wire is plugged into port 3 on the Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 3
#define TEMPERATURE_PRECISION 12 // Lower resolution

// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices (not just Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);

int numberOfDevices; // Number of temperature devices found

DeviceAddress tempDeviceAddress; // We'll use this variable to store a found device address

#include <MCP3XXX.h>
MCP3008 adc;

#include <Adafruit_MCP4725.h>
Adafruit_MCP4725 dac1; // DAC 60V control
Adafruit_MCP4725 dac2; // DAC 1V control
// For Adafruit MCP4725A1 the address is 0x62 (default) or 0x63 (ADDR pin tied to VCC)
// For MCP4725A0 the address is 0x60 or 0x61
// For MCP4725A2 the address is 0x64 or 0x65

// valor con 12 bits (de 0 a 4095)
// habrá que convertir entre cuentas y mV
// dacONE.setVoltage(valor, false);

// GLOBAL DEFINITIONS -----
const int LED1=9; // Blue LEDS
const int LED2=8;
const int LED3=7;

const int Relee1=6; // Relee General
const int Relee2=5; // Relee medición con condensador
const int Relee3=4; // Relee Extra

int RefNumantia = A2; // Temp sensor installed on PCB is on PIN=A1
int temp_pcb = A1; // Temp sensor installed on PCB is on PIN=A1
int RefArduino = A0; // Temp sensor installed on PCB is on PIN=A1

const int v_panel=0;
const int i_panel_C=1;
const int i_panel=2;
const int v_cell=3;
const int i_cell=4;
const int V1_probe=5;
const int V2_probe=6;
const int brd_rev=7;
const float Vinc=0.05; // Only print 0.1V changes

float V5ref = 0.0;

float GPV = 0.0;
int GPVoff = 16; // Offset in Counts
float GPVg = 1.1405;
float GPI = 0.0;
int GPIoff = 0; // Offset in Counts

```

```

float GPIg = 1.0;

// END GLOBAL DEFINITIONS -----

// ===== SETUP CODE =====
void setup() {

  // initialize the LCD oooooooooooooooooooooooooooooo
  lcd.begin();

  // Turn on the backlight and print a message.
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor (0,0) ;lcd.print("BHISHMA HERNANDEZ M.");
  lcd.setCursor (0,1) ;lcd.print(" ...INITIALIZING... ");
  lcd.setCursor (0,2) ;lcd.print(":-) Testing LCD (-:");
  // END initialize the LCD oooooooooooooooooooooooooooooo

  // initialize Blue LEDS oooooooooooooooooooooooooooooo
  pinMode(LED1,OUTPUT); // Configure pins as output
  pinMode(LED2,OUTPUT);
  pinMode(LED3,OUTPUT);
  pinMode(Relee1,OUTPUT);
  pinMode(Relee2,OUTPUT);
  pinMode(Relee3,OUTPUT);

  digitalWrite(Relee1,LOW); // Configure relee OFF
  digitalWrite(Relee2,LOW);
  digitalWrite(Relee3,LOW);
  digitalWrite(LED1,LOW); // Configure pins LOW state
  digitalWrite(LED2,LOW);
  digitalWrite(LED3,LOW);

  // END initialize Blue LEDS oooooooooooooooooooooooooooooo

  // initialize ADC TEMP PCB oooooooooooooooooooooooooooooo
  pinMode(temp_pcb,INPUT); // Configure pins as ADC (10 bits)
  pinMode(RefNumantia,INPUT);
  pinMode(RefArduino,INPUT);
  // Formula X[mV] = ADC * (3300/1023) 10bit
  // TempPCB[°C] = ( X[mV] - 400 ) / 19.5
  // END initialize ADC TEMP PCB oooooooooooooooooooooooooooooo

  // initialize DAC oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
  dac1.begin(0x60);
  dac2.begin(0x61);
  // END initialize DAC oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

  // initialize SPI oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
  pinMode(13,OUTPUT); // SPI SCK
  pinMode(12,OUTPUT); // SPI MISO
  pinMode(11,OUTPUT); // SPI MOSI
  pinMode(10,OUTPUT); // SPI SS
  // END initialize SPI oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

  // initialize ADC oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo
  adc.begin();
  // adc.begin(SS, MOSI, MISO, SCK);
  adc.begin(10, 11, 12, 13);
  // adc.analogRead(i) // i=channel
  // CH0: V_panel
  // CH1: i_panel_C
  // CH2: i_panel
  // CH3: v_cell
  // CH4: i_cell
  // CH5: V1_probe
  // CH6: V2_probe
  // CH7: brd_rev
  // END initialize ADC oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

  Arranca(); // FLASHING LEDS to used feedback

  // initialize SERIAL PORT oooooooooooooooooooooooooooooo
  Serial.begin(115200); // Opens serial port, sets data rate to 115200bps
  SerialUSB.begin(115200); // Opens serial port, sets data rate to 115200bps

  while(!SerialUSB) {
  ; // Wait for serial port connection. Needed for native USB
  }

  SerialConnectionOn(); // FLASHING LEDS to used feedback

  digitalWrite(LED1,HIGH); // LED1 => SYSTEAM CONNECTED AND READY

```

```

IntroTitle();

// END initialize SERIAL PORT oooooooooooooooooooooooooooooo

lcd.setCursor (0,3) ;lcd.print("Llegamos al codigoXX");

// initialize DAC values oooooooooooooooooooooooooooooooooo
dac1.setVoltage(0, false);
dac2.setVoltage(0, false);

// initialize Temp Sensor D18B20 oooooooooooooooooooooooooo
// Start up the library
sensors.begin();
// Grab a count of devices on the wire
numberOfDevices = sensors.getDeviceCount();

// locate devices on the bus
SerialUSB.print("Locating devices...");

SerialUSB.print("Found ");
SerialUSB.print(numberOfDevices, DEC);
SerialUSB.println(" devices.");

// report parasite power requirements
SerialUSB.print("Parasite power is: ");
if (sensors.isParasitePowerMode()) SerialUSB.println("ON");
else SerialUSB.println("OFF");

// Loop through each device, print out address
for(int i=0;i<numberOfDevices; i++)
{
  // Search the wire for address
  if(sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i))
  {
    SerialUSB.print("Found device ");
    SerialUSB.print(i, DEC);
    SerialUSB.print(" with address: ");
    printAddress(tempDeviceAddress);
    SerialUSB.println();

    SerialUSB.print("Setting resolution to ");
    SerialUSB.println(TEMPERATURE_PRECISION, DEC);

    // set the resolution to TEMPERATURE_PRECISION bit (Each Dallas/Maxim device is capable of several different
    resolutions)
    sensors.setResolution(tempDeviceAddress, TEMPERATURE_PRECISION);

    SerialUSB.print("Resolution actually set to: ");
    SerialUSB.print(sensors.getResolution(tempDeviceAddress), DEC);
    SerialUSB.println();
  }else{
    SerialUSB.print("Found ghost device at ");
    SerialUSB.print(i, DEC);
    SerialUSB.print(" but could not detect address. Check power and cabling");
  }
}

// It responds almost immediately. Let's print out the data
sensors.requestTemperatures();
printTemperature(tempDeviceAddress); // Use a simple function to print out the data

}
// ===== ENDS SETUP CODE =====

// ===== MAIN CODE =====
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  if (SerialUSB.available()){
    String TermCom;
    TermCom=SerialUSB.readStringUntil('\n');

    if (TermCom=="VOL") {
      SerialUSB.print(" Voltage today = ");
      SerialUSB.println(analogRead(temp_pcb)*(3300.0 / 1023 ));
    }

    if (TermCom=="TempPCB") {
      SerialUSB.print("TempPCB=");
      SerialUSB.println((TempPCB_d()),2);
      SerialUSB.println("FIN;");
    }
  }
}

```

```
if (TermCom=="Meas60v") {
    digitalWrite(LED3,HIGH);
    SerialUSB.println("measure60iv");
    measure60iv();
    SerialUSB.println("FIN;");
    digitalWrite(LED3,LOW);
}

if (TermCom=="Numantia") {
    SerialUSB.println("Numantia = ");
    SerialUSB.println(analogRead(RefNumantia)*(3300.0 / 1023.0 ));
    SerialUSB.println("FIN;");
    digitalWrite(LED3,LOW);
}

if (TermCom=="Arduin0") {
    SerialUSB.println("Arduino = ");
    SerialUSB.println(analogRead(RefArduino)*(3300.0 / 1023.0 ));
    SerialUSB.println("FIN;");
    digitalWrite(LED3,LOW);
}

if (TermCom=="PCB_REV") {
    SerialUSB.println("PCB REVISION = ");
    SerialUSB.println(adc.analogRead(7)*(5000.0 / 1023.0 ));
    SerialUSB.println("FIN;");
    digitalWrite(LED3,LOW);
}

if (TermCom=="DACTest") {
    SerialUSB.println("Testing DAC 1 and 2");
    digitalWrite(LED3,HIGH);

    for(int i=0;i<=50;i++) {
        dac1.setVoltage(3276, false);
        dac2.setVoltage(3276, false);
        delay (500);
        dac1.setVoltage(1638, false);
        dac2.setVoltage(1638, false);
        delay (500);
    }

    dac1.setVoltage(0, false);
    dac2.setVoltage(0, false);
    SerialUSB.println("FIN;");
    digitalWrite(LED3,LOW);
}

if (TermCom=="MeasADC") {
    ReadADCnumantia();
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="dach") {
    dac1.setVoltage(4095, false);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="dacl") {
    dac1.setVoltage(0, false);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="CharacFPanel") {
    fCharacFPanel ();
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="Panel") {
    measure60iv ();
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="Relee10") {
    SerialUSB.println("Main Relee OFF");
    digitalWrite(Relee1,LOW);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="Relee11") {
```

```

    SerialUSB.println("Main Relee ON");
    digitalWrite(Relee1,HIGH);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="Relee30") {
    SerialUSB.println("Relee Extra OFF");
    digitalWrite(Relee3,LOW);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="Relee31") {
    SerialUSB.println("Relee Extra ON");
    digitalWrite(Relee3,HIGH);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="MeasVmodule") {
    SerialUSB.println(((adc.analogRead(0)-GPVoff)*GPV));
    SerialUSB.println("FIN;");
}

if (TermCom=="TempDS18") {

    SerialUSB.println("");
    sensors.requestTemperatures();
    printTemperature(tempDeviceAddress);
    SerialUSB.println("FIN;");
}

}

delay(300);
digitalWrite(LED2,!digitalRead(LED2));
lcd.setCursor (0,3) ;lcd.print("Voltage=");
lcd.print((analogRead(temp_pcb)*(3300.0 / 1023.0 )),2);
}
// ===== ENDS MAIN CODE =====

// FUNTIONS DEFINITION oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

// ----- DALLAS TEMPERATURE SENSOR
// function to print a device address
void printAddress(DeviceAddress deviceAddress)
{
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
    {
        if (deviceAddress[i] < 16) SerialUSB.print("0");
        SerialUSB.print(deviceAddress[i], HEX);
    }
}

void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
{
    float tempC = sensors.getTempC(deviceAddress);
    if(tempC == DEVICE_DISCONNECTED_C)
    {
        SerialUSB.println("Error: Could not read temperature data");
        return;
    }
    SerialUSB.print("Temp C: ");
    SerialUSB.println(tempC);
}
// ----- DALLAS TEMPERATURE SENSOR

// ----- SOLAR MODULE CHARACTERIZATION
void fCharacFPanel () {
    VSref = (analogRead(RefNumantia)*(3.3 / 1023.0 )*2);
    GPV = (((analogRead(RefNumantia)*(3.3 / 1023.0 )*2) / 1023.0 )*12.5*GPVg);
    GPI = ((analogRead(RefNumantia)*(3.3 / 1023.0 )*2) / ( 1023.0 * 0.02 * 20.0 )*GPIg);
    SerialUSB.println(" ");
    SerialUSB.println("SOLAR MODULE CHARACTERIZATION ");

    float VarVmax=0.0;
    float VarImax=0.0;
    float VarPmax=0.0;
    float VarPmax_t=0.0;
    float Voc=0.0;
    float Isc=0.0;
}

```

```

digitalWrite(LED3,HIGH);
dac1.setVoltage(0, false);
delay(50);
SerialUSB.print("Voc = ");
Voc=((adc.analogRead(0)-GPVoff)*GPV);
SerialUSB.print(Voc);
SerialUSB.print(" [V] Ioc = ");
SerialUSB.print((adc.analogRead(2)-GPIoff)*GPI);
SerialUSB.println(" [A]");

for(int i=1;i<=4094;i++) {
  dac1.setVoltage(i, false);
  //delay (10);
  VarPmax_t= (((adc.analogRead(0)-GPVoff)*GPV*((adc.analogRead(2)-GPIoff)*GPI)));

  if ( VarPmax_t > VarPmax ) {
    VarVmax = ((adc.analogRead(0)-GPVoff)*GPV);
    VarImax = ((adc.analogRead(2)-GPIoff)*GPI);
    VarPmax= VarVmax * VarImax;
  }
}

SerialUSB.print("Vmax = ");
SerialUSB.print(VarVmax);
SerialUSB.print(" [V] Imax = ");
SerialUSB.print(VarImax);
SerialUSB.print(" [A] Pmax = ");
VarPmax = VarVmax*VarImax;
SerialUSB.print(VarPmax);
SerialUSB.println(" [W]");

dac1.setVoltage(4095, false);
delay(50);

SerialUSB.print("Vsc = ");
SerialUSB.print((adc.analogRead(0)-GPVoff)*GPV);
SerialUSB.print(" [V] Isc = ");
Isc=((adc.analogRead(2)-GPIoff)*GPI);
SerialUSB.print(Isc);
SerialUSB.println(" [A]");
SerialUSB.print("FF = ");
SerialUSB.println((VarVmax*VarImax)/(Voc*Isc));
dac1.setVoltage(0, false);
digitalWrite(LED3,LOW);
}
// ----- SOLAR MODULE CHARACTERIZATION
// ----- LED CONNECTION FLASHING
void Arranca(){
  for (int i=0;i<=4;i++){ // Indicates user system connected
    digitalWrite(LED1,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED1,LOW);
    digitalWrite(LED2,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED2,LOW);
    digitalWrite(LED3,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED3,LOW);
  }
}
// ----- LED CONNECTION FLASHING
// ----- READ NUMANTIA ADC
void ReadADCnumantia(){
  SerialUSB.print("CH0 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(0));
  SerialUSB.print("CH1 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(1));
  SerialUSB.print("CH2 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(2));
  SerialUSB.print("CH3 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(3));
  SerialUSB.print("CH4 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(4));
  SerialUSB.print("CH5 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(5));
  SerialUSB.print("CH6 = ");
  SerialUSB.println(adc.analogRead(6));
  SerialUSB.print("CH7 = ");
}

```

```

    SerialUSB.println(adc.analogRead(7));
}
// ----- READ NUMANTIA ADC

// ----- LED CONNECTION FLASHING
void SerialConnectionOn(){
  for (int i=0;i<=4;i++){ // Indicates user system connected
    digitalWrite(LED1,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED1,LOW);
    digitalWrite(LED2,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED2,LOW);
    digitalWrite(LED3,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED3,LOW);
  }

  for (int i=0;i<=3;i++){ // Indicates user system connected
    delay(200);
    digitalWrite(LED1,HIGH);
    digitalWrite(LED2,HIGH);
    digitalWrite(LED3,HIGH);
    delay(200);
    digitalWrite(LED1,LOW);
    digitalWrite(LED2,LOW);
    digitalWrite(LED3,LOW);
  }
}
// ----- LED CONNECTION FLASHING

