

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE UN  
SISTEMA FOTOVOLTAICO PORTÁTIL PARA EL  
SUMINISTRO DE ENERGIA A PERSONAL MILITAR EN  
ZONAS AISLADAS

JHOAN MATEO CASTAÑEDA ARIZA  
IVAN RENE BAUTISTA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIRÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2021

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE UN  
SISTEMA FOTOVOLTAICO PORTÁTIL PARA EL  
SUMINISTRO DE ENERGIA A PERSONAL MILITAR EN  
ZONAS AISLADAS

JHOAN MATEO CASTAÑEDA ARIZA  
IVAN RENE BAUTISTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingenieros en energía

Director: Ph.D. Yecid Alfonso Muñoz Maldonado

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIRÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2021

## **Nota de aceptación**

Proyecto de grado aprobado por el comité curricular de la facultad del programa de ingeniería en energía en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

---

**Ph.D. Yecid Alfonso Muñoz  
Maldonado**

---

**Evaluador 1**

---

**Evaluador 2**

Bucaramanga Diciembre 2021

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	12
2. MARCO DE REFERENCIA.....	13
2.1 ESTADO DEL ARTE .....	13
2.1.1 Equipos fotovoltaicos para fuerzas armadas .....	13
2.1.2 Sistemas de baterías portables.....	15
2.2 MARCO CONCEPTUAL .....	16
2.2.1 Tecnologías de celdas fotovoltaicas .....	16
2.2.2 Baterías de ion-litio .....	18
2.2.3 Reguladores de voltaje .....	22
2.2.4 Proceso de análisis jerárquico AHP.....	25
3. OBJETIVOS .....	27
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	27
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
4. METODOLOGÍA .....	28
4.1 FASE 1: DETERMINACION DE LA SOLUCION REQUERIDA.....	28
4.2 FASE 2: PLANEACION DEL PROTOTIPO .....	28
4.3 FASE 3: EJECUCION DEL PROTOTIPO .....	29
4.4 FASE 4: RESULTADOS Y COSTOS .....	29
4.5 FASE 5: REALIZACION DEL ANALISIS Y PROPUESTAS DE MEJORA	29
5. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	30
5.1 CONSULTA AL PERSONAL DEL EJÉRCITO .....	30
5.2 PLANEACIÓN .....	31
5.2.1 Características del sistema de suministro requerido .....	31
5.2.2 Determinación de la demanda a suplir .....	32
5.3 DETERMINACION DEL TIPO DE SISTEMA MEDIANTE EL MÉTODO AHP	33

5.4	DESARROLLO DEL PROTOTIPO.....	37
5.4.1	Selección de componentes.....	37
5.4.2	Diseño del prototipo.....	40
5.4.3	Ensamblaje de componentes .....	45
5.5	PRUEBAS Y RESULTADOS .....	49
5.5.1	Pruebas de carga de dispositivos.....	49
5.5.2	Características de carga del sistema.....	55
5.5.3	Pruebas de carga continua.....	62
5.5.4	Análisis de costos.....	65
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES .....	68
	BIBLIOGRAFÍA .....	69
	ANEXOS .....	71
	Anexo 1: Planos del sistema en SolidWorks.....	71

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Consumo de energía a nivel mundial .....	10
<b>Figura 2.</b> Mapa de la irradiación solar en Colombia .....	11
<b>Figura 3.</b> Refugios energéticamente eficientes.....	13
<b>Figura 4.</b> Paneles fotovoltaicos MC-10 en casco y mochila .....	14
<b>Figura 5.</b> Fuente fotovoltaica portátil .....	15
<b>Figura 6:</b> Tecnologías de celdas solares.....	16
<b>Figura 7.</b> Comparación de diferentes tipos de baterías .....	18
<b>Figura 8:</b> Comportamiento de carga baterías de ion de litio.....	21
<b>Figura 9:</b> Diagrama de una fuente regulada.....	23
<b>Figura 10:</b> Conmutación por modulación de anchura de pulsos.....	24
<b>Figura 11.</b> Metodología para el desarrollo del proyecto.....	28
<b>Figura 12:</b> Diagrama de bloques del prototipo.....	32
<b>Figura 13:</b> Esquema de comparación de criterios .....	33
<b>Figura 14:</b> Diseño SolidWorks del sistema.....	41
<b>Figura 15:</b> Disposición final de los elementos .....	42
<b>Figura 16:</b> Diseño Power bank en SolidWorks .....	43
<b>Figura 17:</b> Diseño estructura del LM2596 .....	43
<b>Figura 18:</b> Conexiones del sistema .....	44
<b>Figura 19:</b> Diseño indicador del nivel de batería .....	45
<b>Figura 20:</b> a) Soldadura fría b) Paneles pegados a la tela .....	46
<b>Figura 21:</b> Panel solar terminado .....	46
<b>Figura 22:</b> Power bank imagen interna y externa .....	47
<b>Figura 23:</b> Sistema de acople del panel a la mochila .....	47
<b>Figura 24:</b> Prototipo terminado .....	48
<b>Figura 25:</b> Pruebas de carga de celular .....	49
<b>Figura 26:</b> Puntos de toma de datos .....	50
<b>Figura 27:</b> Cargador USB para baterías AA.....	52
<b>Figura 28:</b> Prueba de carga batería de radio.....	53
<b>Figura 29:</b> Puntos de toma de datos .....	53
<b>Figura 30:</b> Prueba de carga computador.....	54
<b>Figura 31:</b> Toma de pruebas del sistema .....	56
<b>Figura 32:</b> Comportamiento del sistema sin sombra .....	58
<b>Figura 33:</b> Paneles parcialmente sombreados .....	59
<b>Figura 34:</b> Comportamiento del sistema sombra parcial .....	60
<b>Figura 35:</b> Sendero recorrido en la prueba.....	64
<b>Figura 36:</b> Sendero recorrido para la prueba.....	64

