



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Proyecto de Título

**Diseño y fabricación de módulo
Energy Harvesting de
tamaño reducido con
almacenamiento supercapacitivo.**

Proyecto de título para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico

Alumno
Alejandro Manuel Peralta Gajardo

Profesor Guía
Dr. Marcelo Pérez

Profesor Co-Referente
Dr. Christian Rojas

29 de Abril, 2021, Valparaíso, Chile

RESUMEN

EN la actualidad estamos comenzando la llamada cuarta revolución industrial o industria 4.0, ésta entre otras cosas depende fuertemente de la integración a gran escala de sensores y actuadores en diversos ambientes, con el fin de incrementar la capacidad de monitoreo y control de los diversos procesos involucrados. Es aquí donde nace el prefijo 'Smart' para denotar la inteligencia que se otorga a los procesos cuando se pueden extraer datos de ellos, ejemplos de este nuevo paradigma son, por mencionar algunos: las ciudades inteligentes (Smart-City) y la industria inteligente (Smart-Industry).

Esta revolución tecnológica ha permitido la implementación de algoritmos de aprendizaje de máquinas que día a día mejoran sus funcionalidades gracias a la gran cantidad de datos que éstas manejan. A su vez la llamada inteligencia artificial es utilizada para acelerar los avances de la tecnología de materiales, lo cual produce mayor dinamismo en el mercado de tecnologías mejorando así las funcionalidades de los dispositivos. Es este el caso del aumento en la eficiencia de transductores y convertidores.

La cosecha de energía (Energy Harvesting) es una técnica que se basa en capturar la energía del ambiente para transferirla a algún otro proceso. En el caso particular de la conversión a energía eléctrica para alimentar dispositivos electrónicos es posible identificar tres secciones que permiten el funcionamiento de un cosechador de energía: recolección, almacenamiento y distribución. Siendo la segunda opcional dependiendo de la fuente energética. Cuando se interceptan las necesidades de la industria 4.0, con los avances en términos de las crecientes eficiencias de los dispositivos electrónicos para realizar sus funciones, resulta natural pensar que la cosecha de energía puede ser un gran aliado para mantener redes de sensores de bajo consumo funcionando de manera autónoma.

Si se considera como fuente energética el sol, surge la necesidad de almacenar una porción de la energía capturada durante el día para alimentar al dispositivo por la noche, en este caso los sistemas de almacenamiento tradicionales como las baterías de litio ofrecen una gran densidad energética pero una corta vida útil (2 años aproximadamente). Es aquí donde las nuevas tecnologías de almacenamiento como el supercapacitor toma protagonismo aumentando la vida útil en al menos un orden de magnitud.

Palabras Claves

EDLC, Energy Harvesting, Industria 4.0, Smart City, Smart Industry, Supercapacitor, Paneles Fotovoltaicos.

ABSTRACT

At present we are beginning the so-called fourth industrial revolution or industry 4.0, this among other things strongly dependent on the large-scale integration of sensors and actuators in various environments, in order to increase the monitoring and control capacity of the various processes involved. This is where the *smart* prefix is born to denote the intelligence that is given to the processes when data can be extracted from them, a few examples of this new paradigm are Smart Cities and Smart Industry.

This technology revolution has allowed the implementation of machine learning algorithms that improve their functionalities day by day thanks to the large amount of data they handle. In turn, the so-called artificial intelligence is used to accelerate the advances in materials technology, which produces greater dynamism in the technology market, thus improving the functionalities of the devices. This is the case with the increase in the efficiency of transducers and converters.

Energy harvesting is a technique that is based on capturing energy from the environment to transfer it to some other process. In the particular case of the conversion to electrical energy to power electronic devices, it is possible to identify three sections that allow the operation of an energy harvester: collection, storage and distribution. The second being optional depending on the energy source.

When the needs of Industry 4.0 are intercepted, with advances in terms of the increasing efficiencies of electronic devices to perform their functions, it is natural to think that energy harvesting can be a great ally to keep low-power sensor networks running. autonomously.

If the sun is considered as an energy source, the need arises to store a portion of the energy captured during the day to power the device at night, in this case traditional storage systems such as lithium batteries offer a high energy density but a short shelf life (approximately 2 years). It is here where new storage technologies such as the supercapacitor take center stage, increasing the useful life by at least an order of magnitude.

Keywords

EDLC, Energy Harvesting, Industry 4.0, Smart City, Smart Industry, Supercapacitor, Photovoltaic Array.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ABREVIACIONES	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Alcances	2
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. Celdas Solares	3
2.2. Supercapacitores	4
2.3. Algoritmos MPPT	5
2.4. Convertidor Boost	8
3. DISEÑO	10
3.1. Requisitos Funcionales	11
3.2. Elección de componentes	11
3.2.1. Panel Solar	11
3.2.2. Supercapacitor	12
3.2.3. Harvesting PMIC	13
3.2.4. Boost PMIC	14
3.3. Componentes elegidas	15
3.3.1. Sistema de Recolección y Almacenamiento SPV1040	16
3.3.1.1. Diseño de capacitor de entrada C_{in}	17
3.3.1.2. Diseño de capacitor de entrada C_{in}	17
3.3.1.3. Diseño de filtro de medición de corriente Cf Rf1 Rf2 Rs	17
3.3.1.4. Diseño de voltaje de salida R1 R2	18
3.3.1.5. Diseño de capacitor de salida C_{out1}	18
3.3.1.6. Diseño de inductancia Lx	19
3.4. Sistema de Distribución TPS61201	19

3.4.1. Diseño de inductancia L1	20
3.4.2. Diseño de capacitor de entrada C1	20
3.4.3. Diseño de capacitor auxiliar C_{aux}	21
3.4.4. Diseño de capacitor de salida C_{out2}	21
3.5. Lista de Materiales	21
3.6. Diseño de PCB	22
3.7. Vistas	23
4. FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO	25
4.1. Soldadura de componentes	25
4.2. Pruebas de integridad	26
4.2.1. Panel solar	26
4.2.2. Supercapacitor	27
4.2.3. TPS61201	28
4.2.4. SPV1040	28
4.3. Retrabajo de la PCB	29
5. PRUEBAS	32
5.1. Prueba 1: Carga del sistema	33
5.2. Prueba 2: Descarga del supercapacitor	35
5.3. Prueba 3: Autonomía	36
6. CONCLUSIONES	38
6.1. Conclusiones	38
6.2. Trabajo Futuro	39
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	42

Índice de figuras

2.1. Esquema químico de un supercapacitor EDLC.	5
2.2. Diagrama de flujo del método de voltaje constante.	6
2.3. Diagrama de flujo del método de P&O.	7
2.4. Diagrama de flujo del método de conductancia incremental.	8
2.5. Estados de conmutación de un convertidor DC/DC tipo boost.	9
3.1. Diagrama de bloques del sistema de recolección, almacenamiento y regulación desarrollado.	11
3.2. Foto del panel solar escogido.	12
3.3. Diagrama funcional de bloques PMIC SPV1040.	14
3.4. Diagrama funcional de bloques PMIC TPS61201.	15
3.5. Esquemático de sistema de recolección y almacenamiento.	16
3.6. Esquemático de sistema de distribución.	20
3.7. Render 3D con aproximación del volumen de la PCB diseñada.	23
3.8. Bottom Gerber.	24
3.9. M1 Gerber.	24
3.10. Overlay Gerber.	24
3.11. Solder Gerber.	24
3.12. Solder Top Gerber.	24
3.13. Top Gerber.	24
4.1. Placa luego de salir del horno de reflujo.	26
4.2. Descarga circuito RC con $R = 2,2\Omega$ y $C = 3F$ para validación el funcionamiento del supercapacitor.	27
4.3. Simulación en PLECS para validación el funcionamiento del supercapacitor.	28
4.4. Esquemático modificado para retrabajo.	29
4.5. Referencia para retrabajo: En azul la zona de remoción de cobre, en rojo la zona de exposición de cobre para soldar el componente.	30
4.6. Curva de conducción diodo Schottky 621-B140HW-7.	30
4.7. Placa con diodo agregado, retrabajo realizado.	31
5.1. Disposición de conexión del circuito con el cual se realizan las pruebas.	32
5.2. Medición de carga del módulo en día soleado	33
5.3. Modo 1.	34
5.4. Modo 2.	34

5.5. Modo 3.	35
5.6. Modo 4.	35
5.7. Gráfica de autonomía del módulo.	37

Índice de tablas

2.1. Comparación entre supercapacitor y batería de ion de Litio.	4
3.1. Características Técnicas del panel fotovoltaico seleccionado.	12
3.2. Características supercapacitor seleccionado.	13
3.3. Pines de conexión PMIC SPV1040.	14
3.4. Pines de conexión PMIC TPS61201.	15
3.5. Lista de materiales para la construcción del módulo de Energy Harvesting.	21
4.1. Medición de Voc y Isc de los paneles solares y sus variaciones porcentuales respecto a sus los valores nominales.	26
4.2. Resultados de pruebas estáticas para validación del módulo TPS61201.	28
5.1. Diferencia de voltaje medida al cabo de 24 horas en los 3 escenarios.	36

ABREVIACIONES

PV	: <i>Fotovoltaico</i>
SC	: <i>Supercapacitor</i>
UC	: <i>Ultracapacitor</i>
EDLC	: <i>Electric Double Layer Capacitors</i>
PCB	: <i>Printed Circuit Board</i>
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	: <i>Maximum Power Point</i>
DC	: <i>Direct Current</i>
PMIC	: <i>Power Management Integrated Circuit</i>
P&O	: <i>Perturbación y Observación</i>

INTRODUCCIÓN

La memoria de titulación "Diseño y fabricación de módulo Energy Harvesting de tamaño reducido utilizando almacenamiento supercapacitivo", se centra en la creación de un sistema autónomo capaz de recolectar la energía solar, almacenarla en un supercapacitor y distribuirla como fuente de tensión regulada.

El proyecto inicia con la identificación de las principales componentes que deben conformar el circuito para satisfacer los objetivos de diseño, y así determinar su estructura gruesa como diagrama de bloques. Luego se realiza un sondeo en el mercado analizando las características de las distintas componentes para determinar su pertinencia en la implementación de cada sección del sistema. Seguido de esto se escogen las componentes a implementar y se diseñan diagramas esquemáticos para el sistema que permiten identificar cada una las componentes requeridas para el funcionamiento del circuito y su interconexión.

A partir de los diagramas esquemáticos se genera un diseño PCB en el software Altium Designer, el cuál permite generar los archivos los archivos Gerber (.g) para su fabricación. Luego se montan y sueldan manualmente las componentes de la PCB diseñada para luego validar el funcionamiento de cada uno de los módulos a nivel de laboratorio. Finalmente se realizan los retrabajos necesarios para la validación de su funcionamiento y se realizan pruebas en condiciones reales durante varios días. El proyecto culmina con la presentación de las capacidades del módulo diseñado, sus posibles usos y los desafíos futuros para su implementación.

1.1. Objetivos

El objetivo principal es el diseño y fabricación de un módulo de recolección, almacenamiento y distribución a partir de celdas solares, supercapacitores y convertidores de energía disponibles en el mercado. Los objetivos específicos se detallan en cada capítulo y se enuncian a continuación:

- Recopilar información de las tecnologías disponibles en el mercado de componentes electrónicas para la fabricación del módulo.
- Diseñar el esquemático, PCB, generar la de lista de materiales y archivos de fabricación, en base a las componentes seleccionadas.
- Montar las componentes en la PCB, realizar pruebas de integridad y resolver problemas en su funcionamiento.
- Probar el funcionamiento del módulo completo.
- Reportar las capacidades del módulo y mejoras futuras.

1.2. Alcances

Esta memoria pretende la materialización de un módulo de mínimo volumen y por lo tanto no establece un objetivo de autonomía energética, en caso de incorporarse futuramente en alguna aplicación se debe evaluar si las capacidades de este son compatibles con la aplicación, en caso de que la energía no fuera suficiente el sistema está desarrollado para su potencial paralelización.

ESTADO DEL ARTE

EN este capítulo se presentan las bases teóricas, se recopila la información y se presentan las figuras de mérito de las tecnologías disponibles en el mercado para el diseño del dispositivo de Energy Harvesting. Se hace especial énfasis en las tecnologías que están disponibles para compra, ya que este es un diseño que se debe materializar en el corto plazo.

2.1. Celdas Solares

Las células fotovoltaicas son dispositivos eléctricos semiconductores utilizados como transductores, vale decir logran convertir la energía lumínica en energía eléctrica a partir del fenómeno fisicoquímico llamado efecto fotovoltaico [2].

Existen distintos tipos de células fotovoltaicas y se pueden categorizar dependiendo de la cantidad de junturas que presente, del elemento químico que las forma y el nivel de refinamiento del cristal utilizado.

Comercialmente se las encuentra en formato agrupado (serie y/o paralelo) como paneles solares y de manera individual como celdas solares. En términos generales las celdas solares se agrupan en serie para producir una mayor tensión de salida y en paralelo para aumentar la corriente de salida.