// ----- INTRO INFORMATION
void IntroTitle(){
  SerialUSB.println("
  SerialUSB.println("=====");
  SerialUSB.println(" WELCOME. I was taught the way of progress is neither swift nor easy
  SerialUSB.println("
  SerialUSB.println("
  SerialUSB.println("          bsdfg      .
  SerialUSB.println("  `t--shd Nd: `My      :ddo      `M/
  SerialUSB.println(" .:ohh yM  Mo  Ny      `sd      mo
  SerialUSB.println(" dd+- /Mo NN` ms          hs`+s.  `/s+xryy- .oys.  _.-:-.
  SerialUSB.println(" +MNhsydh: BHISHMA  ++      -ossyo sN dd  `h Mo sNsd -dh      :yy +oN/
  SerialUSB.println(" :My `dN. Nm  Ny      :M/      -Nh      oM /M-      dM MM- dh      `Ns` +M/
  SerialUSB.println(" -Md -mN. NM  Ms  hN`      -//ody` yM  Ms  hM  Md  hh      sd+ dN+.
  SerialUSB.println(" sMN+ mh- mM  Ms`  dN      Nh`  ym  mh  hM-  Mh  +myy:  bhishmasysso
  SerialUSB.println(" TFM-2019 Nd  dNds .syys BHISHMA` gh  78      op  ty  789      -*/
  SerialUSB.println("

  if ((analogRead(RefNumantia)*(3300.0 / 1023.0 ))>2000.0){
  SerialUSB.println(" GOOD!!! NUMANTIA IS PRESENT  :-")
  } else {
  SerialUSB.println(" Ooooppss Numantia is NOT PRESENT  :-(
  }

  SerialUSB.println("
  SerialUSB.println("= COMMANDS:
  SerialUSB.println(" ? --> Print all available commands
  SerialUSB.println(" TempPCB --> Print ambient temperature in ADC counts
  SerialUSB.println(" TempPCB_d --> Print ambient temperature on degrees
  SerialUSB.println(" Meas60v --> Print all IV values from 60V channels
  SerialUSB.println(" CharacFPanel
  SerialUSB.println(" Panel
/* SerialUSB.print("GPV =");
  SerialUSB.println(GPV);
  SerialUSB.print("GPI =");
  SerialUSB.println(GPI);
  SerialUSB.print("GPVg =");
  SerialUSB.println(GPVg);
  SerialUSB.print("GPIg =");
  SerialUSB.println(GPIg);
  SerialUSB.print("V5ref =");
  SerialUSB.println(V5ref);
*/

  SerialUSB.print(" Temperature today = ");
  SerialUSB.print(TempPCB_d());
  SerialUSB.println(" °C");
  SerialUSB.println("=====");
}
// ----- INTRO INFORMATION

// ----- PCB TEMPERATURE

```

```

float TempPCB_d(){
    float val;
    val = ( (analogRead(temp_pcb) + analogRead(temp_pcb)+ analogRead(temp_pcb)+ analogRead(temp_pcb))>>2);
    val = ( val *(3300.0 / 1023.0 ) - 400.0 ) / 19.5;
    //val = round(val*100)/100; // Return only two decimals
    return val;
}
// ----- PCB TEMPERATURE

// ----- AVERAGE MEASURED VALUES
float VmeasAVG (){
    return ((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2);
}

float ImeasAVG(){
    return ((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2);
}

int PrmeasAVG(){
    return ((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2);
}
// ----- AVERAGE MEASURED VALUES

// ----- MEASURE IV on 60V channel
void measure60iv(){

    float BeforeValue=0.0;
    float T; // Target
    float V; // Voltage measure
    float I; // Current measure
    int Pr; // Probe Voltage measure

    SerialUSB.println("===== START MEASURES IV =====");
    SerialUSB.println("===== START MEASURES IV =====");
    SerialUSB.print("DAC[12bits_Counts];");
    SerialUSB.print("V[12bits_Counts];");
    SerialUSB.print("I[12bits_Counts];");
    SerialUSB.println("Probe[12bits_Counts];");
    // Configure DAC to 0V

    // ----- Measure first value (Voc)
    dac1.setVoltage(0, false);
    T=0;
    //V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
    V=((VmeasAVG()-GPVoff)*GPV);
    BeforeValue=V;

    //I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);
    I=((ImeasAVG()-GPIoff)*GPI);

    //Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2);
    Pr=PrmeasAVG();
    PrintStringValues(T,V,I,Pr);

    // ----- Star Loop increment DAC Counts 001h
    // not use values less than 0.1V different, 7 counts
    for(int i=1;i<=4094;i++) {

        dac1.setVoltage(i, false);
        //V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
        //V=((V-GPVoff)*GPV);
        V=((VmeasAVG()-GPVoff)*GPV);

        if (((abs(V-BeforeValue))>Vincr)){
            BeforeValue=V;
            T=i;
            //I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);
            //I=((I-GPIoff)*GPI);
            I=((ImeasAVG()-GPIoff)*GPI);
        }

    }

    //Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2)*1.0);
    Pr=PrmeasAVG();
    PrintStringValues(T,V,I,Pr);
}

// Measure last value (Isc) FFFh
dac1.setVoltage(4095, false);
T=4095;
V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
V=((V-GPVoff)*GPV);
I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);

```



```

I=((I-GPIoff)*GPI);
Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2));
PrintStringValues(T,V,I,Pr);

delay(100);

// Measure first value (Isc) FFFh
dac1.setVoltage(4095, false);
T=4095;
V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
V=((V-GPVoff)*GPV);
BeforeValue=V;
I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);
I=((I-GPIoff)*GPI);
Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2));
PrintStringValues(T,V,I,Pr);

// Star Loop decrement DAC Counts
// not use values less than 0.1V different
for(int i=4094;i>=1;i--) {
  dac1.setVoltage(i, false);

  V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
  V=((V-GPVoff)*GPV);

  if ((abs(V-BeforeValue))>Vincr){
    BeforeValue=V;
    T=i;
    I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);
    I=((I-GPIoff)*GPI);
    Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2));
    PrintStringValues(T,V,I,Pr);
  }
}

// Measure last value (Voc) 000h
dac1.setVoltage(0, false);
delay(50);
T=0;
V=((adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel)+adc.analogRead(v_panel))>>2)*1.0);
V=((V-GPVoff)*GPV);
BeforeValue=V;
I=((adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel)+adc.analogRead(i_panel))>>2)*1.0);
I=((I-GPIoff)*GPI);
Pr=((adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe)+adc.analogRead(V1_probe))>>2));
PrintStringValues(T,V,I,Pr);
}
// ----- MEASURE IV on 60V channel

// ----- MEASURE IV values to print
void PrintStringValues(float DACcounts,float Vcounts, float Icounts, int Probecounts){
  // DAC conf; V_values; I_values; Probe_values

  // SerialUSB.print(valor DAC configurado);
  SerialUSB.print(DACcounts);
  SerialUSB.print(";");

  // SerialUSB.print(valor V);
  SerialUSB.print(Vcounts);
  SerialUSB.print(";");

  // SerialUSB.print(valor I);
  SerialUSB.print(Icounts);
  SerialUSB.print(";");

  // SerialUSB.print(valor DAC configurado);
  SerialUSB.print(Probecounts);
  SerialUSB.println(";");
}
// ----- MEASURE IV values to print