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Escala Saaty.....	26
<b>Tabla 2:</b> Características de los dispositivos.....	31
<b>Tabla 3:</b> Elementos usados en las operaciones.....	32
<b>Tabla 4:</b> vector de prioridades.....	34
<b>Tabla 5:</b> Comparación de tecnologías.....	35
<b>Tabla 6:</b> Especificaciones batería 18650 Moviltronics.....	37
<b>Tabla 7</b> Especificaciones módulo BMS.....	38
<b>Tabla 8:</b> Comparación de celdas solares.....	39
<b>Tabla 9:</b> Especificaciones celda solar Hi-tronix.....	39
<b>Tabla 10:</b> Especificaciones LM2596.....	40
<b>Tabla 11:</b> Medición de corriente instantáneas.....	50
<b>Tabla 12:</b> Comportamiento con carga de celulares.....	51
<b>Tabla 13:</b> Comportamiento con carga de baterías.....	54
<b>Tabla 14:</b> Comportamiento con carga de computador.....	55
<b>Tabla 15:</b> Cálculo del factor de corrección:.....	56
<b>Tabla 16:</b> Características del sistema de generación:.....	57
<b>Tabla 17:</b> Resultados pruebas sin sombra.....	58
<b>Tabla 18:</b> Resultados pruebas sombra de arbustos.....	59
<b>Tabla 19:</b> Resultados pruebas sombra de árbol.....	60
<b>Tabla 20:</b> Resultados pruebas con mochila.....	61
<b>Tabla 21:</b> Carga de baterías con fuente de poder.....	62
<b>Tabla 22:</b> Resultado prueba de carga.....	63
<b>Tabla 23:</b> Resultados prueba en campo.....	65
<b>Tabla 24:</b> Costos de los elementos del prototipo.....	66

## RESUMEN

En este proyecto se desarrolló el prototipo de un sistema de generación y almacenamiento de energía para suplir la demanda que presenta el personal militar cuando se encuentra en operaciones en zonas aisladas, para esto se realizó una investigación con personal militar con el fin de conocer las características de los dispositivos que se utilizan (radios punto a punto, celulares, GPS y computador portátil) y sus características de carga, de igual manera se indago acerca de las condiciones atmosféricas y topográficas en donde suelen llevar a cabo este tipo de operaciones y las condiciones de trabajo que presentan, esto con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible para posteriormente realizar la selección de los elementos más adecuados a utilizar en el sistema.

Se llevó a cabo el dimensionamiento de los elementos seleccionados con el fin de realizar su compra y llevar a cabo los diseños necesarios para realizar la construcción del prototipo el cual consta de un módulo de paneles solares conectados en una disposición que permita su acople a las mochilas de campaña, la energía generada por los paneles se almacena en un banco de baterías 18650 de ion de litio por medio de un sistema de gestión de baterías, para posteriormente ser utilizada para cargar los diferentes dispositivos electrónicos que se requieren en dichas operaciones, al finalizar la construcción se procedió a realizar las diferentes pruebas del prototipo.

Para esto se eligió un escenario base en donde se desplegó el sistema en un ángulo favorable de incidencia solar y otro escenario real en donde el sistema se acopla a una mochila y se expone a un entorno similar al que se ven enfrentado el personal del ejército en zonas aisladas. También se realizaron pruebas para determinar la velocidad con la que el prototipo logra cargar los diferentes dispositivos mencionados.

Finalmente en base a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas se proponen una serie de recomendaciones para aumentar el rendimiento del sistema de cara a una futura implementación, también se realizó el análisis de costos para determinar el costo final del prototipo.



## **ABSTRACT**

In this project a prototype of a power generation and storage system was developed to supply the demand presented by military personnel when they are in operations in isolated areas, for this a research was conducted with military personnel in order to know the characteristics of the devices used (point to point radios, cell phones, GPS and laptop computer) and their load characteristics, in the same way it was inquired about the atmospheric and topographic conditions where they usually carry out this type of operations and the working conditions they present, this in order to know the characteristics of the devices used, GPS and laptop computer) and their load characteristics, as well as the atmospheric and topographic conditions where they usually carry out this type of operations and the working conditions they present, in order to obtain as much information as possible to subsequently make the selection of the most appropriate elements to use in the system.

The sizing of the selected elements was carried out in order to make the purchase and carry out the necessary designs for the construction of the prototype which consists of a module of solar panels connected in an arrangement that allows its attachment to the campaign backpacks, the energy generated by the panels is stored in a bank of 18650 lithium ion batteries by means of a battery management system, to later be used to charge the different electronic devices required in such operations, at the end of the construction, the different tests of the prototype were carried out.

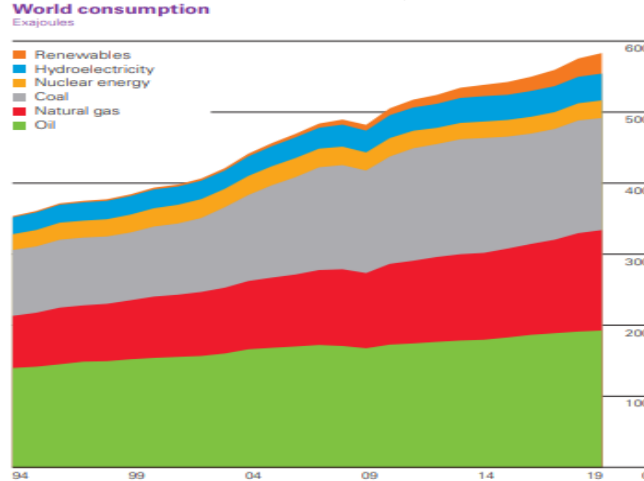
For this, a base scenario was chosen where the system was deployed in a favorable angle of solar incidence and another real scenario where the system is coupled to a backpack and exposed to an environment similar to that faced by army personnel in isolated areas. Tests were also carried out to determine the speed with which the prototype can charge the different devices mentioned above.

Finally, based on the results obtained in the different tests, a series of recommendations are proposed to increase the performance of the system with a view to a future implementation.

## INTRODUCCIÓN

La demanda energética en el mundo está en constante crecimiento y a pesar de que los combustibles fósiles aun dominan la matriz energética a nivel mundial, las energías renovables cada vez tienen una mayor participación. El consumo de energía renovable siguió creciendo con fuerza contribuyendo a su mayor incremento en términos energéticos (3,2 EJ). Esto representó más del 40% del crecimiento mundial de la energía primaria el año pasado, que es más grande que cualquier otro combustible. Como resultado, las energías renovables aumentaron su participación en el mix energético del 4,5% en 2018 al 5%. Por fuente de energía, la generación eólica aportó la mayor contribución al crecimiento (1,4 EJ) seguido de cerca por la energía solar (1,2 EJ) [1], Estos datos se pueden apreciar en la Figura 1.