En términos prácticos, las figuras de mérito que se buscan para diseñar un circuito en base a una determinada celda fotovoltaica son las siguientes:

- Voltaje de circuito abierto (V_{oc})
- Corriente de cortocircuito (I_{sc})
- Voltaje en punto de máxima potencia (V_{mpp})
- Corriente en punto de máxima potencia (I_{mpp})
- Potencia máxima (P_{max})

- Eficiencia de conversión (η)

2.2. Supercapacitores

El Supercapacitor (SC) o Ultracapacitor (UC) es un componente eléctrico pasivo de dos terminales capaz de almacenar energía. Está gobernado principalmente por las mismas ecuaciones fundamentales de los capacitores convencionales y se le otorga el prefijo *super* por sus altos valores de capacitancia si se compara con los capacitores a secas [4].

En términos constructivos el supercapacitor presenta dos electrodos (como el capacitor tradicional), pero separados por un electrolito (como las baterías) [5].

Existen 3 grandes tipos de supercapacitores:

- Electric Double Layer Capacitors (EDLC)
- Pseudocapacitor
- Capacitores Híbridos

El tipo de supercapacitor más comercializado corresponde al EDLC, por lo cual en este documento nos enfocaremos en el desarrollo de su funcionamiento.

Los supercapacitores EDLC son dispositivos de almacenamiento que permiten guardar mayor cantidad de energía que los condensadores convencionales y mayor densidad de potencia que las baterías. En la tabla 2.1 [3] se muestra la comparación entre las características de un supercapacitor y una batería de ion de litio, ampliamente utilizada hoy en día.

Function	Supercapacitor	Lithium-ion (general)
Charge time	1-10 seconds	10-60 minutes
Cycle life	1 million or 30,000h	500 and higher
Cell voltage	2.3 to 2.75V	3.6V nominal
Specific energy (Wh/kg)	5 (typical)	120-240
Specific power (W/kg)	Up to 10,000	1,000-3,000
Cost per kWh	\$10,000 (typical)	\$250-\$1,000 (large system)
Service life (industrial)	10-15 years	5 to 10 years
Charge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	0 to 45°C (32° to 113°F)
Discharge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	-20 to 60°C (-4 to 140°F)
Self-discharge (30 days)	High (5-40 %)	5 % or less
Cost per kWh	\$100 to \$500	\$1,000 and higher

Tabla 2.1: Comparación entre supercapacitor y batería de ion de Litio.

El EDLC utiliza el principio de capacitancia de doble capa en la interfaz del electrodo y electrolito. Las cargas eléctricas se acumulan en la superficie del electrodo e iones de la carga opuesta se alinean en el electrolito.

La Figura 2.1 [6] se observa la configuración típica de una celda EDLC. El material mas utilizado para la construcción del electrodo de la celda es carbón, aunque también se pueden

encontrar óxidos de metales de transición o mezclas de óxidos / polímeros de carbono y metales [7]. El electrolito puede ser acuoso o no dependiendo del modo en que esté construida la celda.

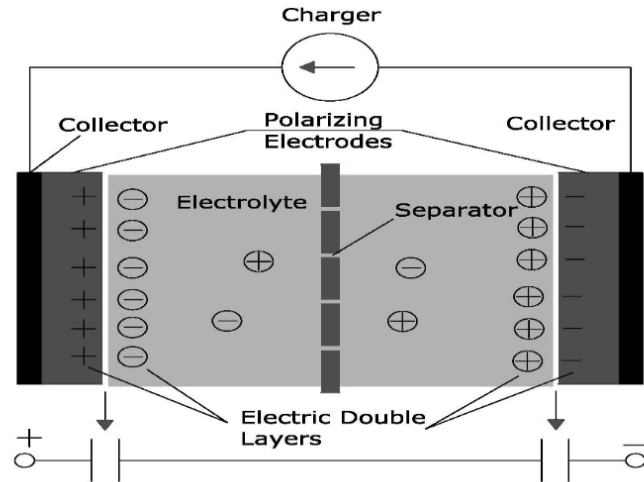


Figura 2.1: Esquema químico de un supercapacitor EDLC.

Entre las características eléctricas de los supercapacitores se tiene una capacitancia dependiente del voltaje. Esta variación en la capacitancia no suele afectar al rendimiento del supercapacitor, pero debe ser considerada en el diseño, con valores dentro del rango del 15 % al 20 % del valor nominal de la capacitancia [8].

2.3. Algoritmos MPPT

Los algoritmos MPPT tal como indica su nombre se utilizan para lograr dinámicamente la máxima extracción de potencia de una fuente variable de energía [9].

Su funcionamiento se basa en el teorema de máxima transferencia de potencia, el cuál enuncia que, para obtener la mayor potencia desde una fuente con una resistencia finita de salida, la resistencia de la carga debe ser igual a la resistencia de la fuente vista desde sus terminales de salida. Por lo tanto, la función de un algoritmo MPPT es variar la impedancia de entrada del dispositivo receptor de potencia para igualarla a la de la fuente.

En el caso particular de la utilización de celdas solares como fuente energética la impedancia de salida del panel solar cambia en el tiempo dependiendo de la cantidad de radiación que éste recibe y de la temperatura a la que se encuentra. Además, en sistemas que involucran arreglos de celdas solares existe la posibilidad de que estén en distintos puntos de operación, como por ejemplo es el caso del sombreado parcial donde la impedancia de salida del panel aumenta, disminuyendo la potencia disponible y desplazando el máximo.

Los algoritmos son rutinas de programación que permiten extraer mayor cantidad de potencia de una fuente energética con su implementación. Existen distintos desarrollos de algoritmos MPPT con distintos enfoques cada uno [10].

Los algoritmos MPPT más comunes son los siguientes [11]:

- Método de voltaje constante: Mantiene la tensión constante en la celda. Funciona cuando no existen variaciones considerables en la temperatura. Es simple de implementar y el movimiento del punto máximo es horizontal.

En la Figura 2.2 se observa el diagrama de flujo que se utiliza para implementar este algoritmo.

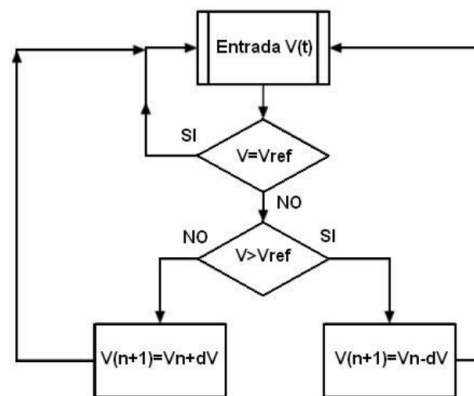


Figura 2.2: Diagrama de flujo del método de voltaje constante.

- Método de Perturbación y Observación (P&O): Utiliza los valores instantáneos de las señales de voltaje y corriente para medir potencia, comparándola con una muestra anterior y variando el cambio en cada muestra para encontrar el MPP. Tiene problemas dinámicos para pasos grandes.

Es ampliamente utilizado en distintas aplicaciones. En la Figura 2.3 se observa el diagrama de flujo de implementación de este algoritmo.

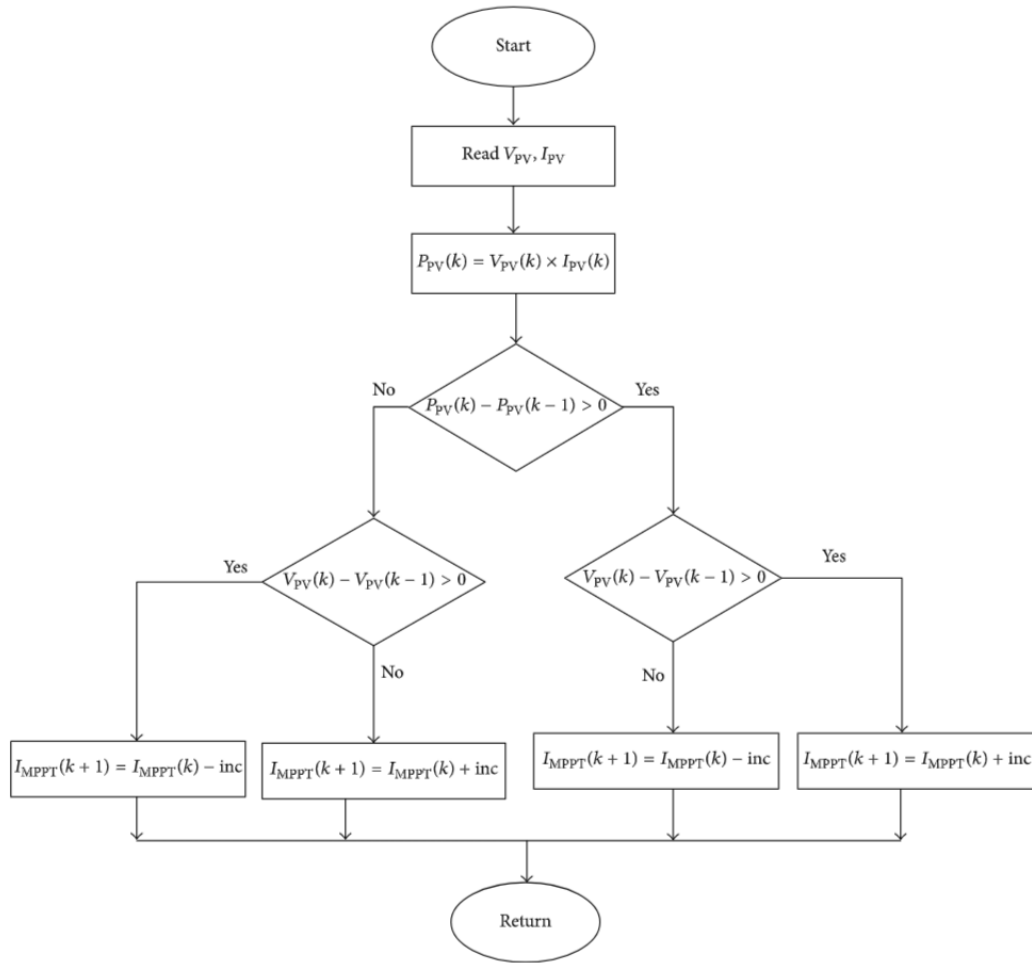


Figura 2.3: Diagrama de flujo del método de P&O.

- Método de conductancia incremental: Deriva la potencia para encontrar el máximo. Tiene buen rendimiento pero es más costoso de implementar. En la Figura 2.4 se observa el diagrama de flujo de este algoritmo.

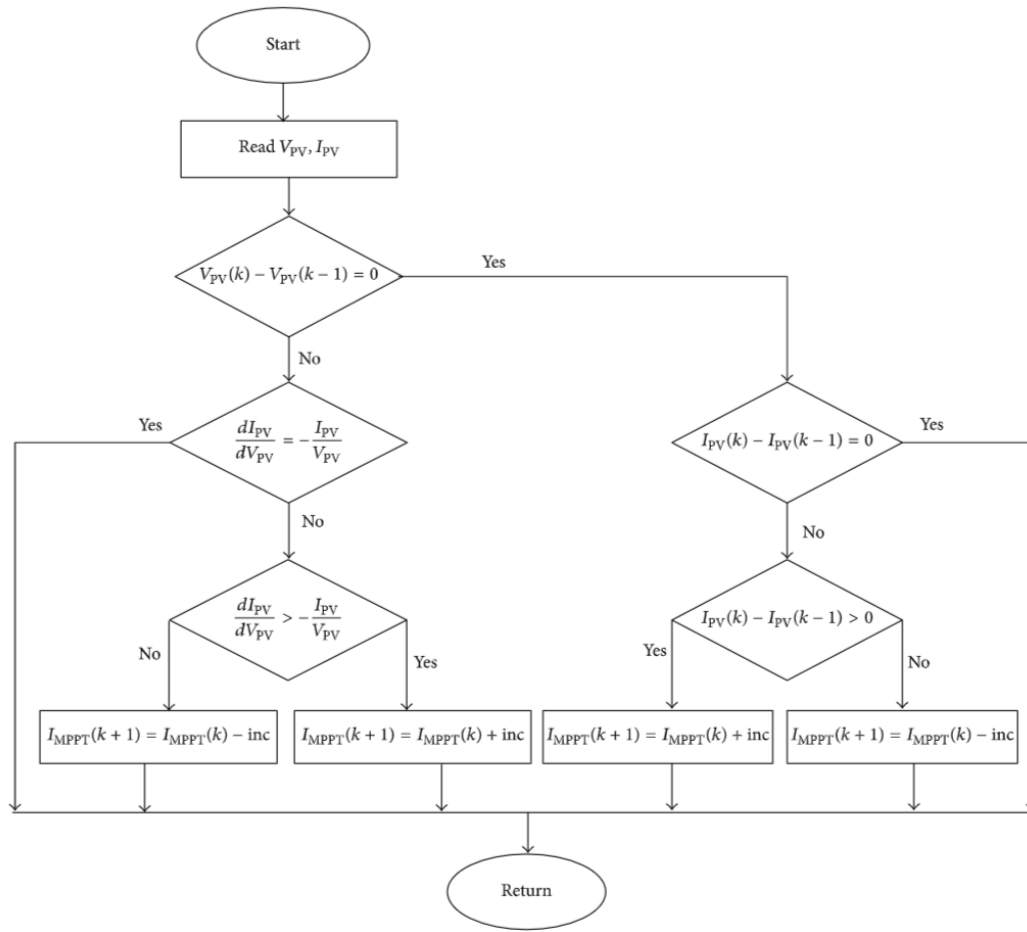


Figura 2.4: Diagrama de flujo del método de conductancia incremental.