// END FUNTIONS DEFINITION oooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

```

7.8. ANEXO VIII: Backend programa de usuario NUMANTIA.

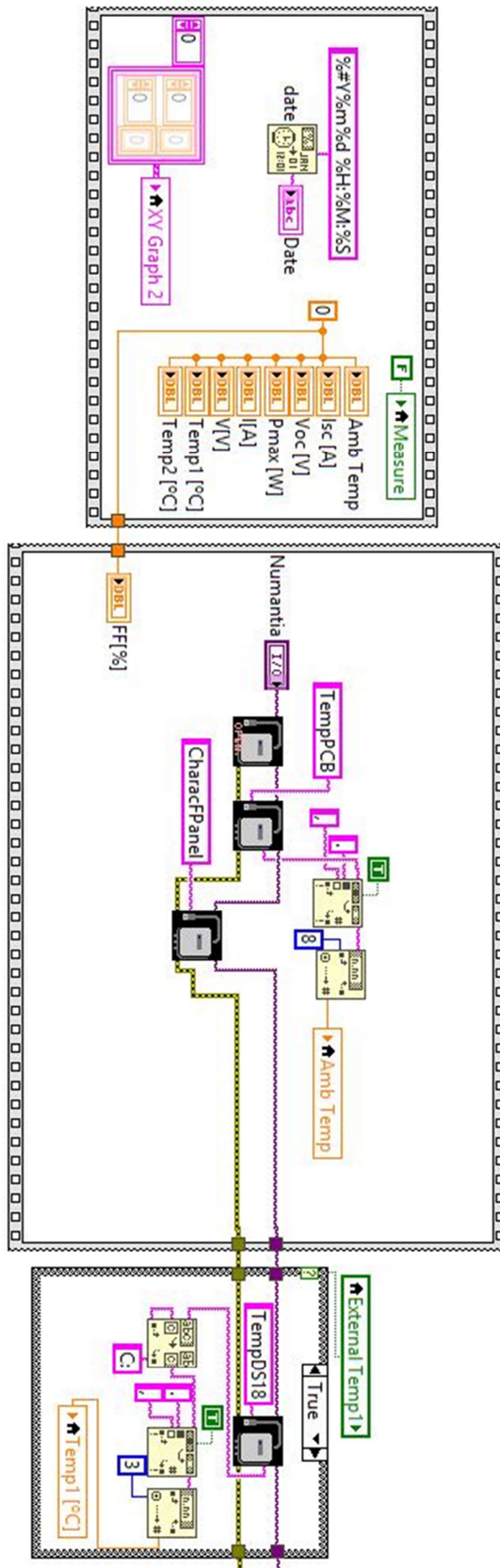


Figura 48 – Backend programa principal interfaz de usuario, inicialización

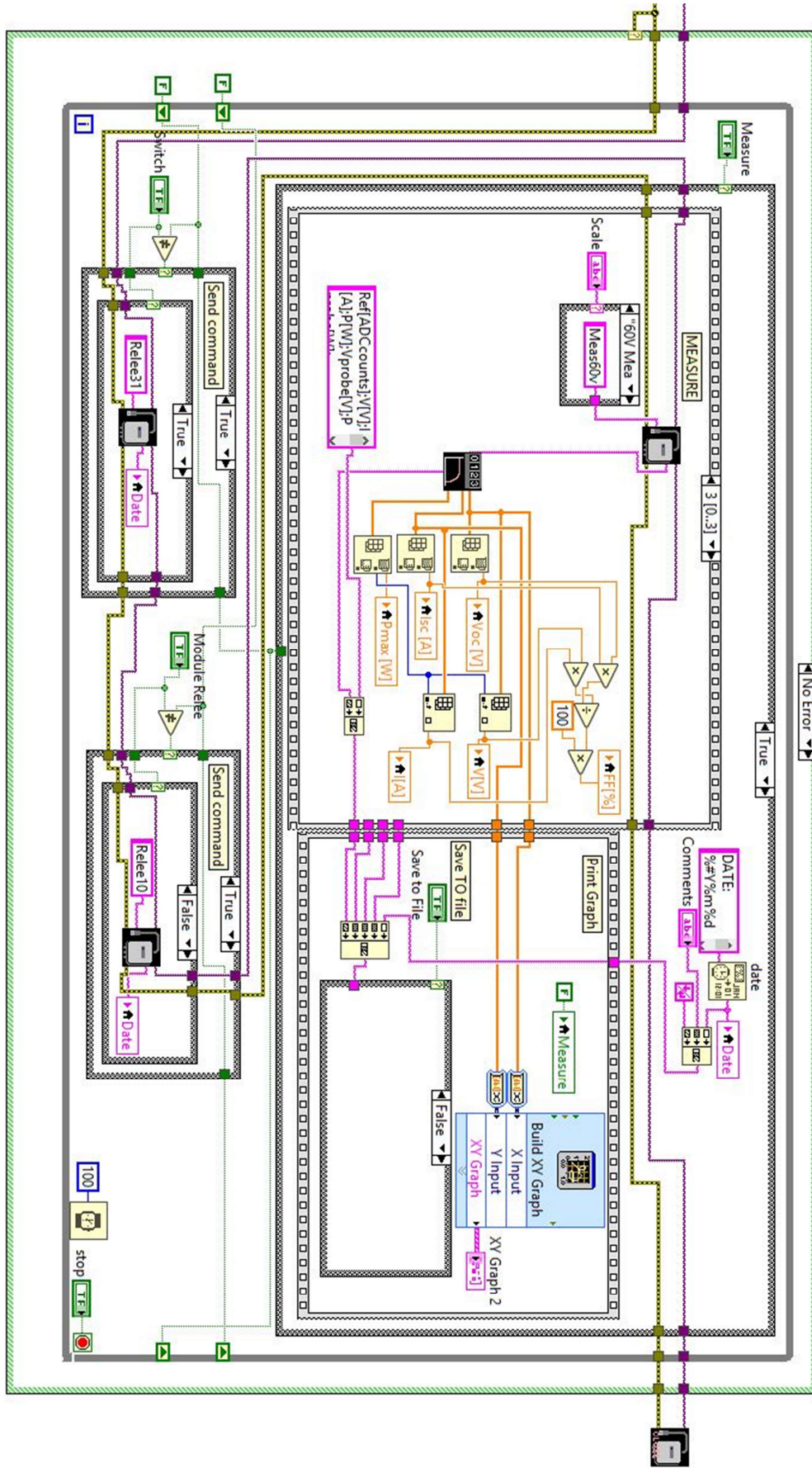


Figura 49 – Backend programa principal interfaz de usuario, control y visualización

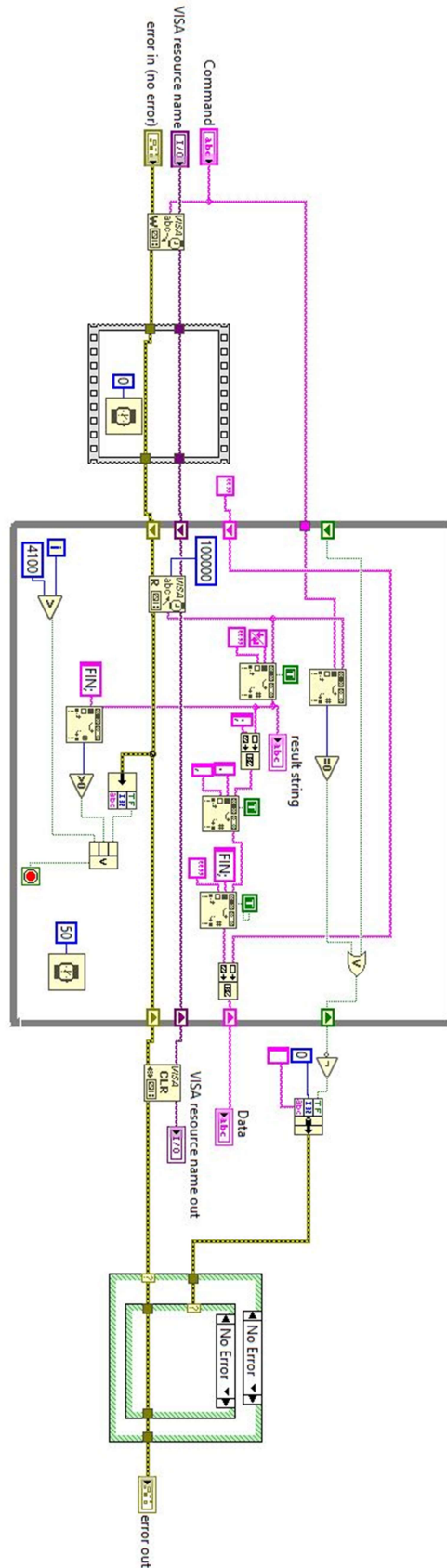


Figura 50 – Backend programa principal interfaz de usuario, módulo gestor de las comunicaciones

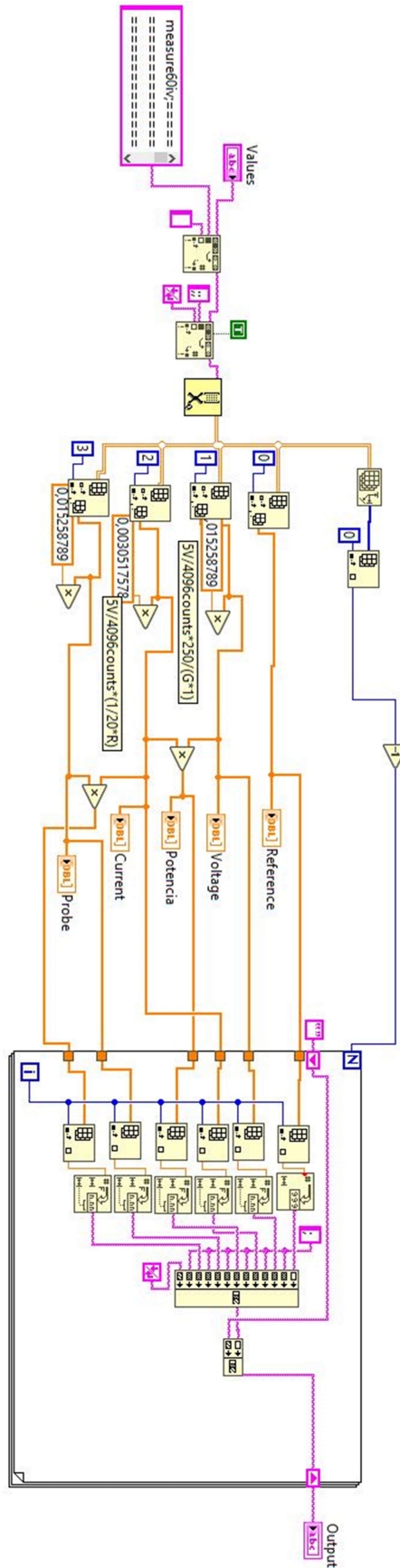


Figura 51 – Backend programa principal interfaz de usuario, módulo intérprete y acondicionador de datos

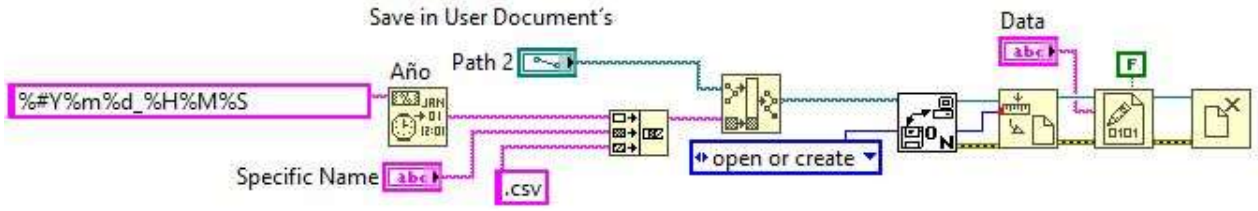


Figura 52 – Backend programa principal interfaz de usuario, módulo gestor del almacenado de las mediciones

7.9. ANEXO IX: Ficheros que genera el interfaz de usuario para ser archivados.


 20190705\_122741 SE3\_M\_i738

Figura 53 – Nombre de fichero generado que almacena todas las mediciones

	A	B	C	D	E	F
1	DATE: 2019070512:28:56					
2	External_Temp1[°C]=	41,19				
3	TempPCB=31,76					
4	Ref[ADCcounts]	V[V]	I[A]	P[W]	Vprobe[V]	Pprobe[W]
5	1341	37,79	0	0	0	0
6	1343	37,72	0	0	0	0
7	1344	37,79	0,01	0,3779	0	0
8	1347	37,72	0,01	0,3772	0	0
9	1348	37,79	0,01	0,3779	0	0
10	1350	37,72	0,01	0,3772	0	0
11	1351	37,79	0,01	0,3779	0	0
12	1355	37,72	0,01	0,3772	0	0
13	1356	37,79	0,01	0,3779	0	0
14	1453	37,72	0,06	2,2632	0	0
15	1455	37,64	0,06	2,2584	0	0
16	1456	37,72	0,06	2,2632	0	0
17	1458	37,64	0,06	2,2584	0	0
18	1459	37,72	0,08	3,0176	0	0
19	1461	37,64	0,08	3,0112	0	0
20	1462	37,72	0,08	3,0176	0	0
21	1469	37,64	0,11	4,1404	0	0
22	1471	37,57	0,13	4,8841	0	0
23	1472	37,64	0,14	5,2696	0	0
24	1476	37,57	0,15	5,6355	0	0
25	1477	37,5	0,15	5,625	0	0
			...			
746	1824	37,57	0,19	7,1383	0	0
747	1821	37,5	0,18	6,75	0	0
748	1820	37,57	0,18	6,7626	0	0
749	1818	37,5	0,16	6	0	0
750	1816	37,57	0,16	6,0112	0	0
751	1815	37,5	0,16	6	0	0
752	1813	37,57	0,16	6,0112	0	0
753	1811	37,5	0,16	6	0	0
754	1810	37,57	0,15	5,6355	0	0
755	1809	37,5	0,15	5,625	0	0
756	1805	37,57	0,15	5,6355	0	0
757	1804	37,64	0,14	5,2696	0	0
758	1803	37,57	0,14	5,2598	0	0
759	1802	37,5	0,14	5,25	0	0
760	1801	37,64	0,14	5,2696	0	0
761	1800	37,57	0,14	5,2598	0	0
762	1799	37,64	0,14	5,2696	0	0
763	1797	37,57	0,13	4,8841	0	0
764	1752	37,72	0,03	1,1316	0	0
765	1751	37,79	0,01	0,3779	0	0
766	1748	37,72	0,01	0,3772	0	0
767	1747	37,79	0,01	0,3779	0	0
768	1745	37,72	0,01	0,3772	0	0
769	1744	37,79	0,01	0,3779	0	0
770	1742	37,72	0,01	0,3772	0	0

Tabla 6 – Tabla de mediciones almacenada por el interfaz de usuario de Numantia

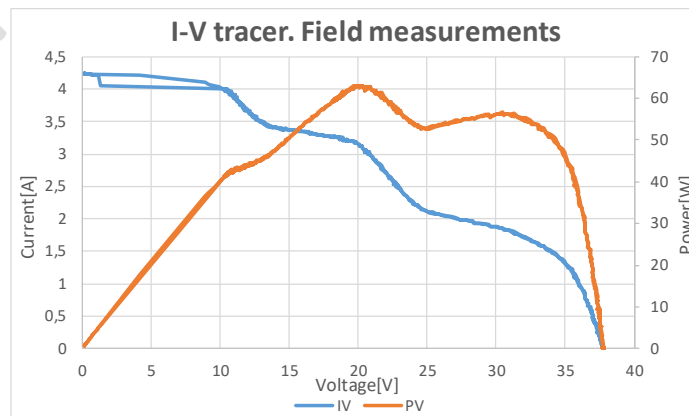


Figura 54 – Posterior visualización de las mediciones almacenadas por el interfaz de usuario

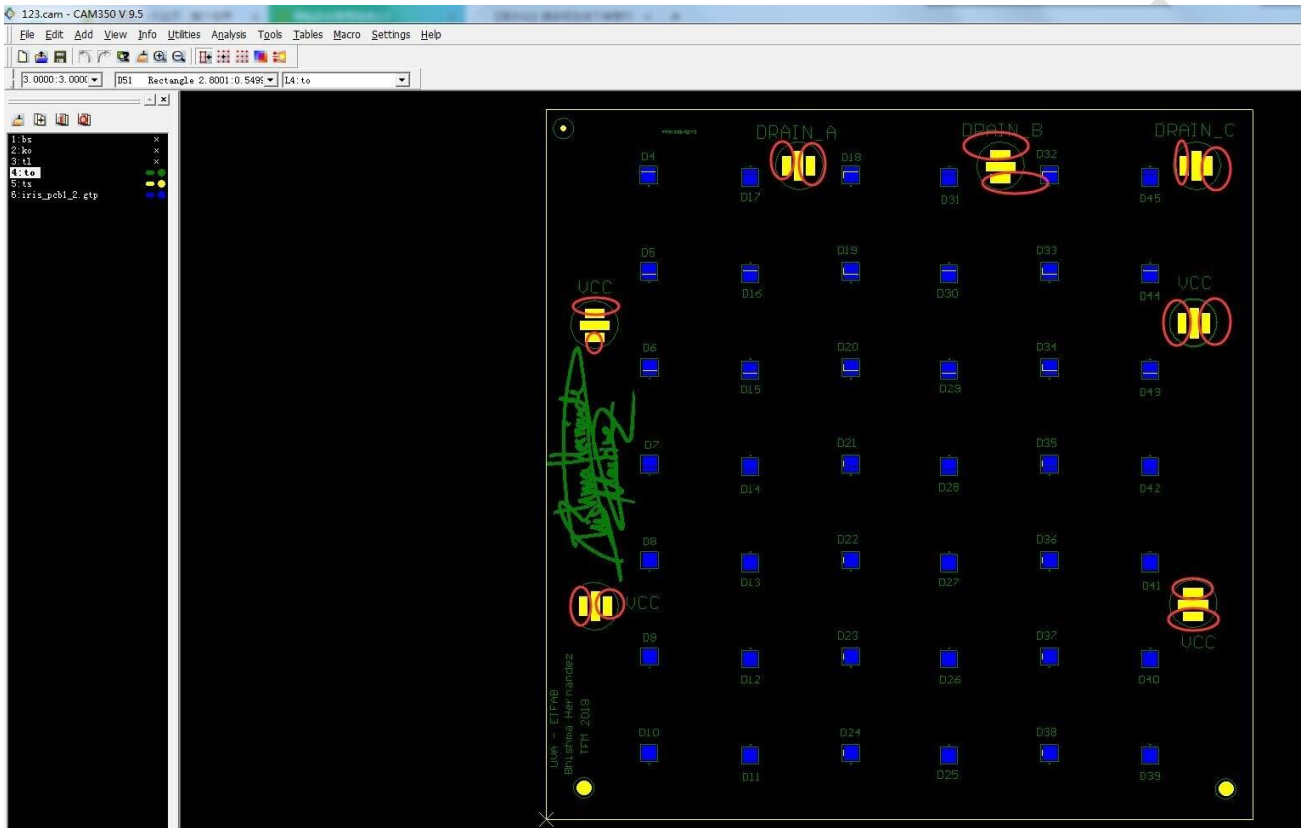
7.10. ANEXO X: Cuestiones línea de producción.

**Question 1:**

Thanks for the inquiry W151228ASZ13\_iris\_Ax1\_2\_Alum.rar, we are making the working file of the stencil. Pls check the image attached, we found there are much more openings on the solder mask layer. But they are covered on the paste layer.

Pls kindly advice if we should make them open on the paste layer too?

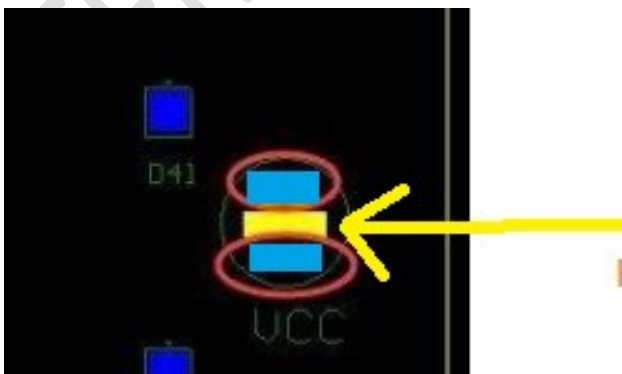
2019-03-28



**Answer 1:**

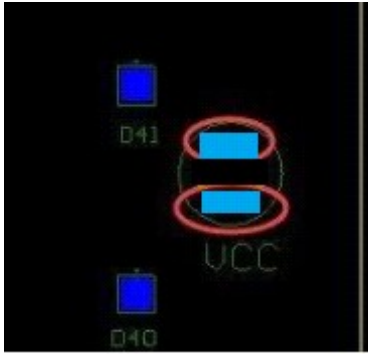
Hello,

Yes, the yellow in the red circles correspond with solder mask. Please, Notice that the yellow rectangle in the middle is a rectangle hole, not solder there.



So please, solder mask should be like this:





The 7 shapes are the same.

Thanks.

Best regards.

#### Question 1.1:

Hi,

Thanks for the message, so we should make the red circles uncovered on the stencil?



#### Answer 1.1:

Hello,

Yes, you are right.

Best regards.

#### Question 2:

Hi,

Thank you for your order, but there is one same thing we need to check with you:

Could you pls check and notice the three vias, you chose tenting vias, but in your file, they are not covered, pls check if they are tenting vias OR vias not covered?

Waiting for your reply.

#### Answer:

Hello,

I hope you are doing fine.

Those are vias not covered.

Thanks.

Best regards.

**Question 3:**

Hi,

Sorry to disturb you again, but there is still one thing we need to check with you:

Could you pls check the pic1 and notice the big circle in GKO layer, if we need to cut it out as slot?

Or ignore the circle one and just cut the smaller rectangles out as slots?

Waiting for your reply.



**Answer3:**

Hello,

Thanks for your questions.

Yes, the big circle must to be cut out. The big circle is scrap.

I appreciate if you could include scrap big circle in the shipment. I will use it as decoration, not for electrical development purposes.

Thanks.

Best regards.

**Question 3.1:**

Hi,

Thank you for your check.

If we want us to leave this circle, then we need to reduce the circle size so that we can add connection with it and the boards and will add Stamp holes in connection so that you can separate it by yourself. And if you can accept that we do like waht I said, then in the circle, we also need to do it like the boards, right? bcs there are pads and slots, we still need to do them?

Waiting for your reply.

#### Answer 3.1:

Hello, good morning

I hope you are doing fine.

Your recommendation is great. Please, reduce inside removable circle, outside circle should have provided dimensions. It is not needed to do path or slots inside circle.

Thanks.

Best regards.

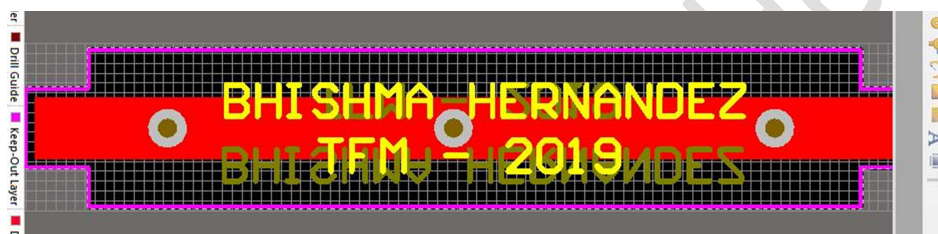
#### Question 4:

Hi,

Thank you for your order, but there is one thing we need to check with you:

Could you pls check the pic1 and notice the three vias,you chose tenting vias, but in your file, they are not covered, pls check if they are tenting vias OR vias not covered?

Waiting for your reply.



#### Answer 4:

Hello,

Those are not covered vias.

No testing vias on this PCB.

Thanks.

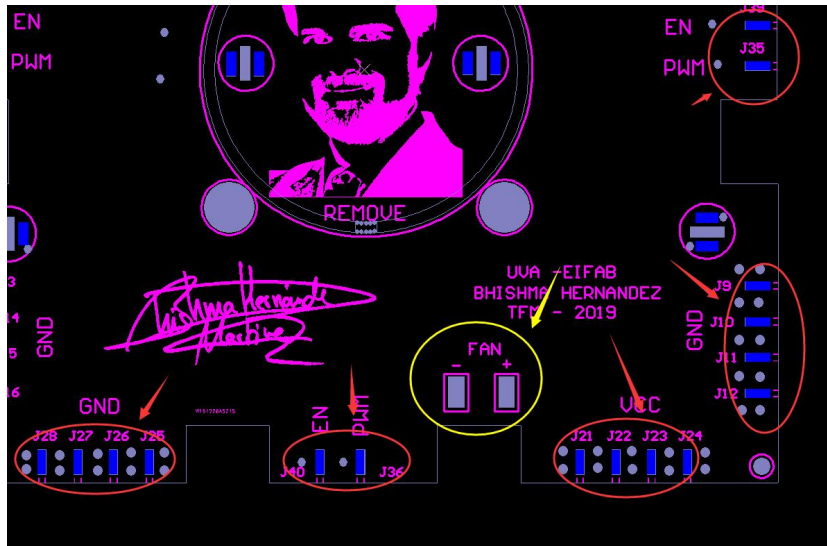
Best regards.

#### Question 5:

hanks for the order W151228ASZ15\_iris\_Ax1\_1\_FR4.rar. we have a question about the stencil.

Pls check the image attached, the two openings we circled in yellow is on solder mask layer, should we make them open on the stencil?

The openings we circled in red color is on paste layer, should we make them open on the stencil?



**Answer 5:**

Hello,  
 I hope you are doing fine.  
 Thanks for your questions.

Yes, red and yellow should be open on stencil.  
 I will correct it for future projects.

Thanks.  
 Best regards.

## 7.11. ANEXO XI: Facturas.

## Invoice

## HK WEIKU TECHNOLOGY COMPANY LIMITED

ADD: Room 1105-1108, No.2 Building, Est Mall Business Center, No.698 Changbang Road, Xiacheng District, 310004, Hangzhou, China

Tel: +86-0571-85317598

Fax: 86-571-85457578

E-mail: [service23@pcbway.com](mailto:service23@pcbway.com)

Contact person: Sweetie

To: Bhishma  
From: PCBWay.comNO:G384781  
Date:2019/3/28

Recipient Buyer	Bhishma							
Contact Person	Bhishma Hernández							
Shipping address	C/Erilla n1., CIRUJALES DEL RIO, 42180, SPAIN							
Tel	+34655049067							
Payment method	PayPal							
Shipping method	DHL							
<b>Order Information</b>								
Part No. and description	Size (mm)	Qty	Unit price (USD)	Amount (USD)	Shipping charge (USD)	Bank fee (USD)	Discount (USD)	Total (USD)
Printed Circuit Board: FR-4 1.6mm 1oz 2layers White mask Black legend HASL with lead No. :W151228ASZ12 iris_Ax1_3_FR4	58*10.2	20	0.8	16.0	59.0	18.0	-0.0	411.0
Printed Circuit Board: Aluminum 1.6mm 1oz 1layers White mask Black legend HASL with lead No. :W151228ASZ13 iris_Ax1_2_Alum	150*150	5	9.4	47.0				
Printed Circuit Board: FR-4 1.6mm 1oz 4layers White mask Black legend HASL with lead No. :W151228ASZ15 iris_Ax1_1_FR4	150*150	5	24.0	120.0				
Printed Circuit Board: FR-4 1.6mm 1oz 4layers Blue mask White legend HASL with lead No. :W151228ASZ17 Numantia_Ax1	147*155	5	24.2	121.0				
Stencil No.S-Z14W151228A Non-framework Valid area190×290mm	Custom Size	1	10.0	10.0				
Stencil No.S-Z16W151228A Non-framework Valid area190×290mm	Custom Size	1	10.0	10.0				
Stencil No.S-Z18W151228A Non-framework Valid area190×290mm	Custom Size	1	10.0	10.0				
<b>PCBWay.com Bank information</b>								
PayPal Account	payment@pcbway.com							
Beneficiary	HK WEIKU TECHNOLOGY COMPANY LIMITED							
Bank:	The HongKong and Shanghai Banking Corporation Limited							
Bank address	Head office 1 Queen's Road Central HongKong							
Account No.	848-079000-838							

DHL Express Spain S.L.U. Teléfono 902 12 24 24 Inscrita en el Registro Mercantil  