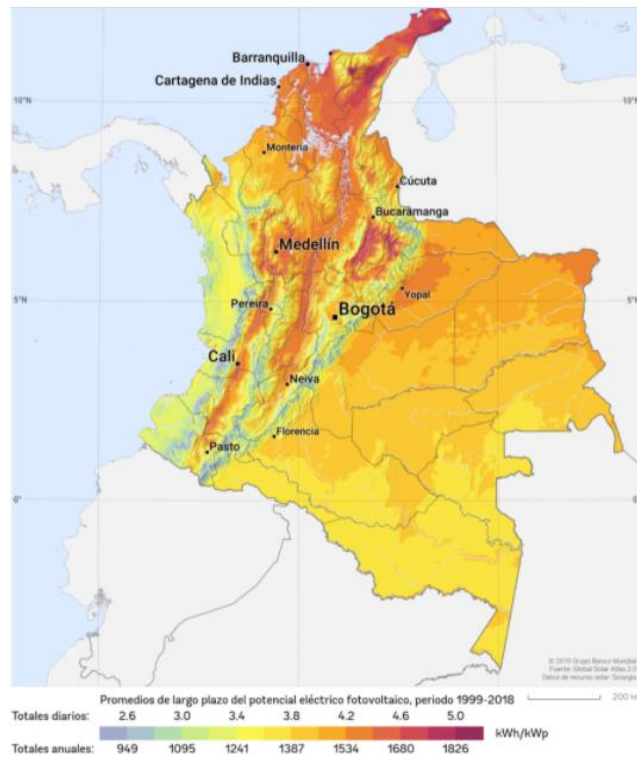
**Figura 1.** Consumo de energía a nivel mundial



Fuente: Review of World Energy [1].

Colombia no es la excepción, en la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) se encuentran registrados más de 7.260 MW de capacidad instalada en proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), una de las alternativas es la generación de energía solar fotovoltaica que para el caso de Colombia según las fuentes disponibles de información de recurso solar indican que cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> /d [2].

**Figura 2.** Mapa de la irradiación solar en Colombia



Fuente: Global solar atlas [3]

Colombia posee una ubicación privilegiada al estar sobre la línea del ecuador como se aprecia en la (figura2) y además de esto poseer un gran potencial de energía solar, por este motivo se plantea que la realización de un prototipo de generación portátil es una alternativa para suplir la demanda energética de los militares que se encuentren en operaciones en zonas aisladas.

Para empezar con el desarrollo del proyecto se realizó la identificación del problema que nos arrojó que el personal militar no cuenta con una fuente confiable de suministro de energía cuando llevan a cabo diferentes labores en operaciones en zonas aisladas del país, posteriormente se justificó la necesidad de dar solución a este problema mediante nuestra propuesta de prototipo, seguido a esto se buscó información de proyectos anteriores relacionados con el sistema que pudieran ser utilizados como material de referencia, para luego realizar el marco teórico con los diferentes aspectos técnicos de interés sobre tecnologías de generación fotovoltaica, sistemas de almacenamiento, sistemas de carga, etc. que se deben tener claros para continuar con un adecuado desarrollo del proyecto, teniendo claro esto se plantea el objetivo general y con base en el cumplimiento de este los objetivos específicos, por último se traza una metodología con el fin de direccionar los pasos a seguir para llevar a cabo el desarrollo final del sistema.

# **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA**

Los miembros del ejército nacional de Colombia realizan continuamente diferentes tipos de operaciones en zonas aisladas de todo el país, en estas operaciones deben movilizarse a pie por zonas de difícil acceso lo que dificulta el transporte y el abastecimiento energético para alimentar los diferentes dispositivos electrónicos que son fundamentales para llevar a cabo las operaciones y mantener la comunicación con los distintos grupos.

Actualmente los miembros del ejército colombiano suplen sus necesidades energéticas por medio del aprovisionamiento periódico de baterías que normalmente terminan descargándose antes del próximo abastecimiento, algunos soldados cuentan con paneles solares personales, los cuales son usados únicamente para la carga de celulares y no responden a una solución adecuada ya que estos sistemas no están diseñados para la carga de las baterías de los radios de comunicación o computadores portátiles, elementos que son utilizados en estas operaciones.

Por otro lado los miembros de las fuerzas armadas al realizar estas operaciones llevan un equipamiento de alrededor de 25kg de peso lo que supone un inconveniente a la hora de llevar equipos de carga.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La finalidad de este proyecto es buscar la innovación en el campo de las energías renovables por medio de la construcción de un prototipo de un sistema fotovoltaico enfocado a las necesidades específicas de las unidades del ejército nacional que realizan operaciones en zonas aisladas.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

Se realizó una investigación de estudios previos que pudieran tener algún aporte al presente trabajo, las investigaciones que se muestran a continuación se clasifican por áreas de interés:

#### 2.1.1 Equipos fotovoltaicos para fuerzas armadas

En la revista “Army technology” de RDCOM (Research, Development and Engineering Command) de Estados Unidos [4] 2014, se muestran las pruebas en un tipo de tiendas que pueden ser utilizadas como puesto de mando en operaciones o como zonas de descanso para los soldados que se encuentren desplegados, Con este sistema se espera obtener una reducción de energía de un 50%, consiguiendo una reducción de unos 40 kWh de energía en un despliegue de 150 personas. Este tipo de tiendas tienen unas dimensiones de 6,1 metros de ancho 9,75 por metros de largo, y se pueden adaptar a diferentes ambientes.

**Figura 3.** Refugios energéticamente eficientes



Fuente: Army technology [4]

También se muestran los paneles MC-10, son construidos con finos cristales de arseniuro de galio, estos proporcionan gran flexibilidad y permiten que se puedan adaptar a superficies irregulares como el contorno de las mochilas de equipamiento

de los soldados o los cascos de protección (Figura 4), además pueden alimentar los equipos electrónicos mientras están en movimiento. Bajo unas buenas condiciones de intensa luz solar, esta tecnología ubicada en una mochila podría ser capaz de entregar hasta 10 W de potencia, mientras que si se ubica esta tecnología en un casco de combate de un soldado, podría llegar a generar hasta 7 W de energía eléctrica.

**Figura 4.** Paneles fotovoltaicos MC-10 en casco y mochila



Fuente: Army technology [4]

En el artículo “*Rediseño, optimización y producción de fuente fotovoltaica portátil (fase II)*”, publicado en la revista Logos ciencia y tecnología [5] 2010, presenta los resultados de la investigación desarrollada por la Policía Nacional de Colombia en el rediseño de un sistema fotovoltaico portátil para operativos en área rural (Figura 5), el diseño incluye un regulador de carga, un conjunto de baterías de ion litio y un inversor, además que se utilizan varios paneles solares plegables.