2.4. Convertidor Boost

El convertidor boost o elevador es una topología de convertidor del tipo DC/DC que, tal como su nombre lo indica, es capaz de generar una tensión de salida mayor que la entrada.

En su versión más simple está compuesto por dos elementos semiconductores (diodo y transistor), un elemento almacenador de energía para la entrada (inductor) y otro para la salida (condensador).

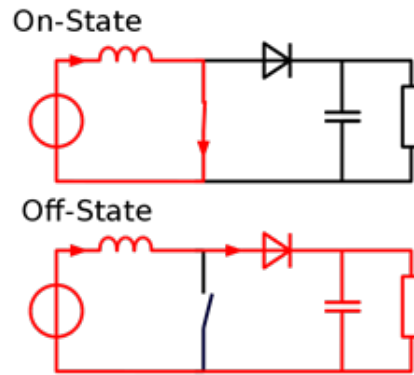


Figura 2.5: Estados de conmutación de un convertidor DC/DC tipo boost.

Estos convertidores son ampliamente utilizados por su bajo costo, baja interferencia electromagnética y fácil implementación [12].

La salida de este convertidor depende del ciclo de trabajo. En estado estacionario se puede ver que la relación es:

$$V_o = -V_d \frac{D}{1-D}$$

Esta relación implica que el voltaje tiene sentido inverso a la entrada y que modificando el ciclo de trabajo es posible utilizar el convertidor como elevador cuando el ciclo de trabajo es mayor al 50 % o como reductor cuando el ciclo de trabajo es menor al 50 %.

Capítulo 3

DISEÑO

En este capítulo se detallan los pasos seguidos para el diseño del módulo de Energy Harvesting.

Para comenzar el diseño es fundamental comprender el sistema completo como una integración de subsistemas más pequeños y así dividir las tareas de cada módulo. Por lo tanto, en un inicio se hablará de 3 subsistemas: Recolección, almacenamiento y regulación.

El subsistema de recolección utiliza como fuente primaria la energía solar capturada a través de células fotovoltaicas (PV) e incorpora control activo de la potencia extraída (MPPT) para así asegurar la mayor cantidad de potencia transferida al sistema de almacenamiento.

El subsistema de almacenamiento consta de un supercapacitor cuya carga está dominada por el subsistema de recolección y su descarga por el subsistema de distribución.

El subsistema de distribución obtiene su energía del subsistema de almacenamiento y regula activamente la tensión de salida a 3.3V mediante un convertidor boost.

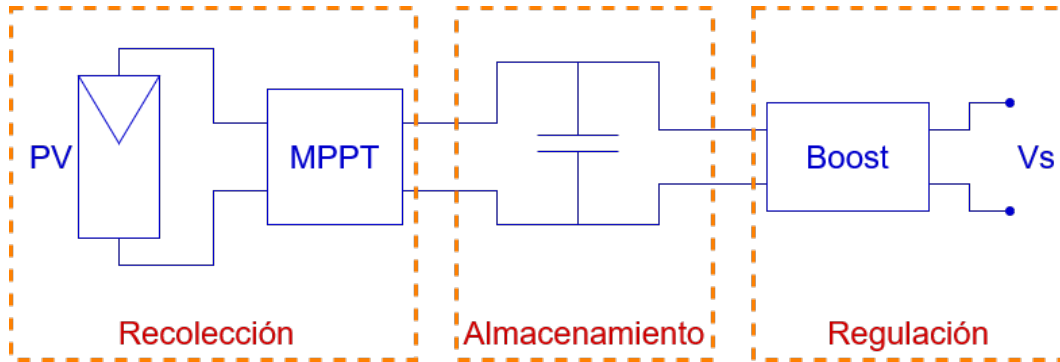


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de recolección, almacenamiento y regulación desarrollado.

3.1. Requisitos Funcionales

La aplicación debe tener el mínimo volumen posible. Para ello se comienza la selección de componentes con el panel solar de menor tamaño y máxima eficiencia disponible en el mercado, luego en base a su potencia nominal se dimensiona un supercapacitor capaz de almacenar la energía recolectada durante el día, finalmente se seleccionan los PMICs acordes a los niveles de tensión y potencia del supercapacitor y el panel solar.

El sistema debe ser capaz de recolectar energía solar durante el día y debe implementar el algoritmo MPPT para maximizar la potencia extraída.

El circuito debe entregar energía comportándose como fuente de tensión a 3.3V y ser capaz de responder a escalones de carga de hasta 100mA.

El almacenamiento debe ser en base a un supercapacitor, ya que corresponde a un método innovador para almacenar energía con respecto a la tecnología actual, ya que la unidad de procesamiento, transmisión y sensorizado de bajo consumo se puede realizar con mayor eficiencia.

3.2. Elección de componentes

La elección de las principales componentes que conforman el módulo, se escogen mediante el establecimiento de filtros de acuerdo a las especificaciones establecidas en los requisitos funcionales en páginas de proveedores internacionales de componentes electrónicas (Mouser, RS, Digikey, etc).

3.2.1. Panel Solar

Para la elección del panel solar se tuvieron en consideración los siguientes aspectos:

- Se descartan los paneles que no sean monocristalinos, para lograr la máxima eficiencia de conversión.

- Se filtran los primeros 100 paneles solares más pequeños para lograr un módulo de tamaño reducido.
- Se desea utilizar un circuito boost de entrada por lo tanto el voltaje de circuito abierto no puede superar los 2.7V (voltaje máx. típico de los supercapacitores).
- El voltaje de circuito abierto debe ser el más cercano a 2.7V para minimizar la corriente de entrada.



Figura 3.2: Foto del panel solar escogido.

Panel solar monocrystalino compuesto por 3 celdas solares, sus características principales se detallan a continuación en la tabla 3.1 y fueron obtenidos a partir de la hoja de datos del fabricante [13].

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
Voc	Voltaje de circuito abierto	2.07	V
Isc	Corriente corto circuito	19.5	mA
Vmpp	Voltaje en punto de máx. eficiencia	1.67	V
Impp	Corriente en punto de máx eficiencia	18.4	mA
Pmpp	Máxima potencia	30.1	mW
n	Eficiencia celda solar	25	%
L	Largo	23	mm
W	Ancho	8	mm
H	Alto	1.8	mm
V	Volumen	331	mm ³

Tabla 3.1: Características Técnicas del panel fotovoltaico seleccionado.

3.2.2. Supercapacitor

Para la elección del supercapacitor se tuvieron en consideración los siguientes aspectos:

- Tamaño inferior a 23x8mm con la finalidad de estar confinado bajo el área del panel solar.

- Se utiliza solamente una unidad con la finalidad de evitar el diseño de un circuito de balance.
- Máxima densidad energética, en base a los requisitos de volumen anterior.
- Capacitor tipo EDLC.
- Voltaje máximo inferior a 3.3V.

El supercapacitor escogido corresponde al SC Illinois 3V3F DSF.

El supercapacitor seleccionado está pensado para alcanzar un valor de plena carga en un tiempo de 1 hora considerando una eficiencia η del 10 % este cálculo incluye las pérdidas de conversión y las debidas a bajo nivel de radiación.

$$T_c = \frac{E_{sc}}{P_{in} * n} = \frac{3,75mWh}{30,1mW * 0,1} = 1,25h$$

Las características del supercapacitor se resumen en la siguiente tabla.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
Vdc	Voltaje DC máximo	3.0	V
Esc	Máxima energía almacenada	3.75	mWh
ESR	Resistencia serie	80	mOhms

Tabla 3.2: Características supercapacitor seleccionado.

3.2.3. Harvesting PMIC

De los circuitos capaces de recolectar energía del mercado se selecciona en base a los siguientes criterios:

- Mínima cantidad de componentes externos
- Capacidad de realizar MPPT activo
- Regulación de voltaje de salida

El PMIC seleccionado corresponde al circuito integrado SPV1040 en la tabla 3.3 se resumen las características de los pines de entrada del circuito y la figura 3.3 muestra su diagrama funcional.

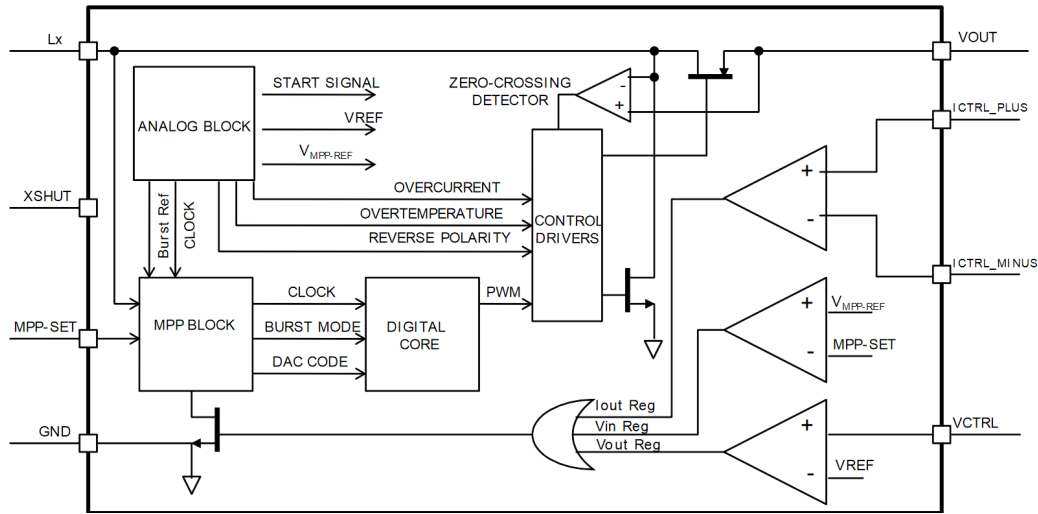


Figura 3.3: Diagrama funcional de bloques PMIC SPV1040.

Pin	Nombre	Descripción
1	MPP-SET	Entrada no inversora para medir el voltaje la tensión del panel solar
2	GND	Referencia de tierra de poder
3	Lx	Pin de conexión para inductor
4	Vout	Salida del convertidor boost
5	Vctrl	Entrada inversora de la regulación del voltaje de salida
6	Ictr_minus	Entrada inversora de la regulación del corriente de salida
7	Ictr_plus	Entrada no inversora de la regulación del corriente de salida
8	Xshut	Pin de habilitación (Deshabilitado = GND)

Tabla 3.3: Pines de conexión PMIC SPV1040.

3.2.4. Boost PMIC

Para el diseño del circuito de distribución se selecciona un PMIC de topología boost que sea capaz de extraer la mayor cantidad de energía del supercapacitor, esto se traduce en la posibilidad de operar con los menores niveles de tensión posibles.

es necesario tomar en cuenta que la tensión de entrada de este será la tensión del supercapacitor (2.7V a 3V máximo), en consecuencia, la tensión de entrada siempre será menor que la tensión de salida.

El PMIC seleccionado corresponde al circuito integrado TPS61201 en la tabla 3.4 se resumen las características de los pines de entrada del circuito y la figura 3.4 muestra su diagrama funcional.

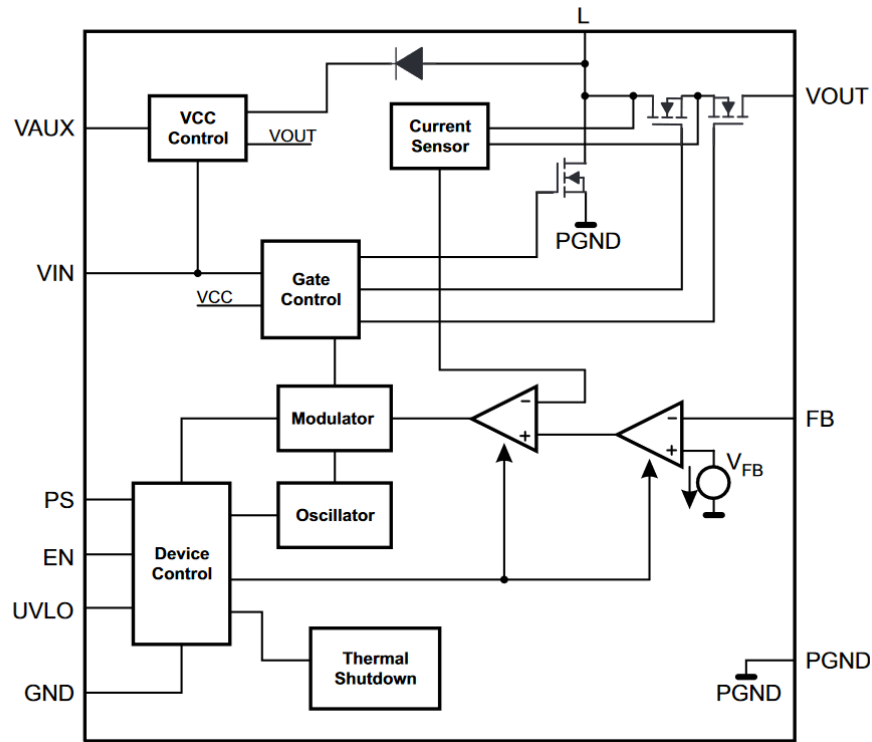


Figura 3.4: Diagrama funcional de bloques PMIC TPS61201.