 Avda Sur Aeropuerto de Barajas 32 www.dhl.es de Madrid Tomo 36155 Folio 91  
 28042 Madrid Sección 8 Hoja M-649671  
 C.I.F. ES-B 20861282



Num. de factura : VT5 2019022193 EAT P/C BRUSHMA  
 Fecha : 08/04/2019 C/ERILLA N  
 Origen/Destino : CHINA/ESPAÑA (INCL. BALEARES Y CANARIAS, 42180 CIRUJALES DEL RIO  
 Cta. aduana : CASHESADU  
 Valor CIF : 84,52 Bultos : 1 Peso : 3 C.I.F./D.N.I. 0000

Concepto	Sujeto I.V.A.	Exento I.V.A.	Total
IVA GESTION DE DESPACHO	16,00	17,75	17,75 16,00
I.V.A. 21 % sobre 16,00			3,36
R.E. % sobre			
adjunta la documentación acreditativa del despacho de la mercancía a la que esta factura hace referencia			
Total a pagar euros :			37,11

Pagar a: SIMPLIFICADA - PEDIR DNI  
 ENTREGADO  
 IB: 3784127955 Bultos : 1 Peso : 3  
 Documento aduana : 19ES00280133052173 XSO



**OFICINA DE ATENCIÓN AL CLIENTE**  
 Parque de Negocios MAS BLAU I  
 Edificio Muntadas, Esc. B  
 C/ Solsones nº 2, Planta 2 Local C1 y  
 C3  
 08820 El Prat de Llobregat  
 Barcelona  
 Spain  
 +34 93 6455263

N.º de orden de compra: -  
 N.º de pedido en Internet: 16234221  
 Fecha del pedido: 28-mar.-19

## Recibo de pedido detallado

### Información de facturación

**Bhishma Hernández M.**  
 C/Erilla 1  
 Cirujales del Río, Soria 42180  
 España  
 655049067

### Método de envío

**Primer envío:** FedEx International Priority  
**Envío de pedidos pendientes:** FedEx International Priority

ESTE PEDIDO ESTÁ SUJETO A TODOS LOS TÉRMINOS Y CONDICIONES EXPUESTOS EN:  
[www.mouser.es/saleterms/](http://www.mouser.es/saleterms/)

### Información sobre envíos

**Bhishma Hernández**  
 C/Erilla 1  
 Cirujales del Río, Soria 42180  
 España  
 655049067

### Método de pago

**Tipo de pago:** Tarjeta de crédito - Visa terminada en 3017

Total de mercancías: 410,21 €  
 Total de envío: 0,00 €  
 Total de VAT: 86,14 €

**Total del pedido: 496,35 €**

Sumando las cantidades de IRIS y Numantia, añadiendo el coste de tramitación, envío y aduanas, se tiene un coste total de **912.26€**

7.12. ANEXO XII: Presupuestos. Otras ofertas.

TRELEC

Realizado por:	Dpto. Técnico
Aprobado por:	Dirección



**Oferta N°: QUO 014 003-R1A**

**OFERTA ECONOMICA**

**1. Producto**

Cantidad	Referencia	Observaciones
33	<b>ROA 014 001-R1A</b> iris_Ax1_3_FR4	pcb

**2. Partes del proceso**

<input checked="" type="checkbox"/> Serigrafía Aut	<input checked="" type="checkbox"/> Inserción comp SMD	<input checked="" type="checkbox"/> Soldadura por Reflow
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R1	<input type="checkbox"/> Soldadura por OLA	<input type="checkbox"/> Soldadura Manual
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R2	<input type="checkbox"/> Inspección RX	<input type="checkbox"/> Ensamblado/Montaje
<input type="checkbox"/> Prepacking	<input checked="" type="checkbox"/> Packing	<input type="checkbox"/> Barnizado
<input checked="" type="checkbox"/> Compra Componentes	<input checked="" type="checkbox"/> Compra PCBs	<input checked="" type="checkbox"/> Pantallas serigrafía
<input checked="" type="checkbox"/> Industrialización	<input type="checkbox"/> Test	<input type="checkbox"/>

**3. Cotización**

		Lote uds
		33
Item	Partida	€/ud.
1	<b>Inserción SMA:</b> Pasta Lead Free. Inspección AOI	-;--€
2	<b>Test In Circuit +AOI:</b> Según especificaciones del cliente	-;--€
3	<b>Componentes:</b> Según Bom email 18-01-2019	-;--€
4	<b>PCBS:</b> Se entregara un montada y 3 vacias	225,00€
<b>Subtotal por unidad (1)</b> IVA no incluido		<b>225,00 €</b>

Gastos Iniciales		
3	<b>Gastos Iniciales PCBs:</b> Preparar carga de componentes.	106,00€
4	<b>Inspección :</b>	-;--€

Gastos Industrialización primera fabricación		
5	<b>Industrialización:</b>	-;--€
6	<b>Gastos Splicing:</b>	-;--€
7	<b>Pantalla de Serigrafía:</b>	-;--€
8	<b>Utillaje:</b>	-;--€
<b>Subtotal Gastos Generales (2)</b> IVA no incluido		

**NOTA.-** El precio de los componentes se tiene en cuenta el cambio €/\\$ y el stock de los componentes acopiados para cantidades mayores.



Dirección/Office address  
Camino de Sangróniz, 6  
E-48150 Sondika, Spain

Telefono/Telephone  
(+34) 944 53 70 71  
[www.trelec.com](http://www.trelec.com)

Telefax/Telefax  
(+34) 944 53 88 65

**Figura 55 – Otras ofertas recibidas. TERLEC 1/3**



Realizado por:	Dpto. Técnico
Aprobado por:	Dirección



**Oferta N°: QUO 014 002-R1A**

## OFERTA ECONOMICA

### 1. Producto

Cantidad	Referencia	Observaciones
1	<b>ROA 014 002-R1A</b> IRIS_Ax1_2_Alum	PROTOTIPOS + pcb

### 2. Partes del proceso

<input checked="" type="checkbox"/> Serigrafía Aut	<input checked="" type="checkbox"/> Inserción comp SMD	<input checked="" type="checkbox"/> Soldadura por Reflow
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R1	<input type="checkbox"/> Soldadura por OLA	<input type="checkbox"/> Soldadura Manual
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R2	<input type="checkbox"/> Inspección RX	<input type="checkbox"/> Ensamblado/Montaje
<input type="checkbox"/> Prepacking	<input checked="" type="checkbox"/> Packing	<input type="checkbox"/> Barnizado
<input checked="" type="checkbox"/> Compra Componentes	<input checked="" type="checkbox"/> Compra PCBs	<input checked="" type="checkbox"/> Pantallas serigrafía
<input checked="" type="checkbox"/> Industrialización	<input type="checkbox"/> Test	<input type="checkbox"/>

### 3. Cotización

		Lote uds
		1
Item	Partida	€/ud.
1	<b>Inserción SMA:</b> Pasta Lead Free. Inspección AOI	38,80€
2	<b>Test In Circuit +AOI:</b> Según especificaciones del cliente	0,00€
3	<b>Componentes:</b> Según Bom email 18-01-2019	90,80€
4	<b>PCBS:</b> Se entregara un montada y 3 vacias	280,00€
<b>Subtotal por unidad (1)</b> IVA no incluido		<b>409,60 €</b>
<b>Gastos Iniciales</b>		
3	<b>Gastos Iniciales PCBs:</b> Preparar carga de componentes.	160,00€
4	<b>Inspección :</b>	-;--€
<b>Gastos Industrialización primera fabricación</b>		
5	<b>Industrialización:</b>	125,00€
6	<b>Gastos Splicing:</b>	-;--€
7	<b>Pantalla de Serigrafía:</b>	195,00€
8	<b>Utillaje:</b>	-;--€
<b>Subtotal Gastos Generales (2)</b> IVA no incluido		<b>320,00€</b>

**NOTA.-** El precio de los componentes se tiene en cuenta el cambio €//\$ y el stock de los componentes acopiados para cantidades mayores.



Dirección/Office address  
Camino de Sangróniz, 6  
E-48150 Sondika, Spain

Telefono/Telephone  
(+34) 944 53 70 71  
[www.trelec.com](http://www.trelec.com)

Telefax/Telefax  
(+34) 944 53 88 65

Página 3 de 3

**Figura 56 – Otras ofertas recibidas. TERLEC 2/3**

Realizado por:	Dpto. Técnico
Aprobado por:	Dirección



Oferta N°: QUO 014 001-R1A

**OFERTA ECONOMICA**

**1. Producto**

Cantidad	Referencia	Observaciones
1	<b>ROA 014 001-R1A</b> iris_Ax1_1_FR4	PROTOTIPOS + pcb

**2. Partes del proceso**

<input checked="" type="checkbox"/> Serigrafía Aut	<input checked="" type="checkbox"/> Inserción comp SMD	<input checked="" type="checkbox"/> Soldadura por Reflow
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R1	<input type="checkbox"/> Soldadura por OLA	<input type="checkbox"/> Soldadura Manual
<input checked="" type="checkbox"/> Inspección Aut. AOI R2	<input type="checkbox"/> Inspección RX	<input type="checkbox"/> Ensamblado/Montaje
<input type="checkbox"/> Prepacking	<input checked="" type="checkbox"/> Packing	<input type="checkbox"/> Barnizado
<input checked="" type="checkbox"/> Compra Componentes	<input checked="" type="checkbox"/> Compra PCBs	<input checked="" type="checkbox"/> Pantallas serigrafía
<input checked="" type="checkbox"/> Industrialización	<input type="checkbox"/> Test	<input type="checkbox"/>

**3. Cotización**

		Lote uds
		1
Item	Partida	€/ud.
1	<b>Inserción SMA:</b> Pasta Lead Free. Inspección AOI	45,00€
2	<b>Test In Circuit +AOI:</b> Según especificaciones del cliente	0,00€
3	<b>Componentes:</b> Según Bom email 18-01-2019	15,25€
4	<b>PCBS:</b> Se entregara un montada y 3 vacias	280,00€
<b>Subtotal por unidad (1)</b> IVA no incluido		<b>340,25 €</b>

Gastos Iniciales		
3	<b>Gastos Iniciales PCBs:</b> Preparar carga de componentes.	160,00€
4	<b>Inspección :</b>	-;--€

Gastos Industrialización primera fabricación		
5	<b>Industrialización:</b>	125,00€
6	<b>Gastos Splicing:</b>	-;--€
7	<b>Pantalla de Serigrafía:</b>	195,00€
8	<b>Utillaje:</b>	-;--€
<b>Subtotal Gastos Generales (2)</b> IVA no incluido		<b>320,00€</b>

**NOTA.-** El precio de los componentes se tiene en cuenta el cambio €/€ y el stock de los componentes acopiados para cantidades mayores.



Dirección/Office address  
Camino de Sangróniz, 6  
E-48150 Sondika, Spain

Telefono/Telephone  
(+34) 944 53 70 71  
[www.trelec.com](http://www.trelec.com)