**Figura 5.** Fuente fotovoltaica portátil



Fuente: Logos ciencia y tecnología [5]

### **2.1.2 Sistemas de baterías portables**

En el proyecto de grado “diseño y construcción de un prototipo de batería recargable para una bicicleta eléctrica tipo trike mediante el uso de baterías recicladas de ion de litio 18650” realizado por la universidad politécnica salesiana de cuenca [10] nos muestra características de las baterías de ion de litio 18650, tipos de conexiones y los test que se deben realizar para verificar que dicha batería esté en buenas condiciones.

En el proyecto de grado “*estudio energético de cargadores solares para teléfonos móviles*” realizado por la universidad Carlos III de Madrid [6] 2017, nos muestra un estudio detallado sobre los cargadores solares de dispositivos electrónicos de bajo consumo como lo son (celulares, Tablet, altavoces portátiles, etc.) que se encuentran en el mercado.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

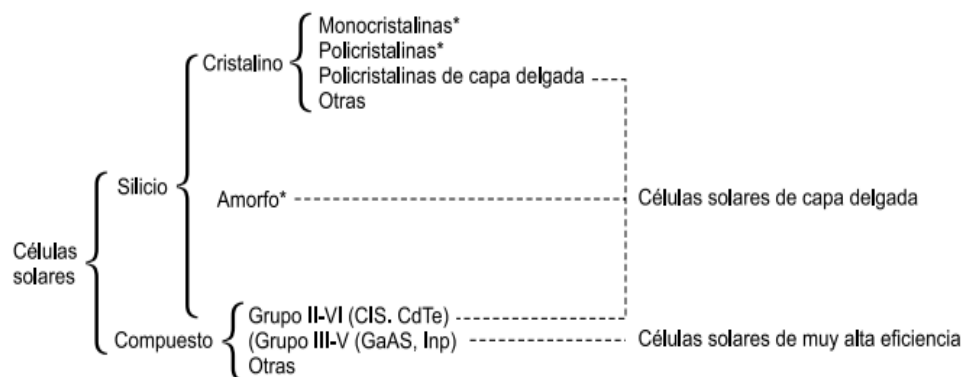
### 2.2.1 Tecnologías de celdas fotovoltaicas

La materia base de las celdas solares son los materiales semiconductores también utilizados en otros dispositivos como diodos, transistores y circuitos integrados. Actualmente existe una amplia gama de celdas que utilizan diferentes materiales y estructuras que influyen directamente en las características de los paneles solares.

Las celdas fotovoltaicas están generalmente fabricadas con materiales semiconductores de silicio. El silicio es el segundo compuesto más abundante en la corteza terrestre, y tiene muy buenas propiedades a la hora de absorber fotones y emitir electrones.

Además del silicio se encuentran en el mercado otros materiales para celdas fotovoltaicas con diferentes características, a continuación se realiza una descripción de algunas de las tecnologías:

**Figura 6:** Tecnologías de celdas solares



Fuente: Centrales de energías renovables [7]

#### 2.2.1.1 CELDAS DE SILICIO

- **Monocristalino:** La mayoría de las células actualmente en el mercado son monocristalinas, en el proceso de fabricación el silicio se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes. Los lingotes son cortados en finas obleas para hacer células individuales.



- Policristalino: Las células policristalinas se fabrican de forma similar a las monocristalinas, la principal diferencia es que se utiliza un silicio de bajo costo. La superficie de las células policristalinas tiene un patrón aleatorio de cristalización en lugar del color homogéneo.

#### 2.2.1.2 CELDAS DE PELICULA DELGADA (THIN FILM)

- Silicio amorfo: El espesor de silicio amorfo puede ser menor de 1  $\mu\text{m}$ . Generalmente la célula amorfa consiste en una capa transparente de TCO (óxido conductor transparente) en la parte frontal y una capa metálica como contacto y reflector trasero, El silicio amorfo sufre una degradación debido a la luz al inicio de su operación.
- Dióxido de titanio: Capas impregnadas de dióxido de titanio se utilizan para generar voltaje en lugar del material semiconductor que se utiliza en la mayoría de las células fotovoltaicas. Debido a que el titanio resulta relativamente barato, ofrecen un gran potencial de reducción de costos.
- Arseniuro de Galio: El (GaAs) es una tecnología de película delgada muy costosa, pero tiene la eficiencia más alta registrada para todas las células solares de unión simple 28.9%. El GaAs se utiliza principalmente en satélites y está destinado a instalaciones versátiles a escala masiva para la recolección de energía en entornos inusuales [7].

#### 2.2.1.3 CELDAS DE MULTIPLE UNION






- Células bifaciales de fósforo-boro: Pueden integrarse en módulos bifaciales que aprovechan la luz reflejada en su cara posterior, aumentando de esa forma la conversión de energía.
- Tecnología de triple unión: En la tecnología triple unión cada célula se compone de tres capas semiconductoras montadas una sobre otra. La célula inferior absorbe la luz roja, la central lo hace con la luz verde/amarilla y la célula superior absorbe la luz azul esta capacidad de absorber una gran parte del espectro solar es la clave de su gran eficiencia, especialmente a bajos niveles de irradiación o en condiciones de luz difusa.

## 2.2.2 Baterías de ion-litio

En la actualidad, existen varias composiciones químicas que pueden tener las baterías, entre las más comunes encontramos las baterías de plomo ácido, las de níquel metal hidruro y las de ion de litio.

Las baterías de ion de litio representan la mejor opción para alimentar los sistemas eléctricos y electrónicos. Es la tecnología que ha permitido el desarrollo de los vehículos eléctricos, así como también en el campo de almacenamiento de energía renovable. Esto se debe a que poseen una mayor densidad de energía y densidad de potencia que otro tipo de baterías [8]. En la Figura 7 se puede apreciar los rangos típicos de densidad de energía en distintas baterías:

**Figura 7.** Comparación de diferentes tipos de baterías

	Energy density (kW/kg)	Round Trip Efficiency (%)	Life Span (years)
<b>Li-ion</b> 	<b>1st</b> 150-250	<b>1st</b> 95	<b>1st</b> 10-15
<b>NaS</b> 	<b>2nd</b> 125-150	<b>2nd</b> 75-85	<b>2nd</b> 10-15
<b>Flow</b> 	<b>3rd</b> 60-80	<b>3rd</b> 70-75	<b>4th</b> 5-10
<b>Ni-Cd</b> 	<b>4th</b> 40-60	<b>4th</b> 60-80	<b>3rd</b> 10-15
<b>Lead Acid</b> 	<b>5th</b> 30-50	<b>5th</b> 60-70	<b>5th</b> 3-6

Fuente: Handbook battery [9]

La clave de las baterías de litio para tener una energía específica superior es el alto voltaje por celda (3.70V). La curva de descarga plana ofrece una utilización eficaz de la energía almacenada en un espectro de voltaje entre 3.70-2.80V por celda.