Pin	Nombre	Descripción
1	Vaux	Fuente de voltaje para la etapa de control
2	Vout	Salida del convertidor boost
3	L	Pin de conexión para inductor
4	PGND	Tierra de poder
5	Vin	Tensión de entrada del convertidor boost
6	EN	Pin de habilitación (Habilitado = Vin)
7	UVLO	Protección de bajo voltaje (conectar a vaux para deshabilitar)
8	PS	Pin selección modo bajo consumo (Habilitado = GND)
9	GND	Tierra de control
10	FB	Realimentación de salida

Tabla 3.4: Pines de conexión PMIC TPS61201.

3.3. Componentes elegidas

En esta memoria de título se desarrolla un sistema de recolección, almacenamiento y distribución de energía para ser utilizado como módulo energético en proyectos de ultra bajo consumo.

En base a los requisitos funcionales se seleccionan 2 circuitos integrados convertidores de energía de tipo boost, un supercapacitor y un panel solar que permiten el funcionamiento global del sistema, a continuación, se detallan las características técnicas más relevantes de cada uno de ellos:

- Panel solar KXOB25-05X3F
- Supercapacitor Illinois 3V3F
- Distribución TPS61201.
- - Recolección/almacenamiento SPV1040: El PMIC SPV1040 es un convertidor DC/DC de tipo boost sincrónico que provee una salida ajustable hasta 5.2V. Es capaz de entrar en operación desde los 0.3V en su entrada. Su frecuencia de operación es fija a 100kHz e incorpora un algoritmo de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT) de tipo perturba y observa.

Para el correcto y óptimo funcionamiento de los PMICs es necesario la selección de componentes adicionales, el diseño de éstas se detalla en la sección siguiente.

El diseño de componentes se divide en el diseño de los dos PMICs seleccionados. Los valores de los elementos pasivos adicionales que acompañan a ambos convertidores se obtienen según las ecuaciones por los fabricantes en sus notas de aplicación y hoja de datos [15] [16] [17] [18] y su aproximación a valores nominales presentes en el mercado.

3.3.1. Sistema de Recolección y Almacenamiento SPV1040

En la figura 3.5 se muestra el esquemático realizado en el software Altium Designer para el subsistema de recolección y almacenamiento.

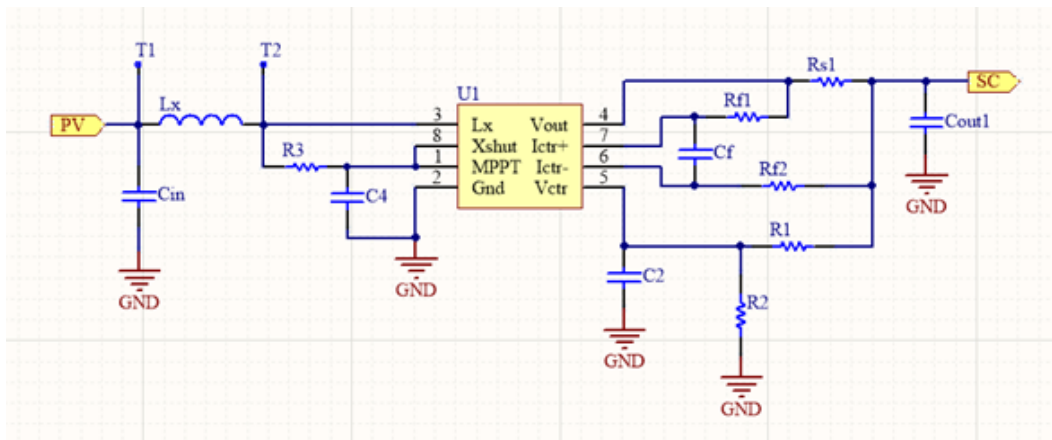


Figura 3.5: Esquemático de sistema de recolección y almacenamiento.

3.3.1.1. Diseño de capacitor de entrada C_{in}

El capacitor de entrada C_{in} tiene la función al ripple de entrada $V_{in_rp_max}$, en este caso se diseña considerando un ripple de entrada ($V_{in_rp_max}$) de valor 20mV. La ecuación mostrada a continuación rige el diseño de C_{in} utiliza como parámetros la corriente de cortocircuito del panel solar (I_{sc}) y la frecuencia de conmutación propia del SPV1040.

$$C_{in} \geq I_{sc} / F_{sw} * V_{in_rp_max}$$

$$C_{in} \geq 19,5mA / (100kHz * 20mV)$$

$$C_{in} \geq 9,75\mu F$$

Por lo tanto, el valor de capacitancia escogida para C_{in} es de 10 μ F.

3.3.1.2. Diseño de capacitor de entrada C_{in}

El filtro formado por R3 y C4 tiene dos funciones. La primera corresponde a fijar una referencia de voltaje en el pin Xshut, en este caso se desea que el circuito comience a operar desde el mínimo posible, por lo tanto, se conecta el pin Xshut directamente a la inductancia a través de una resistencia serie, esto permite que el circuito comience su operación desde los 0.3V. La segunda función corresponde al diseño de una constante de tiempo ($R3 * C4$) para determinar el tiempo con el que se realiza el seguimiento del algoritmo MPPT (T_{mppt}).

El fabricante recomienda una resistencia serie R3 de 1k Ω . El tiempo de seguimiento del algoritmo MPPT (T_{mppt}) se fija en 1ms, por lo tanto, el diseño de C4 se basa en la siguiente ecuación:

$$C4 \leq (T_{mppt} / R3)$$

$$C4 \leq (1ms / 1k\Omega) = 1\mu F$$

$$C4 \leq 1\mu F$$

Por lo tanto, el valor de capacitancia escogida para C_{in} es de 0.1 μ F.

3.3.1.3. Diseño de filtro de medición de corriente Cf Rf1 Rf2 Rs

El PMIC SPV1040 permite ajustar una corriente máxima de salida a través del diseño de una resistencia shunt (R_{s1}) de tal forma que cuando por ella circule la corriente máxima de salida debe levantar una tensión de 50mV. El diseño del filtro Rf1 Rf2 y Cf es necesario para la atenuación del ruido en los bajos de tensión en la resistencia shunt.

Dado que la corriente de cortocircuito del panel es 3 órdenes de magnitud inferior a la corriente máxima del supercapacitor, la restricción de máxima corriente se fija en 500mA (I_{out_max}) con la única finalidad de proteger al circuito ante eventuales fuentes de baja impedancia en condiciones de pruebas, el diseño de la resistencia shunt R_{s1} se basa en la

siguiente ecuación:

$$Rs = 50mV/I_{out_{max}}$$

$$Rs = 50mV/500mA = 100m\Omega$$

Para la generación del filtro de medición de corriente en la R shunt (Rs) el fabricante recomienda los siguientes valores:

$$Rf1 = Rf2 = 1k\Omega$$

$$Cf = 1\mu F$$

3.3.1.4. Diseño de voltaje de salida R1 R2

El voltaje máximo de salida se establece mediante el divisor resistivo formado por R1 y R2, la relación entre R1 y R2 está establecida por la siguiente ecuación:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{V_{out_{max}}}{1,25} \frac{R1}{R2} = \frac{3}{1,25} = 1,4 \quad (3.1)$$

Es importante notar que el divisor resistivo está conectado en paralelo al supercapacitor, en consecuencia, dicho divisor se comporta como una carga en todo momento, por lo tanto, es importante fijar un límite para la potencia disipada por el divisor resistivo el fabricante recomienda mantener la corriente del divisor en un rango de 2uA a 20uA, en consecuencia, la suma de las resistencias debe oscilar entre los siguientes valores:

$$2\mu A < \frac{V_{out_{max}}}{R1 + R2} < 20\mu A$$

$$1,5M\Omega < R1 + R2 < 15M\Omega$$

En base a las 2 ecuaciones anteriores se diseña una R1 de 6.98M Ω y una R2 de 5.1M Ω con la finalidad de generar un voltaje de salida $V_{out_{max}}$ de 2.96V con la finalidad de no superar los 3V en el supercapacitor.

3.3.1.5. Diseño de capacitor de salida C_{out1}

Se diseña en base a un ripple de salida de 100mV ($V_{out_{rp_{max}}}$), teniendo en consideración que será muy bajo porque va conectado directamente a un supercapacitor. La ecuación de diseño es la siguiente:

$$Rf1 = Rf2 = 1k\Omega$$

$$Cf = 1\mu F$$

$$C_{out} \geq \frac{I_{sc}}{F_{sw} * V_{out_{rp_{max}}}}$$

$$C_{out} \geq \frac{19,5mA}{100kHz * 100mV}$$

$$C_{out} \geq 1,95uF$$

3.3.1.6. Diseño de inductancia Lx

Para el diseño de la inductancia Lx los parámetros más críticos corresponden a la corriente de saturación y su tamaño. Se recomiendan bajos valores de inductancia para lograr mayores eficiencias y con resistencia serie (ESR) lo más bajo posible. La formula empírica utilizada para dimensionar la inductancia es la siguiente:

$$Lx > 0,5 * (9e - 6) * \frac{Vmp}{2 - Imp}$$

$$Lx > 0,5 * (9e - 6) * \frac{1,67V}{2 - 18,4mA}$$

$$Lx > 3,8uH$$

En consecuencia, se escoge una inductancia de valor 10uH para el diseño. Luego es importante escoger un valor de corriente de saturación (ILxsat) mayor que la corriente peak máxima, para ello se realiza la siguiente aproximación:

$$I_{Lxsat} > Imp + \frac{(9e - 6) * Vmp}{Lx}$$

$$I_{Lxsat} > 18,4mA + \frac{(9e - 6) * 1,67V}{10uH}$$

$$I_{Lxsat} > 0,8A$$

Lo cuál resulta en la elección de un inductor que tenga al menos una corriente de saturación superior a 1A.

3.4. Sistema de Distribución TPS61201

En la figura 3.6 se muestra el esquemático realizado en el software Altium Designer para el subsistema de distribución.

$$C1 > 4,7\mu F$$

$$C1 = 10\mu F$$

3.4.3. Diseño de capacitor auxiliar C_{aux}

Como el voltaje de entrada es inferior a en algunos casos 2.5V el fabricante recomienda una capacitancia de 1uF.

$$C_{aux} = 1\mu F$$

3.4.4. Diseño de capacitor de salida C_{out2}

El diseño del capacitor de salida se diseña según la siguiente ecuación recomendada por el fabricante:

$$C_{out} = 5 * L1 = 11\mu F$$

3.5. Lista de Materiales

Luego de diseñar todas las componentes se genera una lista de materiales con los part number de cada una de las componentes a utilizar con la finalidad de realizar la compra de los componentes que se requieren para fabricar 1 módulo completo. La lista de materiales se encuentra en la Tabla 3.5.

Identificador	Cantidad	Part Number	Descripción
Lx	1	LQH3NPN100MMEL	Inductancia 10uH
R3,Rf1,Rf2	3	RC0603FR-071KL	Resistencia 1kOhm 0603
C4	1	TMK107BJ104KA	Capacitor 0.1uF 0603
C2	1	C0603C102K3GACTU	Capacitor 1nF 0603
R1	1	CRCW06036M98FKEA	Resistencia 6.98MOhm 1 % 0603
R2	1	CRCW06035M10FKEA	Resistencia 5.1MOhm 1 % 0603
Cout1,Cout2,Cin,C1	2	0603ZD106KAT2A	Capacitor 10uF 0603
Cf, Caux	1	C0603C105K8RACTU	Capacitor 1uF 0603
Rs1	1	ERJ-3RSFR10V	Resistencia 0.1Ohm 1 % 0603
H1,H2	2	GRPB031VWVN-RC	Pin header 3 pos 1.27mm
L1	1	LQH3NPN2R2MMEL	Inductancia 2.2uH
T1,T2,T3,T4	4	5005	Test point
SC	1	DSF305Q33R0	Supercap 3V 3F
PV	1	KXOB25-05X3F-TR	Panel Solar Ixys
U1	1	SPV1040TTR	PMIC recolección
U2	1	TPS61201	PMIC distribución

Tabla 3.5: Lista de materiales para la construcción del módulo de Energy Harvesting.