Telefax/Telefax  
(+34) 944 53 88 65

Página 3 de 3

**Figura 57 – Otras ofertas recibidas. TERLEC 3/3**

7.13. ANEXO XIII: Publicaciones que han venido propiciadas a partir de este TFM.

## Low-cost illumination system for photovoltaic devices validation at the control and constant irradiance

Bhishma Hernández<sup>1</sup>[0000-0001-5577-209X], Luís Hernández-Callejo<sup>1</sup>[0000-0002-8822-2948]  
Sara Gallardo-Saavedra<sup>1</sup>[0000-0002-2834-5591], Víctor Alonso-Gómez<sup>1</sup>[0000-0001-5107-4892]  
and Jose Ignacio Morales<sup>1</sup>[0000-0002-9163-9357]

<sup>1</sup> University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Spain  
bhishma.hernandez@alumnos.uva.es, B.H.;  
luis.hernandez.callejo@uva.es, L.H-C.;  
s.gallardosaavedra@gmail.com, S.G-S.;  
victor.alonso.gomez@uva.es, V.A-G.; ziguratt@coit.es, J.I.M.

**Abstract.** To advance on investigations in photovoltaic systems, there is a multitude of measurements and experiments that should be performed. To correlate information, experiment parameters should be measured, constant and under control. Weather creates variations on the solar irradiation that we cannot control and makes difficult to compare experiments under the same working conditions.

**Keywords:** illumination, photovoltaic measurements, artificial sun.

### 1 Introduction

Renewable technologies are considered as clean sources of energy and optimal use of these resources minimize environmental impacts, produce minimum secondary wastes and are sustainable based on current and future economic and social societal needs and the Sun is the source of all energies [1].

Despite there are some challenges to face, photovoltaic systems are the most demanded today. Its easy installation and reduced cost make them very attractive worldwide [2].

The photovoltaic cell and the photovoltaic module must be inspected continuously [3-4], some of these inspection techniques are: thermography [5], electroluminescence [6] and measurements using I-V curves [7].

The measurement of I-V curves is the most direct way to obtain information on the efficiency of the photovoltaic module [8-9]. The information from this measurement technique is essential to decide regarding the faults in the photovoltaic module [10].

This technique requires special environmental conditions, specifically temperature and irradiance. The effect of clouds and low irradiance means that I-V devices do not work properly. Therefore, this work focuses on the design and implementation of an artificial sun. In this way, the I-V technique will not depend on the environmental conditions, and can be performed with the device proposed in this work.

## 2 Methodology and resources

### 2.1 Solar irradiance

To perform experiments on the field is important to understand responses on real conditions. Result difficult to reproduce exact same working conditions from day to day, even from one minute to the following one. Solar irradiance which is the main excitation to the majority of photovoltaic experiments depends on weather conditions. It is not possible control the weather variations which change randomly. The method used in field measurements is registered irradiance and temperature parameters.

Unfortunately, is very difficult to maintain constant the irradiance values in order to compare experiments and results. Figure 1 represents the solar irradiance values that we could register one day that we would like to perform experiments with photovoltaic modules.

There are two different approaches to the variability of irradiation. The first is, only could perform experiments a few days in one year to ensure small solar irradiation variability. Second, we should apply mathematical models to normalize measured values. On that case information is manipulated and potentially lose accuracy on information.

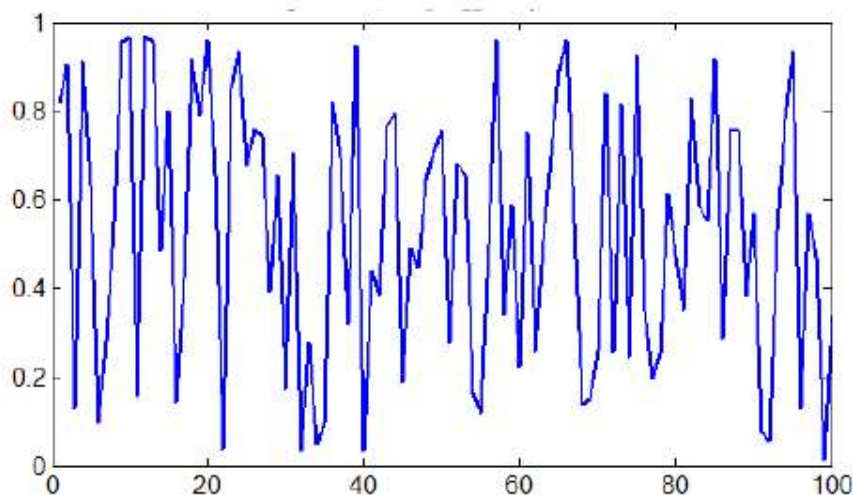


Fig. 1 Solar irradiance of 100 minutes from a random day.

The solar spectrum is composed of a complex mixture of wavelengths and amplitudes. There are devices that create illuminations with a very similar spectrum to the sun's spectrum. The cost of those devices sometimes is some thousand dollars. To small investigation teams maybe this cost is not acceptable. Figure 2 shows the solar spectrum measured.

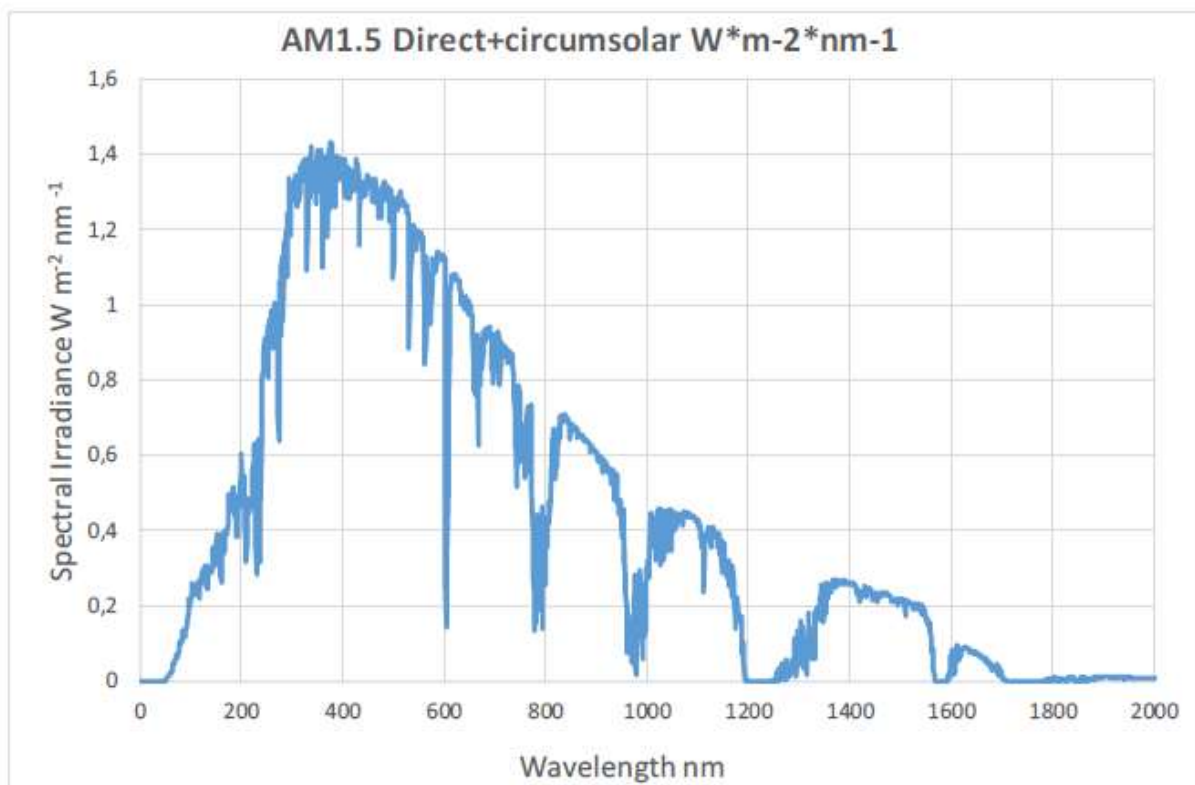


Fig. 2 Solar spectrum.

## 2.2 Photovoltaic devices.

The response of photovoltaic devices (PV cells, PV modules...) is adapt to the solar wavelength that we could observe on earth surface. The specific response of each device is different and has a relation with the technology used to manufacture it.

Figure 3 represents solar excitation and crystalline silicon PV cell response used to convert solar irradiation on electricity. Figure 4 is represented the total energy from the sun and the photovoltaic cells capability to acquire it. Different technologies will have different efficiencies. As bigger is the capability to transform wavelengths on electricity, bigger is the efficiency that the photovoltaic device has. Tandem cells that use different technology on the different semiconductor layer, are designed to increase the usable energy capture on the photovoltaic cell.

Field experiments take advantage of the direct solar spectrum, but assume the potential differences that could be on solar irradiation due to variations that are created due to weather conditions.

Comparing Figure 3 and Figure 4, we could see the performance of crystalline photovoltaic silicon cells and how it is adapted to the solar spectrum.

Field experiments should include the information the variation created by different working conditions. Obtained results to be provided difficult to correlate to each others due to not full control working conditions. Equations to normalize results reduce the accuracy and include an unspecified uncertain level.

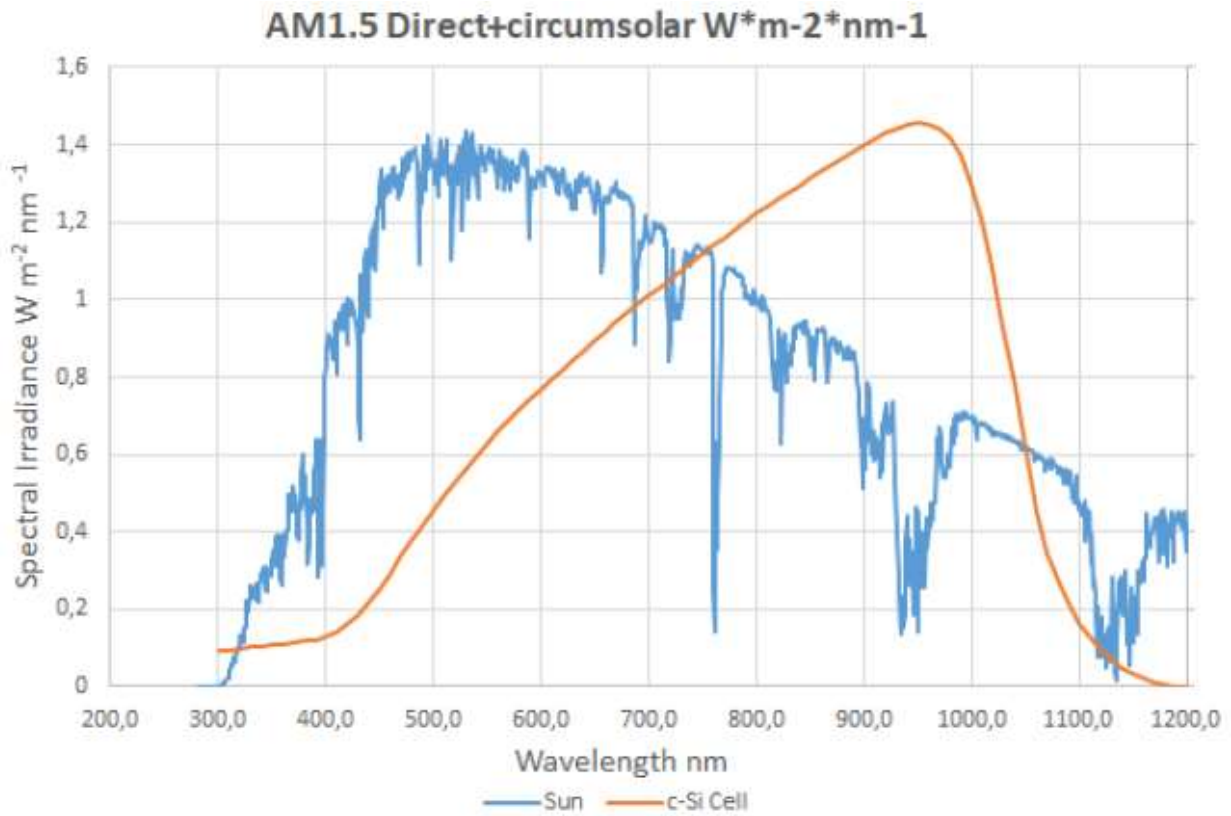


Fig. 3 Excitation and crystalline silicon response.

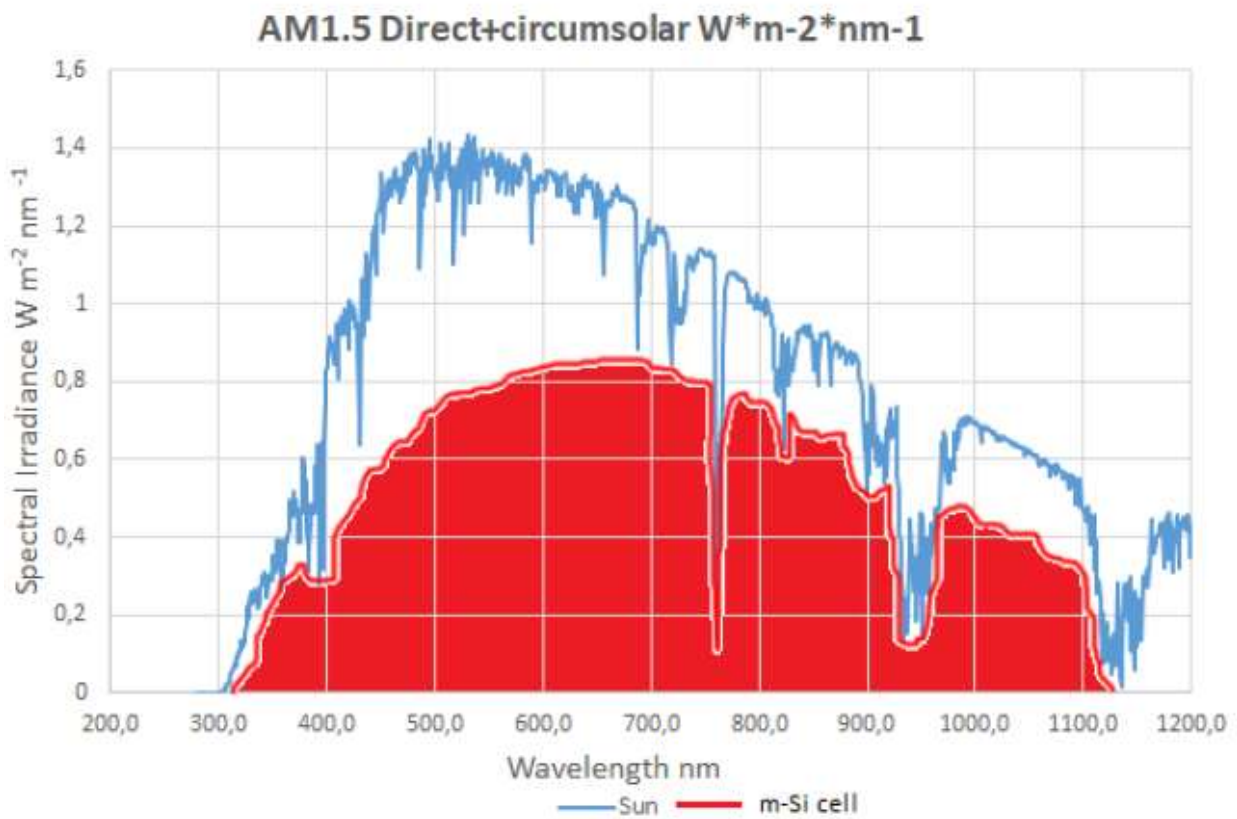


Fig. 4 Energy usable for silicon photovoltaic cells.

### 2.3 IRIS. The low-cost illumination system

Understanding limitations that are inherent to field measurements and, defining real needs for the desired test to perform on photovoltaic devices. The investigation team decided to develop a simple illumination device, centered on 850 nm wavelength irradiation (see Figure 5).

The excitation that IRIS (as we call the developed lamp) is different from the solar spectrum. Illumination created has a narrow wavelength and high irradiance on it. However, the response that we measure in some experiments performed on solar cells and solar panels demonstrate that the develop illumination system is used for most of them.

Low-cost lamp designed, has a fan device to ensure thermal stability and current drivers to ensure constant current. Both parameters should be under control and constants. It is important to control the temperature because it will be impacting the wavelength. The current applied to LED will be impacting radiation. Figure 6 presents the radian flux for different current values applied to the LED.

The system designed is easily scalable. It provides the capability to grow and assembles one lamp to the next creating tessellation. It includes the capability to enable or disable lamps and trimming the current value to simulate as we desire different flux radiation. The layout is designed to install other LEDs that could provide different wavelength. It is thought of that way to be flexible for future requirements.

The shape that the device has (see Figure 7), is equal to the photovoltaic cell shape. It provides the possibility to be adapted directly to 15cmx15cm PV solar cell. The tessellation will be then on squares of 15x15cm size.

It is important to understand the power requirements that the device has. The power consumption is 67.5W (25V@ 2.7Amps) per lamp. To illuminate a full photovoltaic module of 72 cells, cell by cell, it will be needed around 5 kW. It means that the system will need 200 A.

The irradiance created could be bigger than irradiance registered on the earth's surface. It could be modulated using a trimmer or modifying the distance between the photovoltaic device and the lamp.

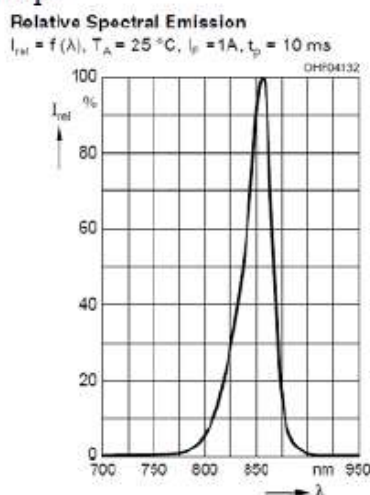


Fig. 5 Spectrum provided by developed low-cost lamp.

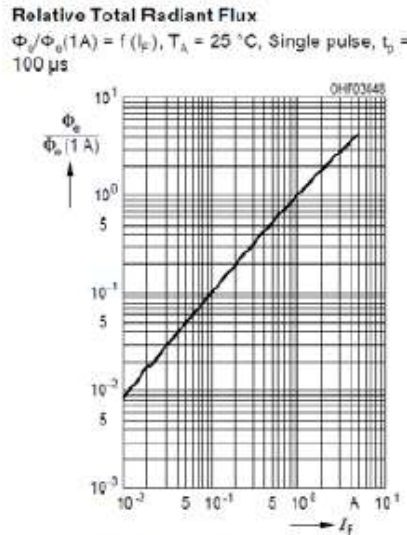


Fig. 6 Irradiation provided by the developed low-cost lamp.

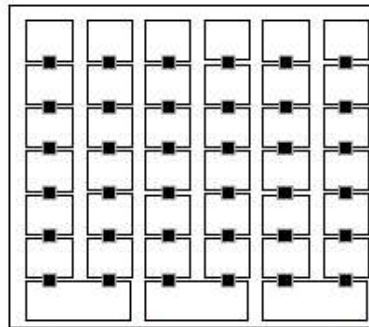