### 2.2.2.1 TIPOS DE LITIO

Existen varios tipos de baterías de iones de litio, a continuación se describen tres de las tecnologías más relevantes dando a conocer sus características:

➤ Óxido de litio y cobalto (LiCoO<sub>2</sub>):

El Li-cobalto posee una alta energía específica lo que lo convierte en la opción más popular para dispositivos electrónicos como computadores portátiles, teléfonos celulares y cámaras digitales. La batería consta de un cátodo de óxido de cobalto y un ánodo de carbono de grafito, el Li-cobalto posee una vida útil relativamente corta, una baja estabilidad térmica y una capacidad de carga limitada.

➤ Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (LiNiMnCoO<sub>2</sub>):

La arquitectura de este tipo de batería radica en la combinación del níquel con el manganeso, esto se da ya que el níquel es conocido por su alta energía específica pero su escasa estabilidad, el manganeso tiene la ventaja de formar una estructura de espinela para lograr una baja resistencia interna pero ofrece una baja energía específica. La combinación de los metales mejora las fortalezas de cada uno. Es la batería preferida para herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas y otros sistemas de propulsión eléctricos. La combinación del cátodo es típicamente un tercio de níquel, un tercio de manganeso y un tercio de cobalto.

➤ Fosfato de litio y hierro (LiFePO<sub>4</sub>):

El fosfato de litio es más tolerante a las condiciones de carga completa y está menos estresado que otros sistemas de iones de litio si se mantiene a alto voltaje durante un tiempo prolongado, como compensación, su voltaje nominal más bajo reduce la energía específica por debajo de la de iones de litio mezclados con cobalto [10].

#### 2.2.2.2 CONCEPTOS BATERÍAS DE ION-LITIO

A continuación se muestran algunos de los conceptos y características más relevantes de las baterías de ion de litio:

- Capacidad: La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que se puede almacenar para luego ser entregada, se mide en amperios-hora (Ah).
- Auto descarga: Todas las baterías se ven afectadas por la auto descarga, esta no es un defecto de fabricación, sino una característica de la batería que consiste en la pérdida de energía cuando esta se encuentra en estado de

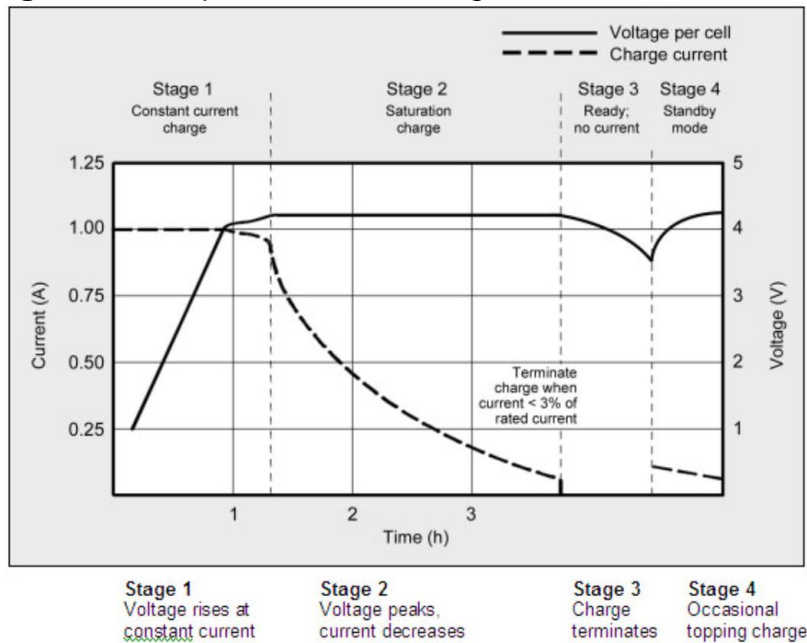
reposo, es decir sin una carga conectada. La auto descarga aumenta con la edad, los ciclos y la temperatura elevada.

- Tasa C: La velocidad de carga y descarga de una batería se rige por las tasas C. La capacidad de una batería comúnmente se clasifica en 1C, lo que significa que una batería completamente cargada con una capacidad nominal de  $xAh$  debería proporcionar  $xA$  durante una hora antes de su descarga.
- Estado de carga: El estado de carga (SOC) de una batería corresponde al porcentaje de su capacidad total de energía que aún se encuentra disponible en determinado momento. No existe una manera directa de medirlo debido a factores como la edad, el voltaje de carga, la temperatura, la velocidad de descarga y el manejo inadecuado que afectan la medición.
- Impedancia interna: La resistencia interna proporciona información sobre la batería, una lectura alta sugiere que está al final de su vida útil pues hace que la batería se caliente y el voltaje caiga bajo carga. Esto es especialmente importante en cargas pesadas como herramientas eléctricas y trenes de potencia eléctricos [10].

### 2.2.2.3 CARGA DE BATERÍAS DE ION-LITIO

La carga completa estándar de iones de litio se alcanza cuando la celda llega a 4.20V y la corriente cae al 3 por ciento de la corriente nominal, o ha tocado fondo y no puede bajar más. En la Figura 8 se muestra el comportamiento típico de carga de las baterías de litio

**Figura 8:** Comportamiento de carga baterías de ion de litio



Fuente: Cadex [10]

La tasa de carga recomendada de una celda de energía está entre 0.5C y 1C; el tiempo de carga completo es de aproximadamente 2 a 3 horas. Los fabricantes de estas celdas recomiendan cargar a 0,8C o menos para prolongar la vida útil de la batería; sin embargo, la mayoría de las celdas pueden soportar una tasa C de carga más alta con poco estrés [10].

#### 2.2.2.4 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

Actualmente los sistemas de gestión de baterías son piezas imprescindibles en diferentes tipos de acumuladores de energía, son utilizados en diversos equipos electrónicos, sistemas fotovoltaicos off grid, vehículos eléctricos, y otros dispositivos, estos sistemas electrónicos son los encargados de controlar las cargas y descargas de las baterías de litio en base a una serie de parámetros, con la finalidad de protegerlas ante posibles fallos [11].