3.6. Diseño de PCB

El diseño de PCB se lleva a cabo en el software Altium Designer siguiendo las siguientes consideraciones de diseño:

- PCB de 2 capas dada la baja cantidad de componentes.
- Plano inferior como plano de tierra.
- Condensadores y resistencias con footprint 0603.
- Pads térmicos en todas las vías a tierra.
- Test points y jumpers cercanos al borde la tarjeta.
- Diseño cuadrado de 16x16mm

En primera instancia es necesario asociar una librería de pcb (.pcblib) que contiene los footprint y las aproximaciones físicas (.step) de los componentes del circuito para evitar colisiones al momento de posicionar las mismas, los elementos de ésta librería están asociados dinámicamente a cada uno de los elementos del esquemático. Seguido de esto se compila el diagrama esquemático (.SchDoc) en un archivo pcb (.PcbDoc) y posicionan tentativamente las componentes según las recomendaciones de interconexión. Una vez posicionadas las componentes es importante conectar primero todas las secciones en las que circula mayor corriente reservando para estos un ancho de pista de 17mils y mantener los trazos lo más corto posible para evitar pérdidas en la integridad de las señales. Finalmente se crean los planos de tierra en las secciones vacías de la PCB y se conectan dichos planos a las vías en 4 secciones formando un puente térmico para facilitar la soldadura manual.

Una vez diseñada la PCB se procede a exportar los archivos gerber y drills necesarios para la fabricación.

3.7. Vistas

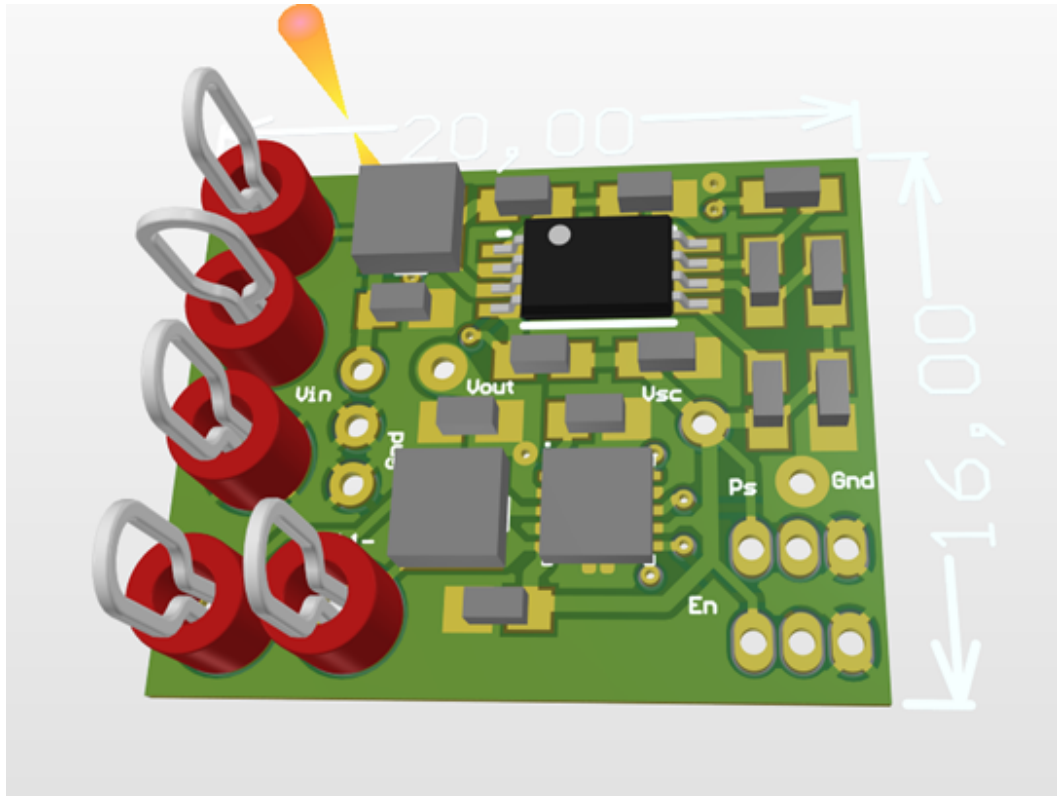


Figura 3.7: Render 3D con aproximación del volumen de la PCB diseñada.

Los archivos gerbers utilizados para la construcción de la PCB se detallan a continuación:

- Top Gerber En la figura 3.13 se encuentra el archivo gerber que indica en color rojo las secciones que presentan cobre en la capa superior
- Bottom Gerber En la figura 3.8 se encuentra el archivo gerber que indica en color azul las secciones que presentan cobre en la capa inferior.
- M1 Gerber En la figura 3.9 se encuentra el archivo gerber que indica en color fucsia la ubicación de las componentes con su respectivo identificador para el montaje.
- Overlay Gerber En la figura 3.10 se encuentra el archivo gerber que indica en color amarillo las medidas de la PCB diseñada y las leyendas impresas en la misma.
- Solder Gerber En la figura 3.11 se encuentra el archivo gerber que indica en color gris las perforaciones que se deben realizar en el stencil para posicionar la pasta de soldar.
- Solder Gerber En la figura 3.12 se encuentra el archivo gerber que indica en color morado los sectores que no llevan máscara antisoldante.

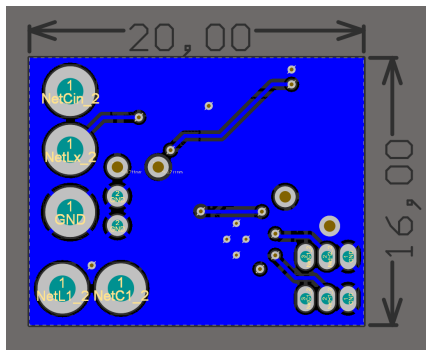


Figura 3.8: Bottom Gerber.

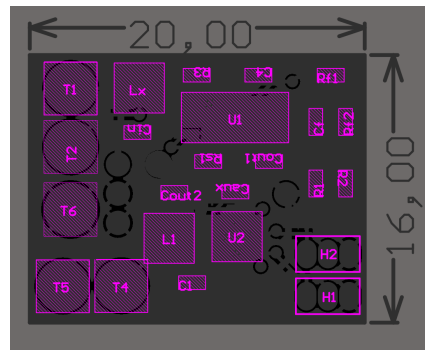


Figura 3.9: M1 Gerber.

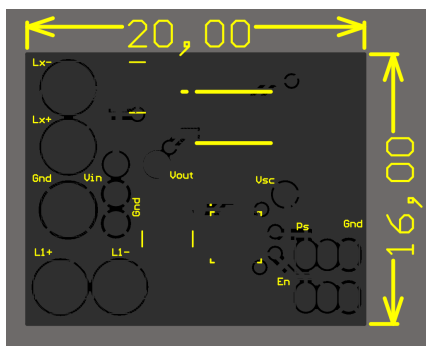


Figura 3.10: Overlay Gerber.

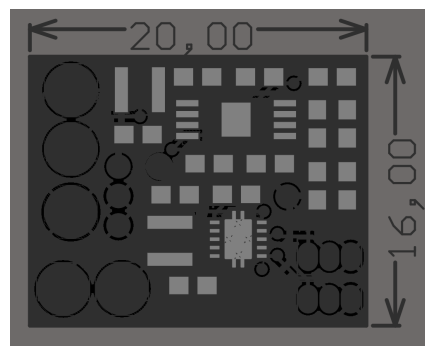


Figura 3.11: Solder Gerber.

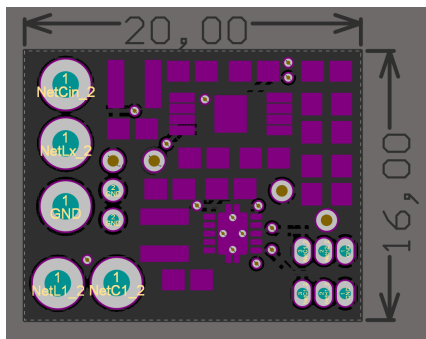


Figura 3.12: Solder Top Gerber.

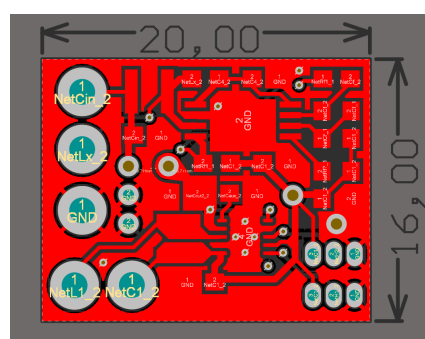


Figura 3.13: Top Gerber.

FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se detallan los procesos que se llevaron a cabo para la construcción del dispositivo diseñado en el capítulo anterior.

La fabricación contempla el adherir las componentes seleccionadas a la placa diseñada, y además asegurar el funcionamiento de cada una de las partes, tanto individuales como en la integración final.

Para esto se realizan pruebas de validación de las componentes para asegurar el buen funcionamiento del sistema final en su totalidad.

4.1. Soldadura de componentes

Para realizar el proceso de soldadura manual primero se alinea el stencil metálico con la PCB y se cubre uniformemente la superficie de los solder pads con pasta de soldar. Luego con la ayuda de pinzas y una lupa estereoscópica se posicionan todas las componentes según las indicaciones de la de capa mecánica generada para estos fines (.GM1).

Finalmente se lleva la pcb al horno de reflujo siguiendo un perfil de temperatura típico con una temperatura de soldado peak de 240°C. y un precalentamiento de 180 segundos. En la figura 4.3 se muestra la PCB luego del proceso de horneado.

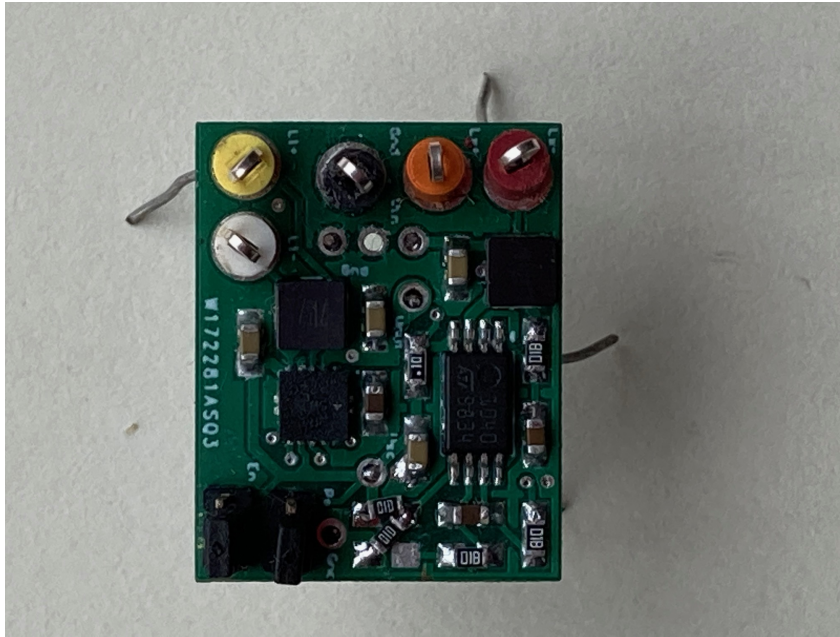


Figura 4.1: Placa luego de salir del horno de reflujo.

4.2. Pruebas de integridad

Luego del soldado de las componentes SMD se realiza una prueba de continuidad en todos los nodos del circuito para verificar que la soldadura no presente cortocircuitos.

Antes de integrar el módulo por completo se revisan cada una de sus secciones realizando pruebas sencillas que permitan identificar problemas en alguna de ellas que impidan el funcionamiento del sistema.

4.2.1. Panel solar

Para verificar la integridad de los paneles solar se mide con un multímetro el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito en un día soleado con el panel apuntando hacia el sol, los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.1.

Panel	Voc [V]	Isc [mA]	% Var Voc	% Var Isc
1	2.04	18.9	1.45	3.08
2	2.02	18.8	2.42	3.59
3	1.99	19.2	3.87	1.54
4	2.06	19.4	0.48	0.51
5	1.98	19.1	4.35	2.05

Tabla 4.1: Medición de Voc y Isc de los paneles solares y sus variaciones porcentuales respecto a sus los valores nominales.

Los resultados de V_{oc} e I_{sc} obtenidos varían en torno a un 5 % de sus valores nominales, lo cual, es aceptable considerando que no se tiene una medición de la cantidad de radiación y que se producen variaciones dependiendo de la posición del panel. Además, se verificó que la tensión de circuito abierto es sensible al nivel de sombreado que presente el panel.

4.2.2. Supercapacitor

Para verificar la integridad de los supercapacitores se carga uno de ellos a su voltaje nominal con una fuente de laboratorio, luego se genera una descarga conectándolo en paralelo a una resistencia de 2.2Ω y se registra su caída de tensión en el osciloscopio en un intervalo de 24 segundos. En la figura 4.2 se encuentra la descarga del supercapacitor realizada.