Fig. 7 The shape of the developed low-cost lamp.

### 3 Results

Results obtained on preliminary measurements demonstrate that low-cost lamps designed cover illumination needs that the investigation team has. We are able to implement experiments and perform it any time ensuring results under the same working conditions. The climatic chamber will control temperature conditions and low-cost lamp will create the irradiation needed. Having under control both parameters it is possible to create hundreds of experiments which results will be correlated easily.

The low-cost lamp is not replacing field experiments but, help us to identify phenomenon and experiments that really needs to be implemented in the field. The new device brings us the opportunity to advance faster on investigations and ensure constant working conditions.

The illumination capabilities, thanks to the developed device, bring the capability to control working conditions create high intense irradiations and repeat as much as is needed.

Table 1 shows the results obtained on different tests perform. The excitation capability needed to be provided by the sun is covered by the low-cost lamp. We could create bigger irradiances placing closer the photovoltaic cell under test to the



low-cost illumination lamp, creating higher irradiance than the irradiance on earth surface.

	Voc[mV]	Isc[A]	Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Distance to
<b>Solar illumination</b>	562	1.57	736	$\infty$
<b>Low cost lamp illumination</b>	583	1.89	809	15 cm

Table 1 Results obtained testing PV cells under real and laboratory working conditions.

Figure 8, Figure 9 and Figure 10 correspond with images from experiments performs with low-cost lamp prototype. Figure 8 and Figure 9 presents the current value provided by the cell under low-cost illumination and the irradiance parameter measured. Figure 10 corresponds with the current measures and solar irradiance registered during the test.

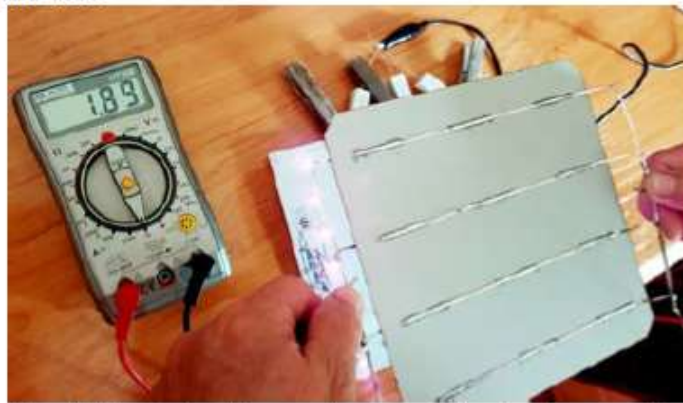


Fig. 8 Short circuit current measured using low-cost lamp.

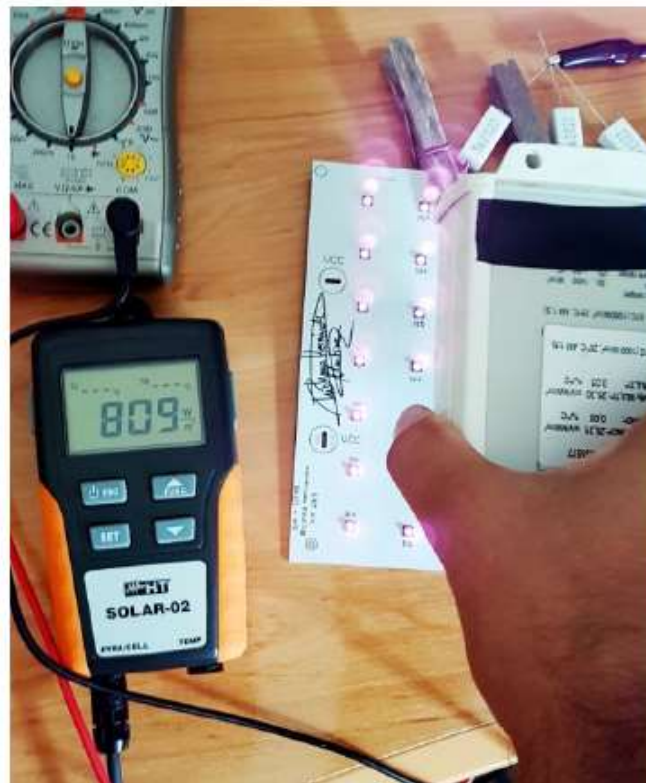


Fig. 9 Irradiation measured at 15 cm from low-cost lamps.



Fig. 10 Irradiances and short circuit current measured on field test.

#### 4 Conclusions

The creation of own illumination, bring the capability to generate working conditions with controlled constant illumination during 24/7. Unhook testing itself from excitation permit to clean testing procedures and obtain comparable values from different units under test.

Field testing is not replaced by low-cost lamps but. However, developed low-cost lamps enlarge testing time and improve quality on measurements due to constant and controlled irradiation used as excitation from low-cost lamps.

Figure 11 shows a low-cost lamp frontal view. It is composed of 42 power LED used to create uniform radiation con PV devices.



Fig. 11 Frontal view, low-cost lamp.

## Acknowledgments

The authors thank the CYTED Thematic Network “INTELLIGENT CITIES FULLY INTEGRAL, EFFICIENT AND SUSTAINABLE (CITIES)” n° 518RT0558. In addition, the work has been possible thanks to the "DOCTOR-PV" project Ref.: RTC-2017-6712-3, which has been funded by the “Ministry of Industry, Economy and Competitiveness, State R + D + i Program Oriented to the Challenges of the Society (Collaboration Challenges)”.

## References

- [1]. Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S.: Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524 (2011).
- [2]. Katiraei, F., Romero-Aguero, J.: Solar PV integration Challenges. *IEEE Power and Energy Magazine*, 9(3), 62-71 (2011).
- [3]. Gallardo-Saavedra, Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, O.: Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants. *Energy*, 183(September), 825-836 (2019).
- [4]. Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., Alonso-Gómez, V.: A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188(August), 426-440 (2019).
- [5]. Gallardo-Saavedra, Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, O.: Image resolution influence in aerial thermographic inspections of photovoltaic plants. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(12), 5678-5686 (2018).
- [6]. Kropp, T., Schubert, M., Werner, J.H.: Quantitative Prediction of Power Loss for Damaged Photovoltaic Modules Using Electroluminescence. *Energies*, 11(5), 1172-1186 (2018).
- [7]. Wu, L., Chen, Z., Long, Ch., Cheng, S., Lin, P., Chen, Y., Chen, H.: Parameter extraction of photovoltaic models from measured I-V characteristics curves using a hybrid trust-region reflective algorithm. *Applied Energy*, 232(December), 36-53 (2018).
- [8]. Gallardo-Saavedra, Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, O.: Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection. *Revista Facultad de Ingeniería*, 93(Oct-Dec), 92-104 (2019).
- [9]. Chen, Z., Lin, W., Wu, L., Long, Ch., Lin, P., Cheng, S.: A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays. *Energy Procedia*, 145(July), 381-387 (2018).
- [10]. Sarikh, S., Raoufi, M., Bennouna, A., Benlarabi, A., Ikken, B.: Fault diagnosis in a photovoltaic system through I-V characteristics analysis. In: *2018 9<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress (IREC)*, 20-22 March 2018, Hammamet (Tunisia).

# General purpose I-V tester developed to measure a wide range of photovoltaic systems

Bhishma Hernández-Martínez<sup>1[0000-0001-5577-209X]</sup>, Sara Gallardo-Saavedra<sup>1[0000-0002-2834-5591]</sup>, Luís Hernández-Callejo<sup>1[0000-0002-8822-2948]</sup>, Víctor Alonso-Gómez<sup>1[0000-0001-5107-4892]</sup>  
and José Ignacio Morales-Aragón<sup>1[0000-0002-9163-9357]</sup>

<sup>1</sup> University of Valladolid, Campus Universitario Duques de Soria, Soria (Spain):  
bhishma.hernandez@alumnos.uva.es, B.H.;  
s.gallardosaavedra@gmail.com, S.G-S.;  
luis.hernandez.callejo@uva.es, L.H-C.;  
victor.alonso.gomez@uva.es, V.A-G.; ziguratt@coit.es, J.I.M.

**Abstract.** Here, we propose the design and development of an instrument with extended capabilities for photovoltaic devices I/V tracing. Commercial instruments that measure I-V curves from photovoltaic devices are suitable for a wide range of applications. However, more specific research and measurements require developing customized equipment. Custom-made development provides flexibility, and allows to implement tailored algorithms and to have accurate control of obtained information. Full control offers better flexibility for testing and extends the measurement possibilities. Designed I-V tester is capable to measure low voltages and manages very low resistance load to provide short circuit current values with voltages close to zero.

**Keywords:** I-V tracer, I-V tester, measurement instrument, Arduino.

## 1 Introduction

To date, cities have been consumers of resources (energy, water, food, etc.), but recently, under the concept of Smart City (SC), cities begin to be resource producers. In the case of energy, the SC is integrating renewable generation sources into existing infrastructure [1-2].

In recent years, renewable systems are being integrated into electrical grids in a massive way. Specifically, renewable technology with the greatest boom and interest is photovoltaics, and it is likely that the next few years will continue to be the most installed [3]. This trend is followed by cities, which will integrate photovoltaic technology into their spaces [4-5].

But photovoltaic systems present problems. These problems can be caused in manufacturing, but most of them are caused by the operation of the system. As shown in [6], numerous problems occurred during the operation of the plant, so maintenance work is critical.

The detection of failures in photovoltaic systems is a very broad topic [7-8]. For example, it is possible to use thermographic images for fault detection [9], or

electroluminescence images [10]. However, the classic detection of loss of efficiency in a photovoltaic module is by means of instruments such as I-V plotter [11-12].

Commercial I-V devices have some limitations, for example, they are not able to operate with very low currents and voltages. Therefore, these devices cannot make partial measurements within a module (set of cells embraced by a bypass diode) or a single cell. In this sense, this work presents the electronic architecture and software to have an I-V device capable of covering the lack of commercial devices.