El propósito de un BMS es:

- Proporciona seguridad y longevidad a la batería, una herramienta imprescindible para Li-ion.

- Control de altas temperaturas
- Revelar el estado de función en forma de estado de carga y estado de salud (capacidad).
- Indica el final de la vida útil cuando la capacidad cae por debajo del umbral objetivo establecido por el usuario.

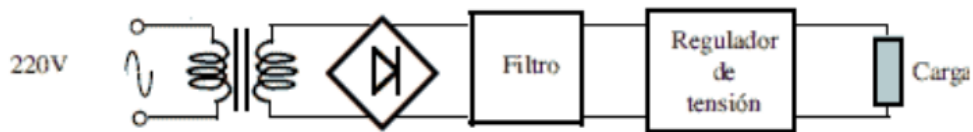
No todos los BMS ofrecen todas estas características, la función más básica es la protección durante la carga y descarga; desconecta la batería si se exceden los límites establecidos o si ocurre una falla, de este modo, cuando un BMS detecte parámetros de voltaje por encima del valor establecido, interrumpirá el paso de energía hacia la celda, abriendo un circuito que desconectará a dicha celda, de igual manera en etapa de descarga, al llegar al límite inferior de voltaje permitido desconectará a la celda de litio para evitar daños que degradan el estado de salud de la batería.

Asimismo, un BMS no permite que se realicen cargas por encima o por debajo de la temperatura establecida y regulará los niveles voltaje y corriente que son suministrados hacia la celda, en la descarga realizará una operación similar, enviando una señal al dispositivo que recibe la potencia del banco de baterías, para que éste, disminuya el requerimiento energético del sistema y de este modo, disminuya la temperatura de la batería [10].

### **2.2.3 Reguladores de voltaje**

Los reguladores de voltaje son instrumentos diseñados para la protección de los dispositivos electrónicos sensibles a variaciones de voltaje o a la presencia de ripple, los reguladores de voltaje tienen varios usos como lo son aplicaciones con baterías y el más destacado es la última fase de las fuentes reguladas ya que se encargan de proporcionar un voltaje constante necesario para el correcto funcionamiento de los diferentes dispositivos [12]. En la Figura 9 se muestra un diagrama de una fuente regulada típica.

**Figura 9:** Diagrama de una fuente regulada.



Fuente: Electrónica de potencia [13]

Los reguladores de voltaje tienen diferentes exigencias que deben asumir al momento de ser puestos en funcionamiento, estas son:

- Mantener una tensión constante a la salida de los mismos. sin importar las fluctuaciones que se puedan presentar a la entrada.
- Garantizar esta tensión cuando se exija una corriente de carga siempre dentro de los parámetros de diseño del regulador
- Contar con un sistema limitante de corriente.

Existen dos tipos de reguladores, los lineales donde el elemento de control varía de manera directamente proporcional a la tensión de línea o a la corriente de carga. y los reguladores conmutados, donde el elemento de control es conectado y desconectado de modo proporcional a las variaciones de línea o de carga, ambos tipos de reguladores presentan características diferentes y su diseño está pensado para diferentes aplicaciones [14].

#### 2.2.3.1 REGULADORES LINEALES

Los reguladores de tensión lineales controlan la tensión de salida con un ajuste en la caída de tensión que se mide en un transistor de potencia que se conecta en serie entre la entrada al regulador y la carga, es decir este regulador funciona con una corriente continua.

Estos reguladores presentan como ventajas un diseño mucho más sencillo con pocos componentes y además tienen un costo más bajo para aplicaciones de potencias bajas, por otra parte presenta falencias en cuanto a su eficiencia pues estas son de entre un 30%-60% dependiendo de la aplicación en que se utilice, debido a su baja eficiencia tienden a calentarse pues disipan la energía que no

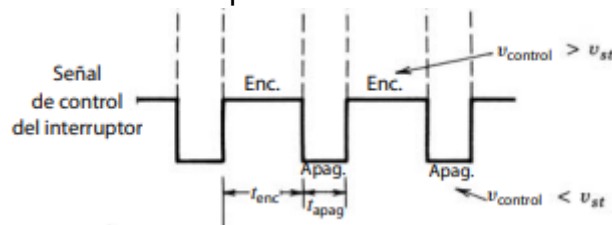
utilizan en forma de calor [13]. Los tipos de reguladores lineales más comunes son los reguladores de la serie 78XX y el regulador ajustable LM317

### 2.2.3.2 REGULADORES CONMUTADOS

Para obtener el voltaje deseado a la salida del regulador sin importar las fluctuaciones que se presentan a la entrada del mismo los reguladores DC/DC en modo de conmutación utilizan uno o más interruptores para transformar un voltaje de corriente continua en un voltaje de salida, el cual se controla con el ajuste del tiempo de encendido y apagado llamado conmutación por modulación de anchura de pulsos (ver Figura 10).

La señal de conmutación por modulación de anchura de pulsos posee un periodo de conmutación que es igual a  $T_s = t_{enc} + t_{apag}$  y modifica los tiempos de encendido y apagado de acuerdo con la relación de trabajo [15]

**Figura 10:** Conmutación por modulación de anchura de pulsos.



Fuente: Electrónica de potencia [15]

Existen 3 configuraciones básicas para este tipo de reguladores:

- Step-down: Consiste en tener la configuración del circuito dispuesto para obtener a la salida un valor de tensión menor que el que se presenta a la entrada del regulador.
- Step-up: Consiste en tener la configuración del circuito dispuesto para obtener a la salida un valor de tensión mayor o igual que el que se presenta a la entrada del regulador.
- Buck-boost: Donde el voltaje de salida puede ser más alto o más bajo que el voltaje de entrada. Un regulador buck-boost se obtiene por medio de la conexión en cascada de los dos convertidores básicos: el Step down y el Step-up



## 2.2.4 Proceso de análisis jerárquico AHP

El proceso de análisis jerárquico desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process) fue diseñado para resolver problemas de criterios múltiples, este proceso requiere que quien toma la decisión proporcione evaluaciones respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y posteriormente se especifica la preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión, el resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestren las preferencias en cada una de las alternativas.

El AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas y además una de sus principales características es que se pueden incluir aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera de los análisis debido a su complejidad para ser medidos pero que son de gran importantes en algunos casos [16].