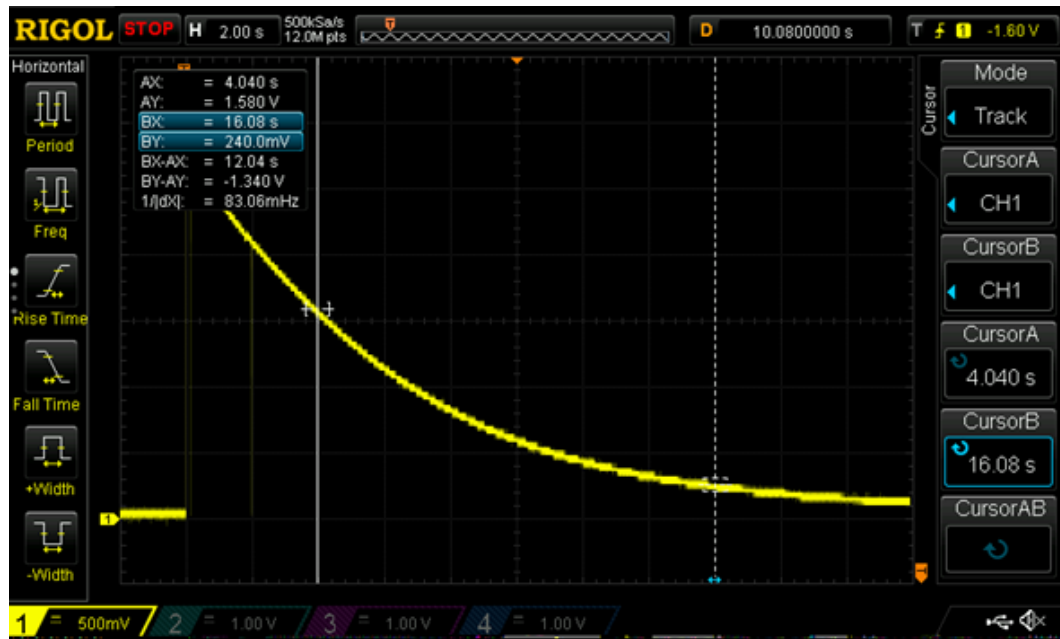


Figura 4.2: Descarga circuito RC con $R = 2,2\Omega$ y $C = 3F$ para validación el funcionamiento del supercapacitor.

El resultado se contrasta con el resultado de una simulación en PLECS (ver figura XX) para el intervalo en el que se ubican los cursores y se determina que ambas curvas de descarga son similares ya que se diferencian en su valor final por tan solo 15mV, lo cual permite validar el funcionamiento del supercapacitor.

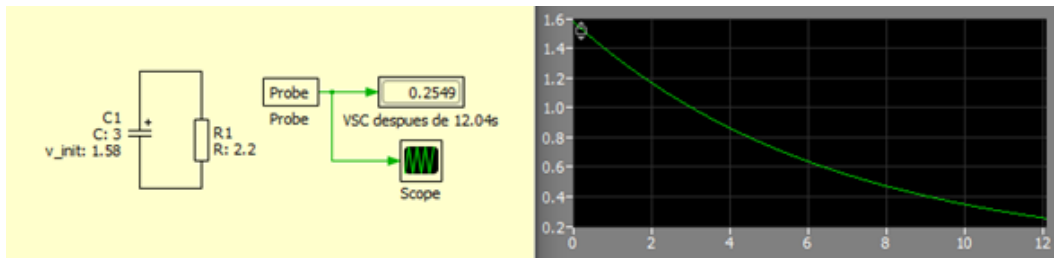


Figura 4.3: Simulación en PLECS para validación el funcionamiento del supercapacitor.

4.2.3. TPS61201

Para realizar la validación del circuito TPS61201 primero se realiza una remoción de las esferas de estaño que se observan alrededor del circuito. Seguido de esto se alimenta con una fuente de laboratorio a 500mV/3V de tensión y 200mA/100mA de corriente máxima de salida, para verificar con un tester si en su salida se presenta la regulación a 3.3V en circuito abierto. Además, se alternan y verifican las funcionalidades de los pines EN y PS mediante el movimiento de los jumpers H1 y H2. En la tabla 4.2 se encuentra la información resumida de las pruebas realizadas.

Tensión de entrada [V]	Tensión de salida [V]	EN	PS
0.5	3.27	Activado	Activado
0.5	3.31	Activado	Desactivado
0.5	0.02	Desactivado	Activado
0.5	0.01	Desactivado	Desactivado
3.0	3.28	Activado	Activado
3.0	3.31	Activado	Desactivado
3.0	0.01	Desactivado	Activado
3.0	0.01	Desactivado	Desactivado

Tabla 4.2: Resultados de pruebas estáticas para validación del módulo TPS61201.

Los resultados obtenidos en la tabla 4.2 permiten determinar la validación del módulo TPS61201.

4.2.4. SPV1040

Para realizar la validación del módulo SPV1040 se alimenta su entrada con una fuente de laboratorio con un voltaje de 2.07V y una corriente máxima de 20mA además se agrega una resistencia de 100ohms en serie para fijar la potencia máxima de entrada en 20.7mW, el cuál es un valor cercano al 60 % de la máxima potencia del panel solar utilizado.

Es importante destacar que está prueba se realiza para verificar si el sistema es capaz de alimentar el supercapacitor a la tensión diseñada en la salida (2.97V), y no representa la curva de potencia del panel solar.

Se observa que la tensión comienza a aumentar hasta llegar a un valor de 800mV y comienza a oscilar entre los valores 793mV y 800mV sin elevar más tensión cuando el su-

percapacitor está encendido. Si se carga externamente el supercapacitor a un valor superior a 800mV por ejemplo 2V el voltaje del supercapacitor comienza lentamente a decaer a una razón cercana a 0.5mV/s.

Para resolver esto se plantea la intervención del circuito mediante un diodo Schottky entre la salida del PMIC SPV1040 y el supercapacitor. Se prueba inicialmente en un protoboard logrando el objetivo de cargar completamente al supercapacitor al valor diseñado (2,97V).

4.3. Retrabajo de la PCB

Se determinó en las pruebas de integridad que la PCB requiere retrabajo para agregar un diodo schottky en la salida del circuito SPV1040, en la figura 4.4 se muestra el diagrama esquemático modificado que incluye el diodo schottky y en la figura 4.5 se muestra el retrabajo a realizar.

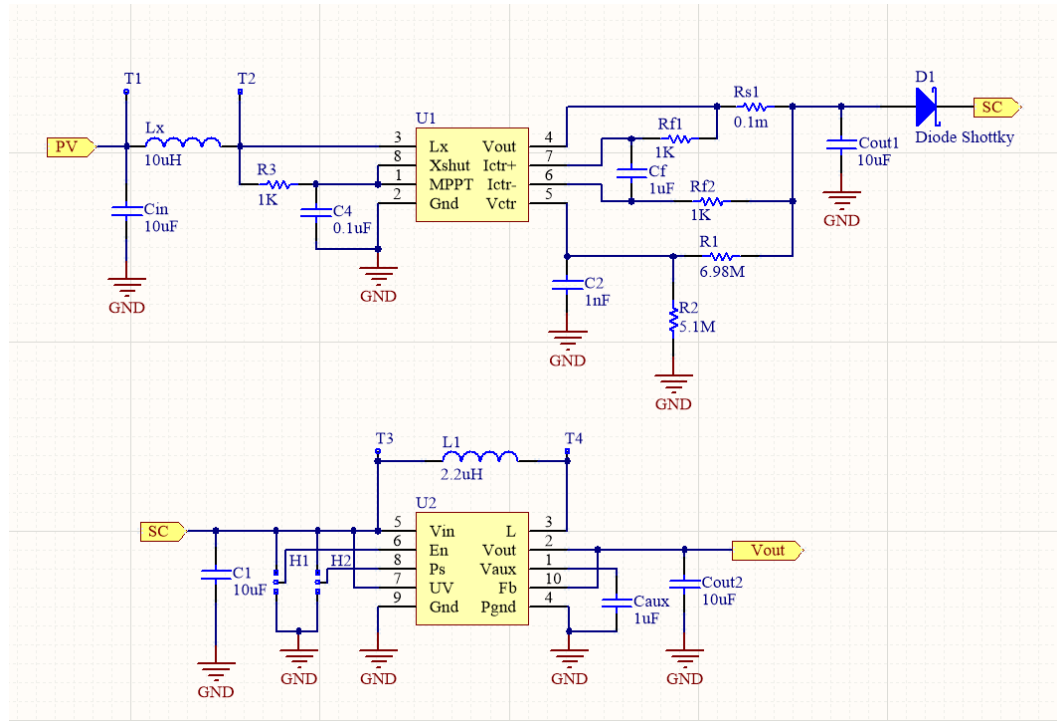


Figura 4.4: Esquemático modificado para retrabajo.

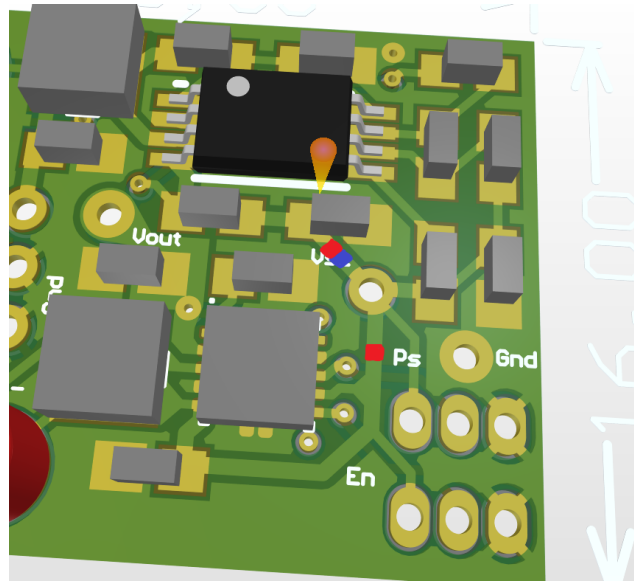


Figura 4.5: Referencia para retrabajo: En azul la zona de remoción de cobre, en rojo la zona de exposición de cobre para soldar el componente.

El diodo schottky utilizado es el 621-B140HW-7, su curva de conducción se muestra en la figura 4.6, cabe mencionar que el diodo no fue diseñado específicamente para la aplicación y fue utilizado dada su facilidad de adquisición.

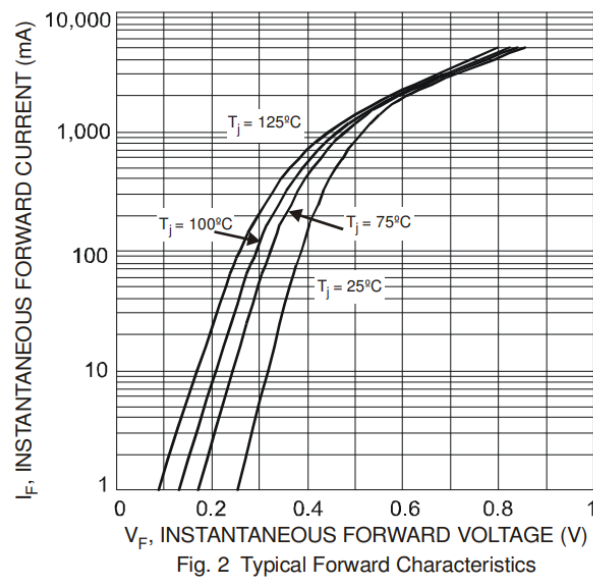


Figura 4.6: Curva de conducción diodo Schottky 621-B140HW-7.

En la figura 4.7 se muestra el resultado del retrabajo realizado, mediante test de continuidad se verifica la integridad eléctrica.

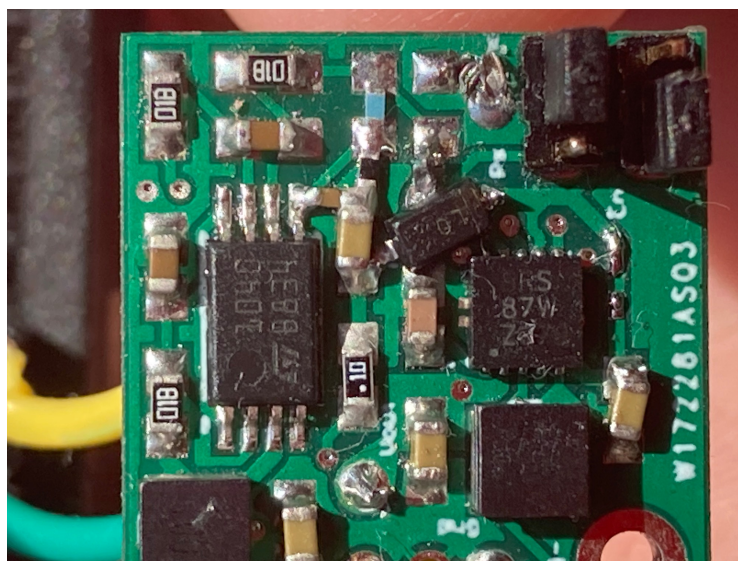


Figura 4.7: Placa con diodo agregado, retrabajo realizado.