## 2 Methodology and resources

This section explains the current commercial I-V testers, their limitations found on field measurements and how developed I-V tester overcome those limitations. At the end of the chapter, it is presented some measurements that cannot be performed with commercial I-V tracers.

### 2.1 Commercial I-V Tester

PV testers allow field measurements of I-V Curve and determination of the main characteristic parameters both of a single module and of strings of modules for PV installations up to a maximum of 1500V and 15A. Some of them, manages an internal database of the modules, which can be updated at any time by the user and comparison between the measured data with the rated values allows immediately evaluating whether the string or the module fulfills the efficiency parameters declared by the manufacturer. I-V Curve can be adjusted also by decentralizing irradiation and temperature measurements by using an optional remote unit to measure reference temperature and irradiation. The display, once finishes the I-V Curve measurement, shows the measured parameters and compare it with the specifications declared by the PV module manufacturer.

### 2.2 Commercial I-V tester. Specifications.

Table 1 represents some of the main useful parameters measured by PV testers. The majority of PV modules could be analyzed accordingly.

Symbol	Description	Range	Resolution
Pmax	Maximum nominal power of a module	50 - 4800W	1W
Voc	Open circuit voltage	15 – 99.99V 100-320.0V	0.01V 0.1V
Vmpp	Voltage on point of maximum power	15 – 99.99V 100-320.0V	0.01V 0.1V
Isc	Short circuit current	0.5 - 15A	0.01A
Impp	Current on point of maximum power	0.5 - 15A	0.01A

**Table 1** Typical parameters of PV modules tester.

Information provided by PV tester corresponds with raw information. Information measured is used to be analyzed to obtain further conclusions on PV research. Fig. 1 PV module measured with PV tester Fig. 1 represents information obtained from the standard PV module measured on a field installation. Full I-V curve is shown, and

short circuit current ( $I_{sc}$ ), open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and maximum power ( $P_{max}$ ) can be inferred.

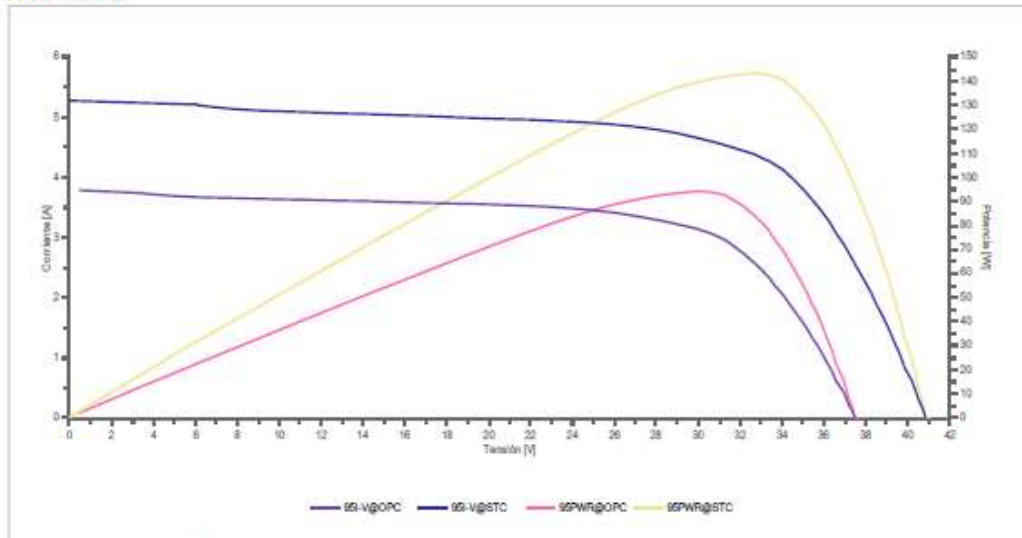


Fig. 1 PV module measured with PV tester.

### 2.3 Commercial I-V tester. Limitations.

PV modules are composed of different cell string layout. Different cells configurations provide electrical characteristics that the PV modules datasheet specify.

Detailed measurements of different systems and cell configurations are needed to understand some PV module failures. In this situation is when instrument limitation appears. Usually, a minimum input voltage of 15 V is required, and this value, limits measurements to full PV module. Therefore, the instrument does not provide capability to measure one PV string independently, which usually presents a voltage under this minimum value.

In some situations, is important to increase the level of detail and measure cell by cell. This is the most restrictive situation. PV cell electrical specifications are around 10 Amps and 0.6 V. Hence, the measuring instrument should be compliant with very restrictive electrical requirements. There are no instruments that could cover module measurements, string measurements and cell measurements at the same time.

Another important limitation is the I-V tester specifications. In most situations, algorithms used to measure and process measurements are not public. It becomes a limitation when an investigator needs to understand testing process from end-to-end and needs to have a full understanding of results obtained.

### 2.4 General purpose I-V Tester.

In order to overcome measurement limitations and to continue with researching and results, it was decided to develop a customized I-V tester to extend measurement needs. The instrument was developed based on Arduino platform.

Using open hardware and open software platforms, provide us well-documented information to grow the new functionality that was needed. It was decided to design a new layer for Arduino M0 motherboard. Arduino PCB provides a connector to be used as link between boards which parameters are standard. Common connectivity provides needed functionality and a simple method for scale designs.

Fig. 2 presents the connectivity that most of Arduino devices have as general-purpose connectivity provided for user applications. Connectors are placed to ensure Pokayoke usability in order to avoid mistakes once the user-created layer (or skin) is placed.

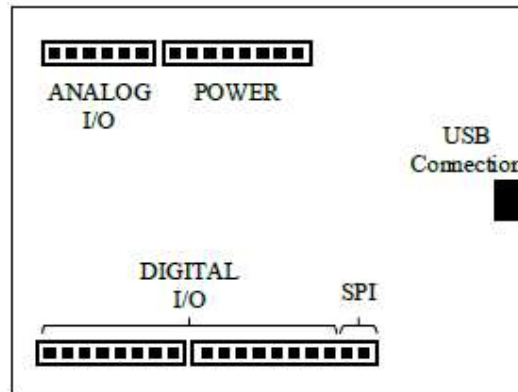


Fig. 2 Arduino general-purpose pinout.

The proposed development could be designed for simple Arduino M0 motherboard and used in other motherboards with more peripherals like Ethernet connectivity, SD memory card or Bluetooth.

Fig. 3 and Fig. 4 show two motherboard that use same connector with same functionality but, providing different hardware solution. Different blocks represented show the functionality available on each accessible pin: Ground connection (GND), analog to digital conversion (ADCx), digital pins and their functions (Pxyy, x = port name, yy = port number, PWM, Serial, SPI and I2C digital communications, etc.).

If needed, the compatibility provided for the same platform, simplify changing the motherboard from one to other with different specifications.

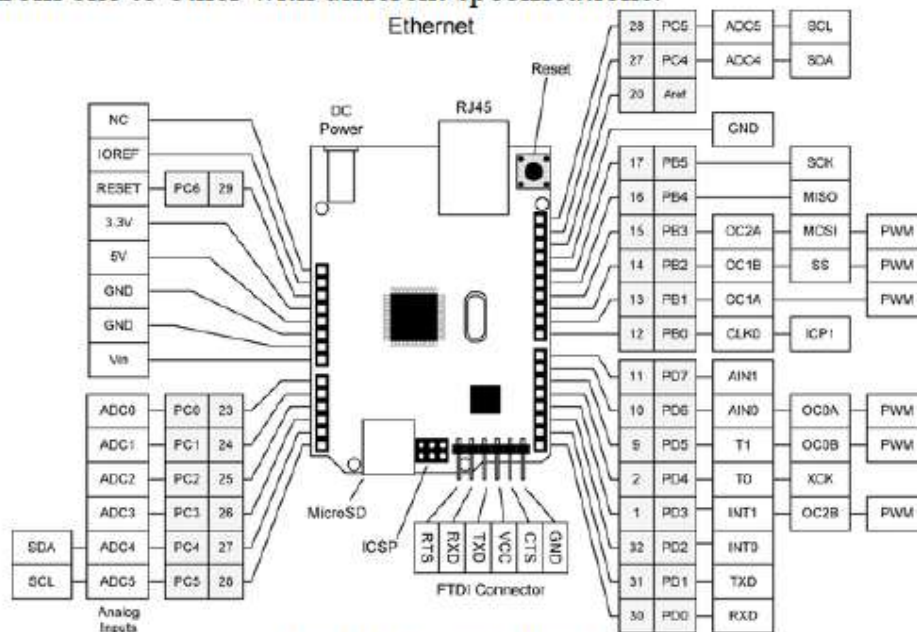


Fig. 3 Arduino Ethernet.

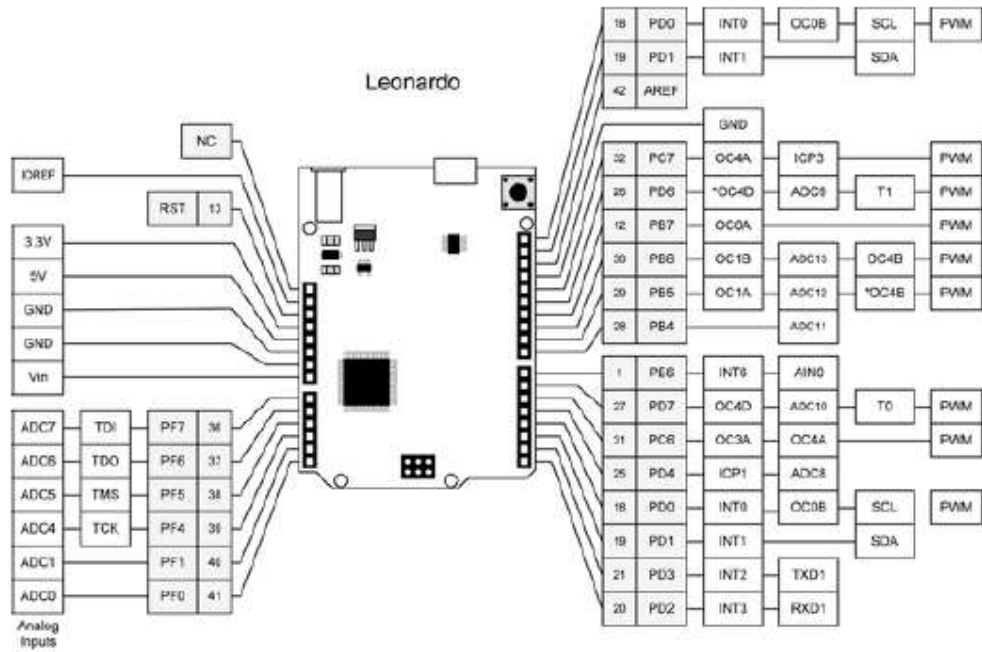


Fig. 4 Arduino Leonardo.

**2.5 General purpose I-V Tester. Specifications.**

Numatia is the code name used for the general purpose I-V tester developed. Before design, the instrument is very important to define the characteristics and limitations that it should meet. In Numantia’s case, two different inputs were defined.

Firs input used to measure high power elements up to 600W (60V@10A). It is a useful input to characterize PV modules or strings that could be on those PV modules. It covers a big dynamic voltage range from 0V to 60V ensuring sensibility between measurements below 60mV.

The second input is defined for low voltage and high current cells up to 10W (1V@10A). This input needs to ensure a low resistance to ensure the capability to measure Isc with accuracy. To measure cells it should ensure a low resistance on fill measurement system due to a low voltage provided by standalone PV cells. The instrument provides by design on full measurement path the resistance lower than 5mΩ.

Measure information is sent to the laptop through USB connection provided by Arduino that can manage ADC and DAC that system needs to configure to provide different measurements. Fig. 5 represents topology that measurement system has.



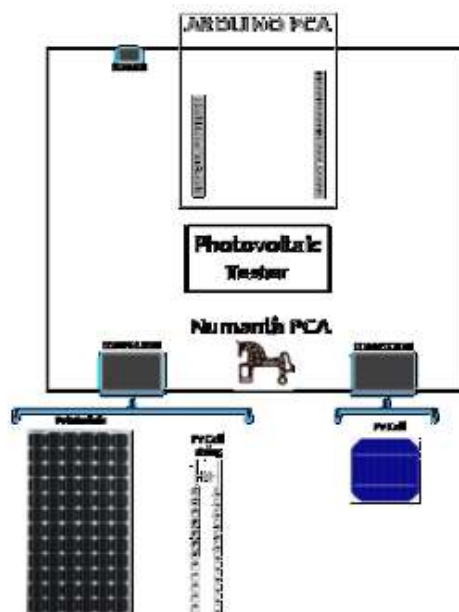


Fig. 5 General purpose PV tester.

The procedure used to measure I-V curve is based on variable resistor obtained configuring the MOSFET gate voltage. It was selected a low channel resistor to ensure reducing losses due to measurement system itself. Fig. 6 represent simplified block diagram that the custom I-V tracer has.

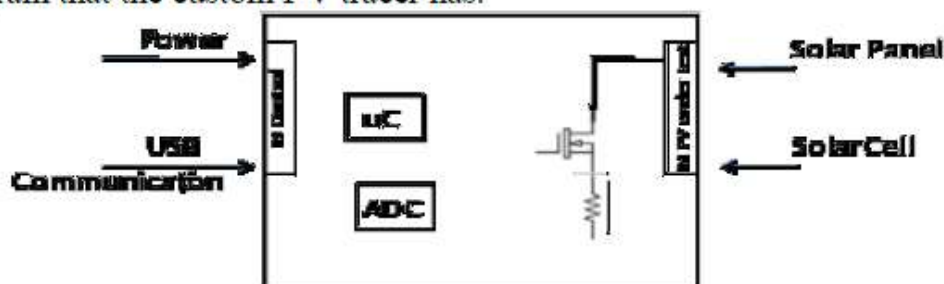


Fig. 6 General purpose PV tester block diagram.

## 2.6 General purpose I-V Tester. Software and hardware configuration.

Hardware devices defined to be involved on measurement system are critical. Instrument performance will depend on the quality and specifications of each component.

By definition, the MOSFET channel resistance is a maximum of  $1.9\text{m}\Omega$ . The shunt resistor selected is different for both systems. To measure high power PV devices is used a  $200\text{m}\Omega$  shunt resistor. However, to measure PV cells, it was needed to use  $2\text{m}\Omega$  shunt resistor. Thanks to using different shunt resistors for different measurements it is obtained the capability to measure wide range of PV systems using same device and procedure.

Code is the second important part of the design. Arduino's open-source provides us the capability to do fast developments and test design instrument performance. In the specific case of I-V tracer is important to include in the code a few different variables in order to calibrate full system. We have obtained positive results using one constant to adjust the gain that electronics provide and second variable to remove offset. Using

both constants defined at the beginning of the microcontroller firmware, instrument provides a high accuracy value.