El AHP se fundamenta en:

- La representación del problema mediante identificación de criterios, sub criterios y alternativas.
- Comparación entre los criterios.
- Priorización de los criterios.
- Evaluación de las alternativas.
- Análisis final.

El AHP utiliza la llamada escala de Saaty (Tabla 1), esta escala contiene valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas entre los criterios, y que tan preferible es un criterio respecto a los demás. De esta manera se calcula el vector de prioridades que nos dice que peso tendrá determinado criterio a la hora de realizar la selección de alternativas.

**Tabla 1: Escala Saaty**

<b>Planteamiento verbal de la preferencia</b>	<b>Calificación Numérica</b>
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Fuente: Proceso de análisis jerárquico [16]

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un prototipo de generación y almacenamiento de energía que se adapte a las necesidades que se presentan en operaciones militares en zonas aisladas de Colombia.

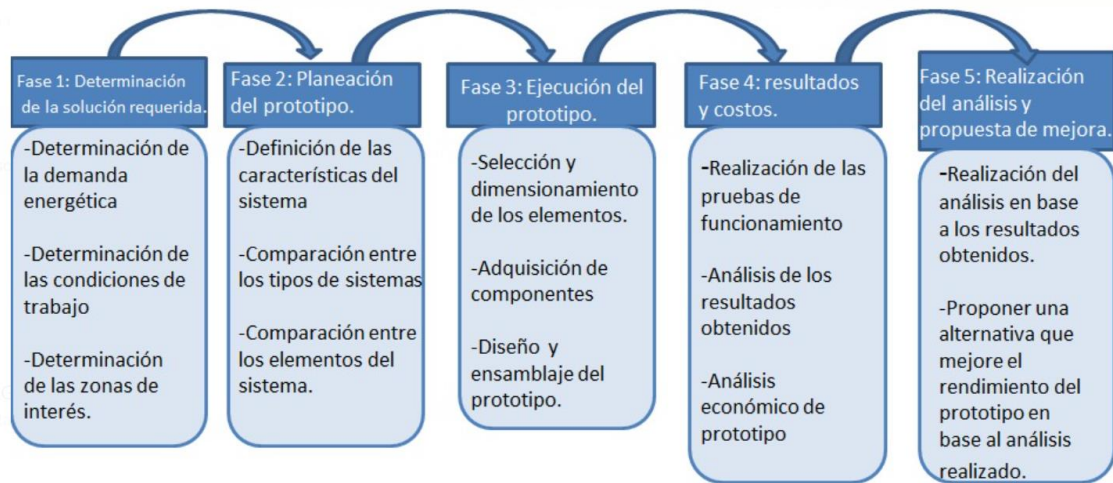
### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la demanda energética en base al tamaño de las unidades y las limitaciones que suponen las operaciones militares.
- Seleccionar los componentes más adecuados para llevar a cabo el diseño y la construcción del prototipo.
- Realizar el diseño y la construcción del prototipo.
- Realizar diferentes pruebas que permitan evaluar el comportamiento del prototipo.

## 4. METODOLOGÍA

En la Figura 11 se plantea la metodología a seguir del proyecto, esta consta de 5 fases que se explican a continuación:

**Figura 11.** Metodología para el desarrollo del proyecto



Fuente: Elaboración propia

### 4.1 FASE 1: DETERMINACION DE LA SOLUCION REQUERIDA

En esta fase se realiza la recolección de datos de los diferentes aspectos de relevancia para el proyecto, como lo son la determinación de la demanda energética que posee el personal militar mediante la identificación de los diferentes dispositivos electrónicos que manejan, sus condiciones de trabajo y las zonas de influencia donde realizan las operaciones.

### 4.2 FASE 2: PLANEACION DEL PROTOTIPO

En esta fase se realiza la definición de las características y parámetros que debe cumplir el sistema para garantizar que supla las necesidades energéticas de los militares y tenga un correcto funcionamiento.

### **4.3 FASE 3: EJECUCION DEL PROTOTIPO**

En esta fase se realiza el diseño eléctrico y estructural para posteriormente llevar a cabo la construcción del prototipo.

### **4.4 FASE 4: RESULTADOS Y COSTOS**

En esta etapa se llevan a cabo las pruebas de funcionamiento del prototipo en condiciones reales de trabajo, esto con el fin de analizar su desempeño en el área de trabajo, además en esta etapa se realiza el análisis financiero para conocer los costos finales de producción del prototipo.

### **4.5 FASE 5: REALIZACION DEL ANALISIS Y PROPUESTAS DE MEJORA**

Esta es la etapa final del proceso en donde teniendo en cuenta los resultados obtenidos se realizan las conclusiones del trabajo y se analizan alternativas para la implementación de cambios en el sistema con el fin de aumentar su rendimiento.

## 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 5.1 CONSULTA AL PERSONAL DEL EJÉRCITO

Para empezar con el desarrollo del proyecto fue muy importante entender las necesidades reales y el modo de operar de los soldados en zonas aisladas, por lo que fue necesario contactar con personal del ejército nacional para resolver dudas respecto a la demanda, condiciones de trabajo y zonas de operación. De la información suministrada se destacan los siguientes puntos:

- En las operaciones militares la demanda energética cambia en función del tamaño de la unidad y el tipo de operación que se esté realizando. Los dispositivos electrónicos que se utilizan son GPS Garmin, radios, celulares y en cierto tipo de operaciones un computador portátil. Los GPS se alimentan por un par de baterías AA.
- El recurso solar disponible varía dependiendo de la zona del país donde se esté realizando la operación y de la tipografía específica del lugar por donde se están movilizando, estas zonas se concentran sobre todo en el pacífico colombiano (Chocó, Valle del cauca), en la parte sur oeste (Nariño, Putumayo, Cauca y Caquetá), y en algunos puntos del este (Norte de Santander, Arauca y Vichada).
- Cuando se realizan operaciones en zonas aisladas los miembros del ejército son abastecidos con suministros desde una estación fija para una duración aproximada de 15 días, dichos suministros son cargados en su mochila la cual puede llegar a tener un peso cercano a los 25Kg sin contar el peso del armamento. Esto representa una limitación en el proyecto, ya que el peso extra que los soldados deban asumir puede representar una afectación en su desempeño.
- La mayoría de los radios que dispone actualmente el ejército nacional son modelos antiguos de series como PRC 710, Motorola XTS y Motorola HT, estos modelos tienen cargadores robustos diseñados para realizar la transformación AC-DC en el mismo módulo donde se encuentran los demás elementos del cargador. También se dispone de modelos más recientes en menor cantidad como los Motorola APX, los cuales tienen un cargador más universal que facilita la carga en corriente continua.