PRUEBAS

Para la realización de pruebas se utiliza un microcontrolador ATMEGA328 [19] y se crea un código en lenguaje C que permite la medición de las variables de interés a lo largo de 24 horas. Se pretende obtener alrededor de 5000 muestras en 24 horas, por lo tanto, la frecuencia de medición fijada es de 3 muestras por minuto, dichas muestras son obtenidas del promedio entre 10 muestras que son tomadas cada 2 segundos. Para la generación de la rutina se hace uso del servicio de interrupción del timer 1 incorporado en el microcontrolador, dicho código se encuentra en el apartado de anexos.

La disposición de las componentes para realizar las mediciones se muestra en la Figura 5.1 donde se observa el circuito diseñado conectado al panel solar y al supercapacitor. En la imagen es posible observar gráficamente la proporción de los tamaños del circuito con respecto al supercapacitor o al panel solar.

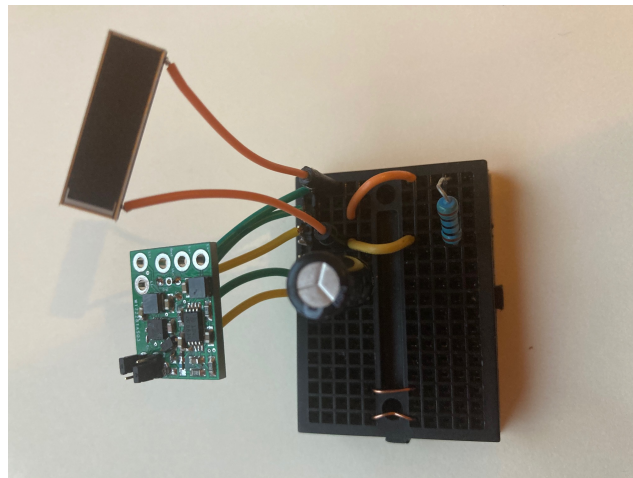


Figura 5.1: Disposición de conexión del circuito con el cual se realizan las pruebas.

5.1. Prueba 1: Carga del sistema

La prueba 4 tiene por finalidad estimar la razón de carga e identificar las fases por las que transita el PMIC SPV1040 durante la carga mediante el panel solar. Los resultados medidos se muestran en la figura 5.2.

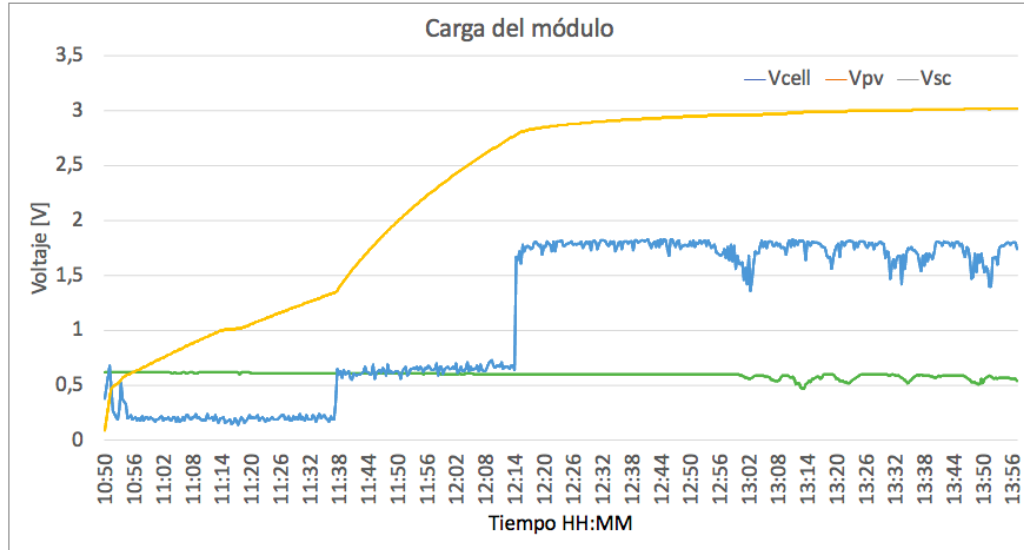


Figura 5.2: Medición de carga del módulo en día soleado

En la figura 5.2 es posible identificar 4 modos de funcionamiento, en las figuras 5.3 5.4 5.5 5.6 es posible observar cada uno de ellos, a continuación se detalla el análisis de cada uno de ellos:

- Modo 1: Cuando el voltaje de salida del boost es inferior a 800mV (Canal 4) el circuito fija una tensión cercana a 330mV en el panel fotovoltaico (Canal 3). A su vez la tensión del supercapacitor aumenta (Canal 2) y se mantiene aproximadamente 240mV por debajo del voltaje de salida del boost (Canal 4).
- Modo 2: Cuando el voltaje de salida del boost es superior a 800mV (Canal 4) el circuito fija una tensión media cercana a 200mV en el panel fotovoltaico (Canal 3). La tensión del supercapacitor sigue en aumento (Canal 2) y mantiene su diferencia con la salida del boost (Canal 4) debido a la presencia del diodo Schottky.
- Modo 3: Cuando la tensión de salida del boost supera los 1,5V (Canal 4) el circuito fija una tensión media cercana a 600mV en el panel fotovoltaico (Canal 3). La tensión del supercapacitor sigue en aumento (Canal 2) y mantiene su diferencia con la salida del boost (Canal 4) debido a la presencia del diodo Schottky.
- Modo 4: Cuando la tensión de salida del boost alcanza el valor programado 2,97V (Canal 4) el circuito fija una tensión media cercana a 1,81V en el panel fotovoltaico (Canal 3). La tensión del supercapacitor aumenta lentamente (Canal 2) y al cabo de

aproximadamente 2 horas supera el valor máximo del mismo registrando una tensión de 3,07V.

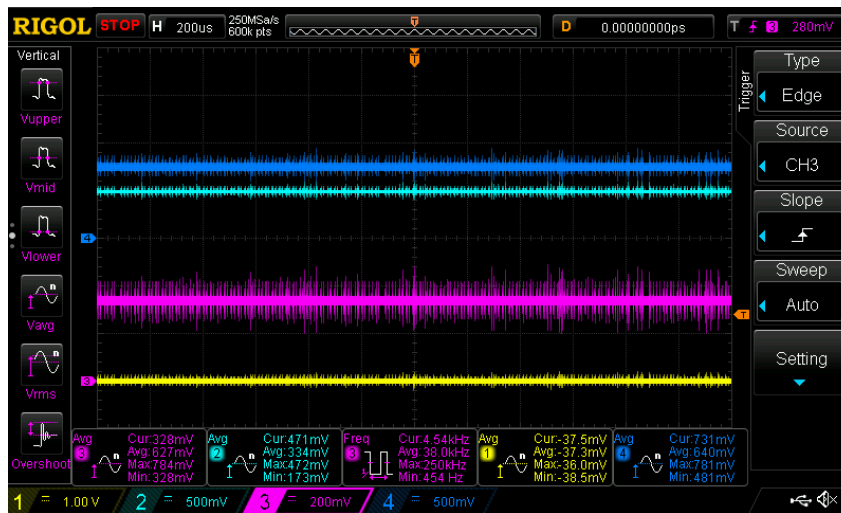


Figura 5.3: Modo 1.

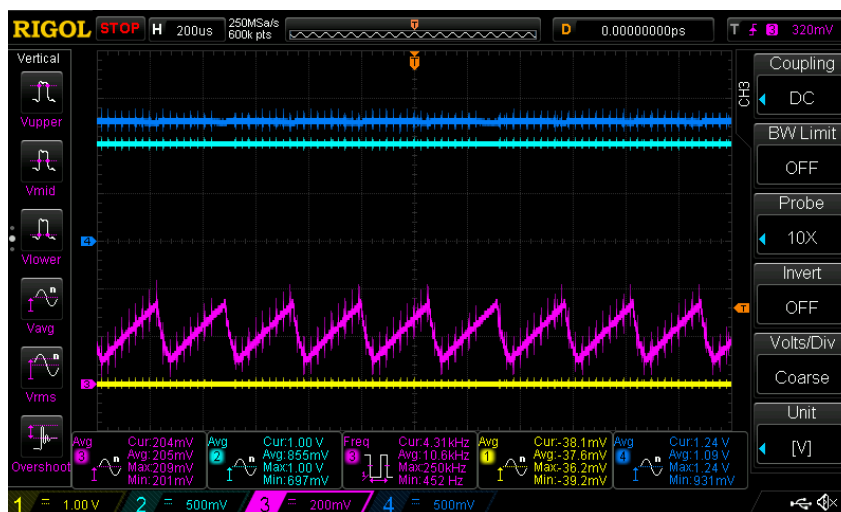


Figura 5.4: Modo 2.

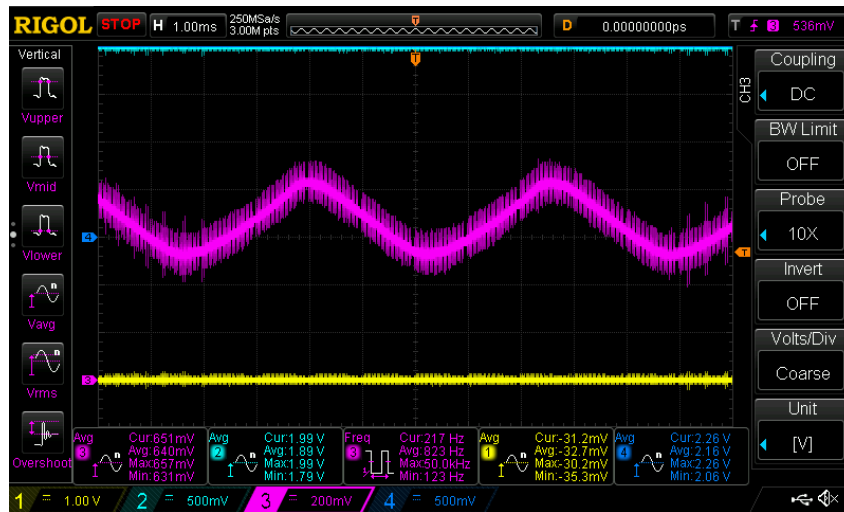


Figura 5.5: Modo 3.

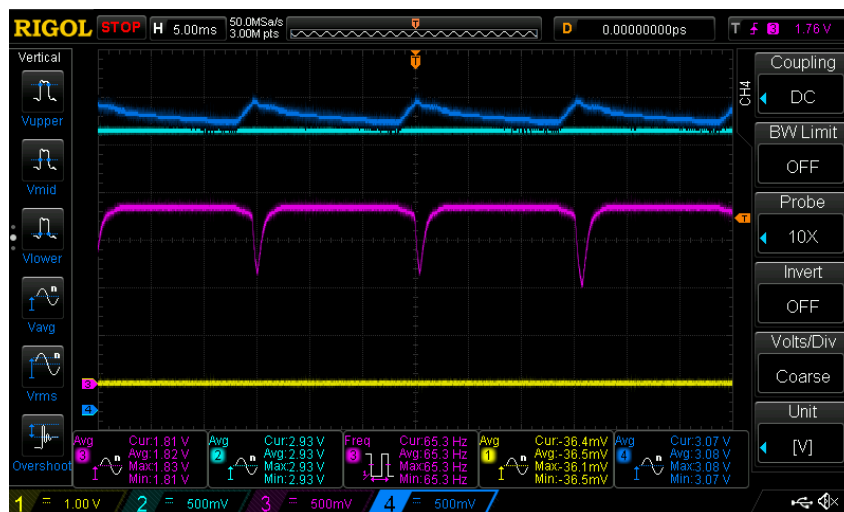


Figura 5.6: Modo 4.

5.2. Prueba 2: Descarga del supercapacitor

La prueba 1 tiene por finalidad mostrar la descarga que sufren 5 supercapacitores en distintos escenarios, todos ellos fueron cargados a 3V con una fuente de laboratorio durante más de 12 horas y se mide su voltaje al transcurrir 24 horas.

Los tres escenarios son los siguientes:

- E0: Circuito abierto una sola medición Entrega información de la fuga de energía propia del supercapacitor.

- E1: Circuito abierto Entrega información de la fuga de energía debido a la medición.
- E2: Conectado al circuito, TPS61201 $EN = 1$ Entrega información de la fuga de energía por estar presente en el circuito

Es importante mencionar que al trabajar con bajo nivel de energía los instrumentos de medición afectan en el rendimiento del sistema, por tanto la medición se realizó al comienzo y al final de las 24 horas, los resultados se muestran en la tabla 5.1.

Escenario	ΔV (24 horas) [mV]
E0	80
E1	172
E2	220

Tabla 5.1: Diferencia de voltaje medida al cabo de 24 horas en los 3 escenarios.