All measurements are radiometric, it means that are linearly dependents on the power used to supply instrument. Power provided by USB is very stable, but there is uncertainty around exact value. The system could use USB batteries that could have voltage drift during full measurement procedure. To overcome this limitation, we define a double voltage cross-check. We measure power supply using Arduino and the voltage reference it has. The ADC in the instrument has one channel used to measure their own voltage as well. Both voltages are compared and use to adjust measures.

Fig. 7 represents graphically how to adjust measure value to obtain better approach to real measures removing undesired effect from own measurement process.

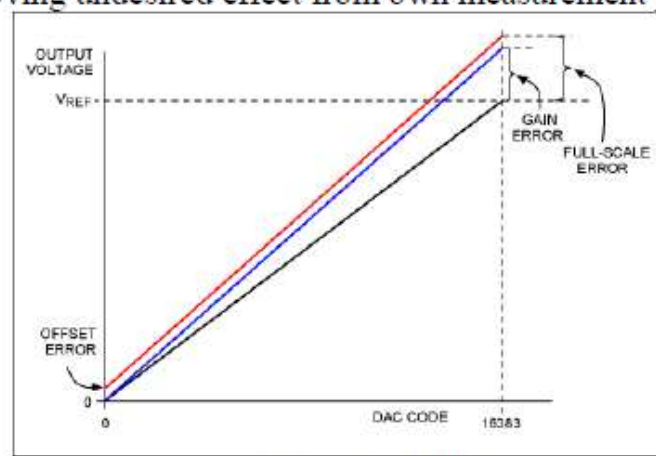


Fig. 7 Gain and offset.

### 3 Results

Field measurements were performing on a monocrystalline PV module which specifications are P=175W, Voc=44.35V, Isc=5.35A. It is a monocrystalline PV module, it composes by 3 different strings with 24 PV cells each.

The main results obtained are summarized in Table 2. The differences in values obtained with both instruments come due to different irradiation values registered during both measurements.

	Voc[V]	Isc[A]	Pmax[W]	Irradiation [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Develop I-V tester</b>	42.19	4.25	63.2	739
<b>Commercial I-V tester</b>	37.91	4.2	59.84	718

Table 2 PV module field measurement using commercial I-V tester and developed I-V tester

Fig. 8 and Fig. 9 present the field failure PV failure measurement result. It is seen reviewing detail I-V curves a failure in some string. The shape obtained on both I-V measurements demonstrates good performance of developing I-V tracer has to

compare with commercial calibrate instrument. Similar peaks and valleys are measured providing similar figures.

To improve PV module performance is needed to fully understand behavior that PV module is providing and their failure modes. Investigations will prove improvements and weaknesses that will be implemented in future manufacturing procedures.

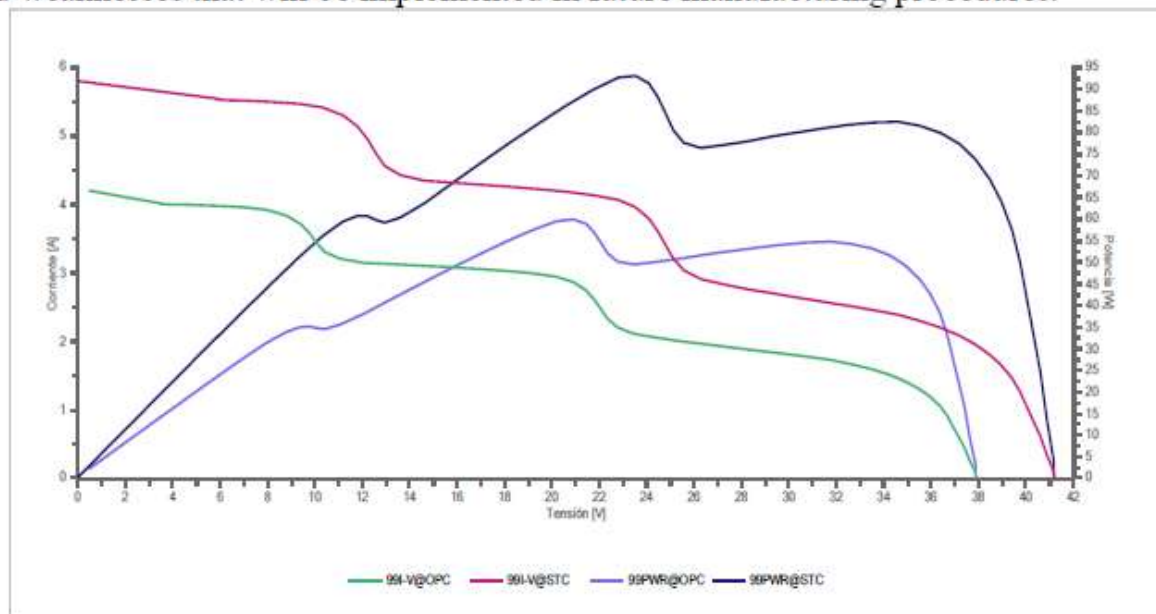


Fig. 8 Failure PV module measured with PV tester.

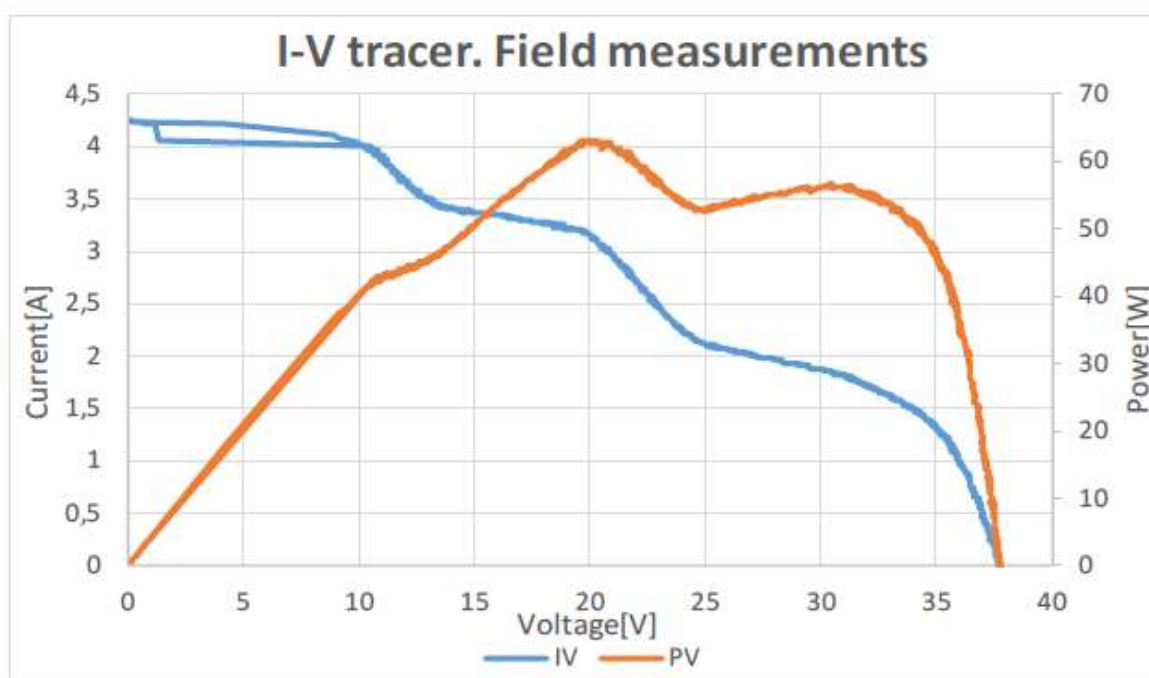


Fig. 9 Failure PV module measured with PV tester developed.

By means of the developed instrument, we obtained the different string measurements that are present in Fig. 10, Fig. 11 and Fig. 12. Is not possible to present string measurements to be compared due to limitation that commercial instrument has. Using those measurements, there is new information from field that could use on current investigations.

Different performances of 3 string included on same PV module create the poor performance saw. On ideal PV module, strings included on it should perform in a similar way. Represent values obtain on 3 different string and the big variation they have.

Table 3 summarize measurements perform using developed I-V tester. Due to open circuit voltage below 15V (commercial I-V tester limitation, see Table 1), the table only reflects result obtained with custom I-V tester.

	Voc[V]	Isc[A]	Pmax[W]	Irradiation [W/m <sup>2</sup> ]
<b>String 1</b>	12.9	2.21	16.11	718
<b>String 2</b>	11.91	3.28	28.14	723
<b>String 3</b>	13.5	4.19	36.20	724

Table 3 Failure PV module strings measured with PV tester developed.

TFM - Bhishma Hernández

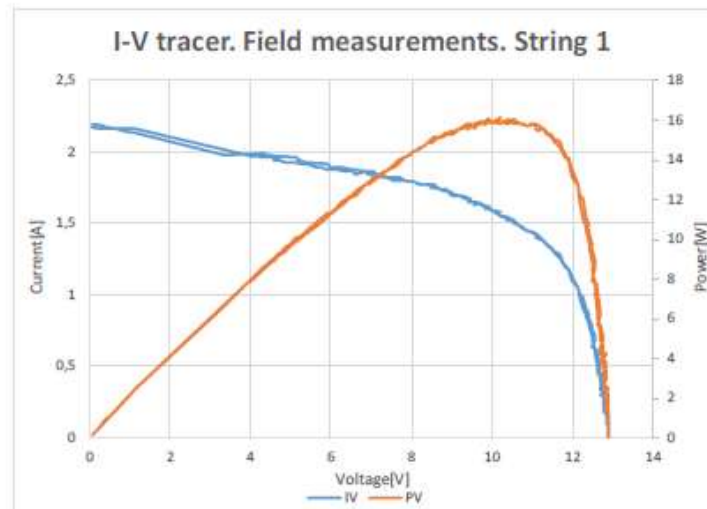


Fig. 10 Failure PV module (string 1) measured with PV tester developed.

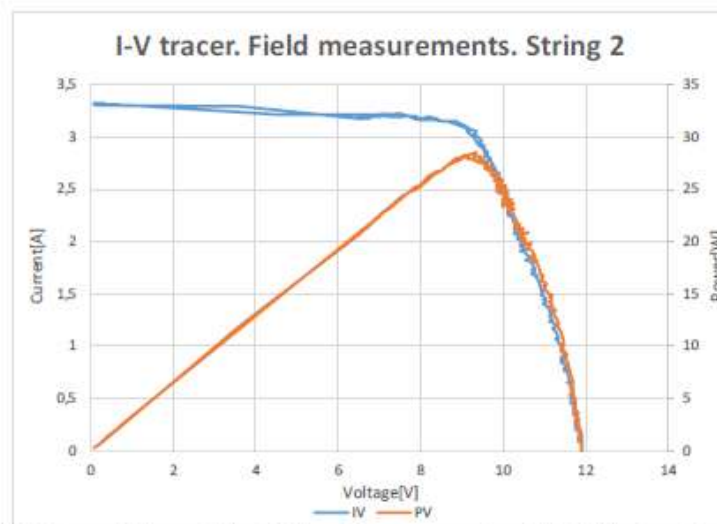


Fig. 11 Failure PV module (string 2) measured with PV tester developed.

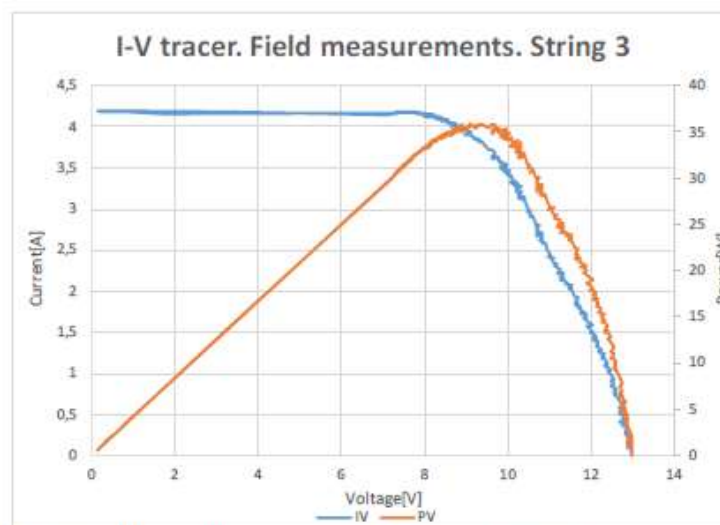


Fig. 12 Failure PV module (string 3) measured with PV tester developed.

## 4 Conclusions

The new custom instrument develop helps the investigation group to go further on field PV module failure analysis and obtain new values for future investigations.

Minimum voltage limits from commercial instruments are overcome, and bring new capability on field measurements to analyze PV panels, their PV string and PV cells. To have information from all components represent and advantage having references from all components.

It is valued very positively the flexibility provided by a custom instrument in terms of the capability to modify algorithms and hardware to investigation team requirements. To have full control over instrument functions and definition facilitate to adapt test procedure to different working conditions and enlarge the usability that it has.

Fig. 13 and Fig. 14 presents the hardware-implemented for developed I-V tester and the user interface design to facilitate measurements and user interaction on testing procedure.



Fig. 13 Numantia PCA photo.

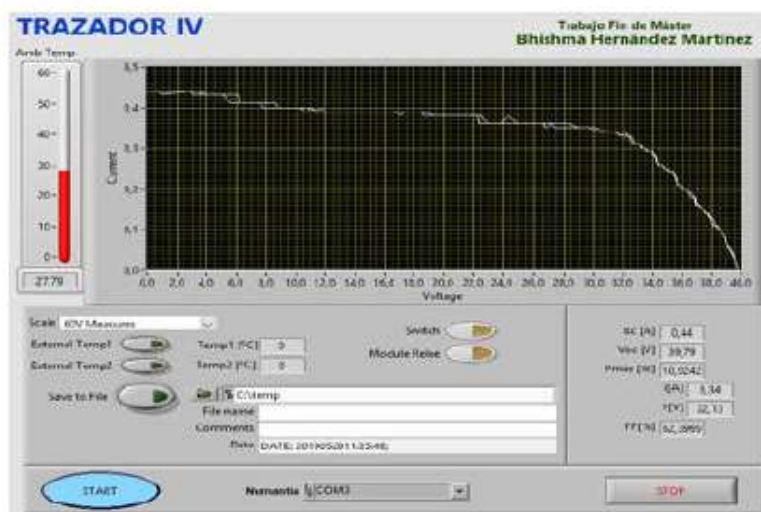


Fig. 14 User interface for I-V tester.

## Acknowledgments

The authors thank the CYTED Thematic Network "INTELLIGENT CITIES FULLY INTEGRAL, EFFICIENT AND SUSTAINABLE (CITIES)" n° 518RT0558. In addition, the work has been possible thanks to the "DOCTOR-PV" project Ref.: RTC-2017-6712-3, which has been funded by the "Ministry of Industry, Economy and Competitiveness, State R + D + i Program Oriented to the Challenges of the Society (Collaboration Challenges)".

## References

- [1]. Brenna, M., Calvo, M.C., Foadelli, F., Martirano, L., Massaro, F., Poli, D., Vaccaro, A.: Challenges in Energy systems for the smart-cities of the future. In: *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, 9-12 Sep. 2012, Florence (Italy).
- [2]. Al-Nory, M.T.: Optimal Decision Guidance for the Electricity Supply Chian Integration With Renewable Energy: Aligning Smart Cities Research With Sustainable Development Goals. *IEEE Access*, 7(May), 74996-75006 (2019).
- [3]. Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., Alonso-Gómez, V.: A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188(August), 426-440 (2019).
- [4]. Olowu, T.O., Sundararajan, A., Moghaddami, M., Sarwat, A.I.: Future Challenges and Mitigation Methods for High Photovoltaic Penetration: A Survey. *Energies*, 11(7), 1782-1814 (2018).
- [5]. Gercek, C., Reinders, A.: Smart Appliances for Efficient Integration of Solar Energy: A Dutch Case Study of a Residential Smart Grid Pilot. *Applied Sciences*, 9(3), 581-595 (2019).
- [6]. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, O.: Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants. *Energy*, 183(September), 825-836 (2019).
- [7]. Ashwini, P., Geethanjali, P. Parameter estimation for photovoltaic system under normal and partial shading conditions: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84(March), 1-11 (2018).
- [8]. Mellit, A., Tina, G.M., Kalogirou, S.A. A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(August), 1-17 (2018).
- [9]. Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Duque-Pérez, O.: Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(October), 566-579 (2018).
- [10]. Deitsch, S., Christlein, V., Berger, S., Buerhop-Lutz, C., Maier, A., Gallwitz, F., Riess, Ch.: Automatic classification of defective photovoltaic module cels in electroluminescence images. *Solar Energy*, 185(June), 445-468 (2019).

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco

TFM - Bhisma Hernández



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- 1- [www.censolar.es](http://www.censolar.es) , “La Energía Solar”.
- 2- Panayiotis Michalopoulos, “Thesis: A novel approach for the development and optimization of state-of-art photovoltaic devices using silvaco”, Naval postgraduate school, March 2002, Monterey; California.
- 3- Francisco Javier Jiménez Martínez, Neptalí Núñez Mendoza, Manuel Vázquez López, “Tema 4.Fundamentos Energías renovables”, EUITT-UPM.
- 4- Martin A. Green, “Solar cells. Operating principles, technology, and system applications”, Ed. Prentice-Hall.
- 5- Rafael Martín Lamaison, “Principios eléctricos de la célula”, 5 Marzo 2004, Universidad Pontificia de Comillas.
- 6- C. Algora, Ignacio Rey-Stolle, Beatriz Galiana, Iván García, José Ramón González, Mathieu Baudrit y Victoria Corregidor; “Células solares de semiconductores III-V para la generación de electricidad a costes competitivos” REF Enero-Marzo 2006, <http://www.rsef.org>
- 7- C. Algora, M. Baudrit, I. Rey-Stolle, D. Martín, R. Peña, B. Galiana y J. R. González, “Pending issues in the modelling of concentrator solar cells” Instituto de Energía Solar – E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.
- 8- PROJECT MANAGEMENT HANDBOOK. INTERact.  
[https://www.ewt.gov.pl/media/21120/Project\\_Management\\_Handbook.pdf](https://www.ewt.gov.pl/media/21120/Project_Management_Handbook.pdf)