5.3. Prueba 3: Autonomía

Para la realización de la prueba de autonomía se consideraron dos escenarios:
Escenario 1:

- Supercapacitor cargado a 3v durante 12 horas
- Panel solar conectado pero cubierto para evitar potencia entrante al sistema
- Carga resistiva en la salida de valor 32,8kOhm
- Corriente de salida estimada 100uA

Escenario 2:

- Supercapacitor cargado a 3v durante 12 horas.
- Panel solar conectado pero cubierto para evitar potencia entrante al sistema.
- Carga resistiva en la salida de valor 3,21kOhm
- Corriente de salida estimada 1mA

Los resultados de ambos escenarios se encuentran en la figura 5.7 y entregan como resultado que la autonomía alcanzada por el sistema entregando 100uA de corriente es de 5,5 horas, en cambio cuando entrega 1mA se reduce a 49 minutos. Además se observa en la gráfica la autonomía alcanzada con el circuito boost deshabilitado de apenas 40mV en un tiempo de 5 horas.

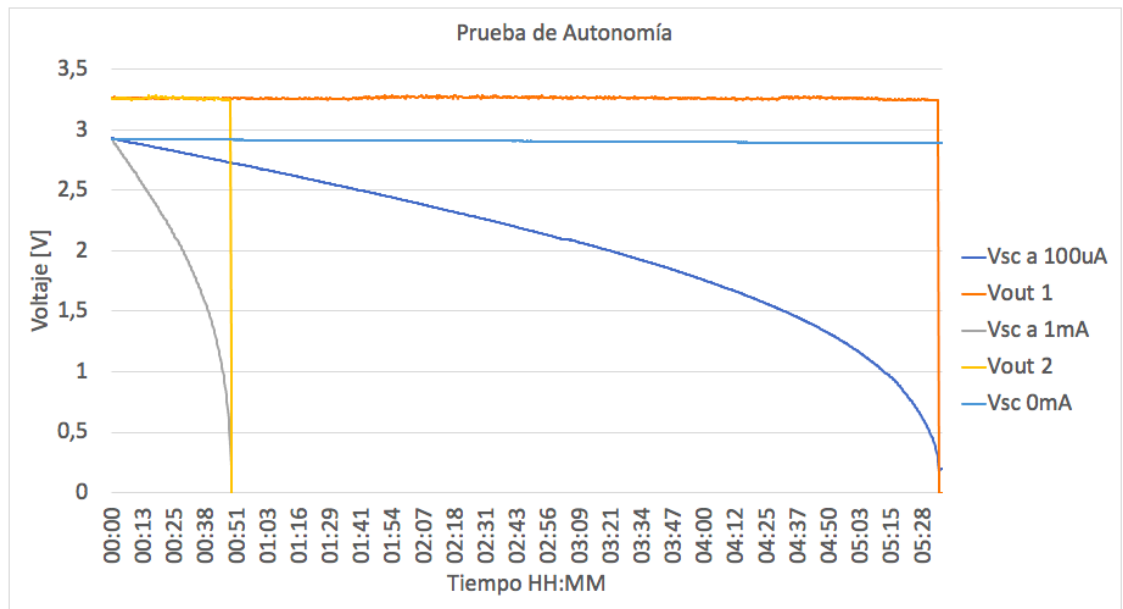


Figura 5.7: Gráfica de autonomía del módulo.

CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

Para lograr la máxima autonomía es necesario la utilización de la función enable/disable del convertidor TPS61201, esto implica que un circuito externo como un microcontrolador se alimente directamente del voltaje del supercapacitor y sea capaz de gobernar el funcionamiento del convertidor boost. Actualmente existen muchas alternativas de microcontroladores de ultra bajo consumo y gran rango de polarización que permitirían lograr este objetivo.

Si el supercapacitor está completamente descargado el sistema logra cargarlo completamente en un lapso de 1 hora aproximadamente en un día despejado.

La condición de carga ocurre cuando el voltaje de circuito abierto del panel solar alcanza los 0.3V, sin embargo, para este panel solar la carga del supercapacitor ocurre solo cuando la cantidad de radiación sobre el panel solar genera una tensión de circuito abierto superior a 1.5V, esto implica que en un rediseño del circuito se debería mover la referencia de encendido XSHUT a 1.5V.

El sistema diseñado es plenamente escalable tanto en su etapa de recolección, como en el almacenamiento. Si se quiere aumentar la cantidad de recolección basta con escoger un panel solar de mayor tamaño y/o eficiencia cuya tensión de circuito abierto no supere la tensión nominal de carga del supercapacitor. En caso de querer mejorar la autonomía existe la opción de aumentar el almacenamiento instalando mayor cantidad de supercapacitores en paralelo.

6.2. Trabajo Futuro

Para caracterizar de mejor manera el módulo de cosecha de energía es necesario utilizar un simulador de arreglos solares de baja potencia. Para estos fines es necesario obtener la curva de corriente versus voltaje del panel que se desea simular y luego implementar dicha función de transferencia mediante el uso de componentes de electrónica analógica.

Para observar la autonomía del sistema es necesario disponer de una carga programable que permita implementar escalones de carga y medir la potencia extraída del sistema.

Con la finalidad de obtener una mayor eficiencia en estado de espera, se sugiere implementar un microcontrolador que permita deshabilitar y poner en modo bajo consumo ambos PMICs para reservar la mayor cantidad de energía del supercapacitor.

Se debe agregar al diseño un diodo schottky con bajo voltaje de conducción para lograr la operación normal del módulo.

Para estudiar el escalamiento del sistema se deben realizar pruebas con una mayor cantidad de paneles solares y/o de supercapacitores para observar el funcionamiento del módulo.

Es importante mantener actualizada la base datos de los PMICs que se lanzan al mercado, al finalizar ésta memoria entró a la competencia la empresa ePeas con un PMIC especializado para energy harvesting solar en el orden de los microwatts, almacenamiento en supercapacitores y reguladores de voltaje incorporados [20].

Considerando el crecimiento del mercado es necesario monitorear continuamente los supercapacitores disponibles, sobretodo los que permiten alcanzar mayores densidades energéticas y bajas corrientes de fuga, en la actualidad la empresa Tecate está desarrollando una línea de capacitores híbridos [21] que consiguen una mayor densidad energética que los EDLC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] The global Market for Internet, online https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_cityhttps://www.statista.com/statistics/976313/global-iot-market-size/#:~:text=The%20global%20market%20for%20Internet,around%201.6%20trillion%20by%202025.
- [2] Solar cells, Chemistry explained, <http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html>
- [3] How does a Supercapacitor Work?, Battery University [https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor#\protect\protect\leavevmode@ifvmode\kern+.2222em\relax~:text=The%20supercapacitor%2C%20also%20known%20as,opposed%20to%20an%20electrochemical%20reaction.&text=The%20size%20ranges%20from%20a,to%20low%20microfarad%20\(%CE%BCF\).](https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor#\protect\protect\leavevmode@ifvmode\kern+.2222em\relax~:text=The%20supercapacitor%2C%20also%20known%20as,opposed%20to%20an%20electrochemical%20reaction.&text=The%20size%20ranges%20from%20a,to%20low%20microfarad%20(%CE%BCF).)
- [4] Marin S. Halper & James C. Ellenbogen, Supercapacitors: A Brief Overview, Mitre Mclean Virginia, March 2016,https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf
- [5] Jiří Libich, Josef Máca, Jiří Vondrák, Ondřej Šech, Marie Sedlářková, Supercapacitors: Properties and applications, Journal of Energy Storage, Volume 17, 2018, Pages 224-227, ISSN 2352-152X.
- [6] Mandapati, Jayalakshmi & Balasubramanian, K. (2008). Simple Capacitors to SupercapacitorsAn Overview. Int. J. Electrochem. Sci. 3. 1196-1217.
- [7] Kigozi M, Kali R, Bello A, Padya B, Kalu-Uka GM, Wasswa J, Jain PK, Onwualu PA, Dzade NY. Modified Activation Process for Supercapacitor Electrode Materials from African Maize Cob. Materials (Basel), 2020.
- [8] Berrueta, A., Ursua, A., Martin, I. S., Eftekhari, A., & Sanchis, P. (2019). Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends. IEEE Access, 7, 50869-50896.

- [9] Ahmed, A. S., Abdullah, B. A., & Abdelaal, W. G. A. (2016). MPPT algorithms: Performance and evaluation. 2016 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES).
- [10] Manel Hlaili, Hfaiedh Mechergui, Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems, International Journal of Photoenergy, vol. 2016, Article ID 1728398, 10 pages, 2016.
- [11] Mejía, Diego Armando; Torres Chávez, Ivaldo; Díaz, Jorge Luis, Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos, El Hombre y la Máquina, núm. 45, julio-diciembre, 2014, pp. 44-55 Universidad Autónoma de Occidente Cali, Colombia.
- [12] Aguirre, G. Y., Marteniuk, J. A., & Botteron, F. (2014). Implementación de estrategias de MPPT para sistemas de generación fotovoltaicos en un convertidor boost CC-CC. 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON).
- [13] IXOLARTM High Efficiency SolarBIT, KXOB25-05X3F Datasheet, https://ixapps.ixys.com/DataSheet/KXOB25_05X3F.pdf
- [14] Application Note para diseño de componentes PMIC SPV1040
- [15] Hoja de Datos PMIC SPV1040, ST, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1040.pdf>
- [16] Hoja de Datos PMIC TPS61201, Texas Instrument, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61201.pdf?ts=1619755425203>
- [17] Application Note para diseño PMIC SPV1040, https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00292052-stevalisv006v2-solar-battery-charger-using-the-spv1040-stmicroelectronics.pdf
- [18] Five Steps to a Good PCB Layout of a Boost Converter, User Guide, May 2016, Texas Instrument, <https://www.ti.com/lit/an/slva773/slva773.pdf?ts=1619759189885>
- [19] Guía de programación de ISR <https://www.instructables.com/Arduino-Timer-Interrupts/>
- [20] PMIC Energy Harvesting Solar, EPEAS, <https://e-peas.com/product/aem10941/>
- [21] Supercapacitor híbrido, Tecate, <https://www.tecategroup.com/products/hybrid/cells.php>

ANEXOS

Codigo implementado en arduino para la automatización mediciones

```
1  uint16_t buffer[10] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
2  int i = 1;
3  unsigned long ti = millis(); //Tiempo inicial
4  unsigned long t1 = millis();
5  unsigned long t2 = millis();
6  float Vpv = 0.0;
7  float Vsc = 0.0;
8  float V2 = 0.0;
9  float V3 = 0.0;
10 float V4 = 0.0;
11 float V5 = 0.0;
12 float Vpv_buff = 0.0;
13 float Vsc_buff = 0.0;
14 float V2_buff = 0.0;
15 float V3_buff = 0.0;
16 float V4_buff = 0.0;
17 float V5_buff = 0.0;
18
19 void setup() {
20     // initialize serial communication at 9600 bits per second:
21     cli(); //stop interrupts
22     TCCR1A = 0; // set entire TCCR1A register to 0
23     TCCR1B = 0; // same for TCCR1B
24     TCNT1 = 0; // initialize counter value to 0
25     // set compare match register for 1hz increments
26     OCR1A = 31249; // = (16*10^6) / (1*1024) - 1 (must be <65536)
27     // turn on CTC mode
28     TCCR1B |= (1 << WGM12);
29     // Set CS10 and CS12 bits for 1024 prescaler
30     TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);
31     // enable timer compare interrupt
32     TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
33     sei(); //allow interrupts
34
35     Serial.begin(9600);
36     pinMode(2, INPUT);
37     pinMode(13, OUTPUT);
38 }
39
40 // the loop routine runs over and over again forever:
41 void loop() {
42
```

```
43 }
44
45 ISR(TIMER1_COMPA_vect){//timer1 interrupt 0.5Hz
46   Vpv = analogRead(A0);
47   Vsc = analogRead(A1);
48   V2 = analogRead(A2);
49   V3 = analogRead(A3);
50   V4 = analogRead(A4);
51   V5 = analogRead(A5);
52   Vpv_buff += Vpv;
53   Vsc_buff += Vsc;
54   V2_buff += V2;
55   V3_buff += V3;
56   V4_buff += V4;
57   V5_buff += V5;
58
59   if (i == 10){
60     Serial.print(Vpv_buff*5.0/10240.0);
61     Serial.print(" ");
62     Serial.print(Vsc_buff*5.0/10240.0);
63     Serial.print(" ");
64     Serial.print(V2_buff*5.0/10240.0);
65     Serial.print(" ");
66     Serial.print(V3_buff*5.0/10240.0);
67     Serial.print(" ");
68     Serial.print(V4_buff*5.0/10240.0);
69     Serial.print(" ");
70     Serial.print(V5_buff*5.0/10240.0);
71     Serial.print(" ");
72     Serial.println(digitalRead(2));
73     Vpv_buff = 0.0;
74     Vsc_buff = 0.0;
75     V2_buff = 0.0;
76     V3_buff = 0.0;
77     V4_buff = 0.0;
78     V5_buff = 0.0;
79     i = 1;
80   }
81   else {
82     i++;
83   }
84 }
```

memoria.ino