Con el fin de contar con información clave para el dimensionado del sistema se obtuvo información sobre el tiempo promedio de descarga de los dispositivos y la distribución de los dispositivos entre los soldados, la información se muestra a continuación:

**Tabla 2:** Características de los dispositivos

Dispositivo	# Numero de dispositivos	Tiempo de duracion promedio de la bateria [h]
Radios	1 por 3 soldados	36
GPS	1 por cada 9 soldados	48
Celulares	1 por cada soldado	24
Laptop	1 por unidad (Capitan)	36

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 PLANEACIÓN

### 5.2.1 Características del sistema de suministro requerido

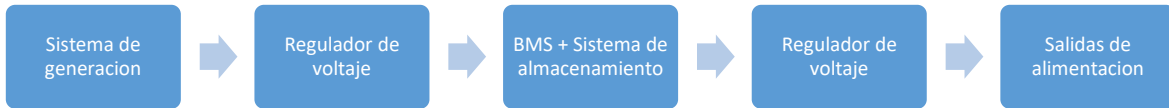
Uno de los requerimientos para el desarrollo del prototipo es la necesidad de que este se adapte a las diferentes condiciones de operación, así, un sistema que supla las necesidades en zonas donde se requiera el uso de un computador va a estar sobre dimensionado con respecto a uno que no lo necesite. Es por esto que se plantea un prototipo con un enfoque a los dispositivos básicos con las siguientes características:

- El prototipo debe contar con un sistema de almacenamiento de energía capaz de brindar la autonomía necesaria para suplir la demanda diaria de una batería de radio APX, un celular y un par de baterías de GPS.
- El sistema debe contar con un BMS para el control de carga las baterías y con reguladores de voltaje para controlar la tensión entregada por los paneles y fijar los valores de tensión para alimentar los dispositivos electrónicos.
- El sistema debe contar con los elementos necesarios para poder realizar las conexiones de carga de los dispositivos que utilizan los soldados.

- El sistema debe tener un indicador para saber el nivel de carga del sistema de almacenamiento.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de bloques en general del sistema propuesto.

**Figura 12:** Diagrama de bloques del prototipo





Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Determinación de la demanda a suplir

Para la determinación de la demanda se caracterizó la energía típica de los dispositivos usados y en base a los datos de la Tabla 2 se obtuvo el valor de la demanda diaria por cada dispositivo:

**Tabla 3:** Elementos usados en las operaciones

Equipo	Tipo de cargador	Capacidad de batería [mAh]	Voltaje de carga [V]	Tipo de conexión	Capacidad [Wh]	% de carga en un día	Demanda diaria [Wh]
Celular		3000	5	USB	15	100%	15
Radio		4000	14	Plug	56	67%	37,296
GPS		3000	5	USB	15	50%	7,5
Computador		3500	19	Plug	66,5	67%	44,289
Total demanda							59,796

Fuente: Elaboración propia

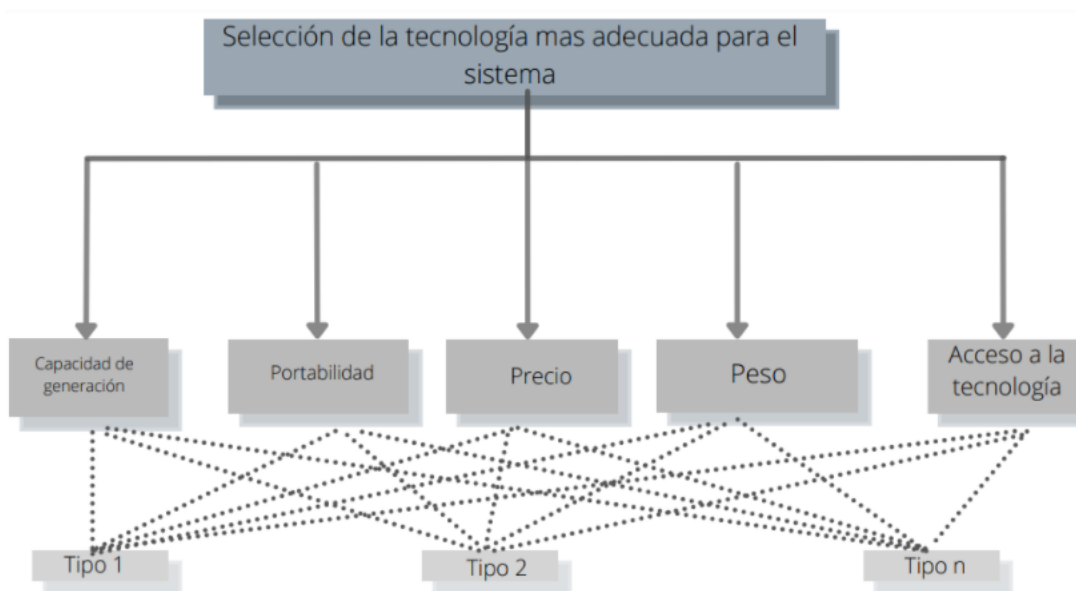


Como se explicó en la sección anterior, el prototipo suplirá la demanda de un celular, un radio y un par de baterías de GPS, si sumamos la demanda diaria de estos dispositivos tenemos un total de **59,8Wh** por día.

### 5.3 DETERMINACION DEL TIPO DE SISTEMA MEDIANTE EL MÉTODO AHP

Para llevar a cabo la selección del tipo de sistema más adecuado a implementar se realizó el proceso de análisis jerárquico AHP, para lo cual el primer paso es establecer ciertos criterios de selección los cuales están dados por las necesidades a la hora de llevar a cabo las operaciones en zonas aisladas del país expresadas por el personal militar en las visitas realizadas y también por las limitantes financieras y logísticas para la adquisición de los equipos y realizar su ponderación para posteriormente evaluarlos en cada una de las diferentes alternativas. A continuación se mencionan y explican los criterios que se tuvieron en cuenta:

**Figura 13:** Esquema de comparación de criterios



Fuente: Elaboración propia

- **Precio:** Para la selección del tipo de sistema nuestro presupuesto es limitado por lo tanto el costo es un aspecto que repercute de manera directa a la hora de llevar a cabo la compra de los componentes.
- **Portabilidad:** La portabilidad es una característica física de la tecnología que nos permite saber el área que ocupa, o si tiene la función de plegarse o enrollarse para facilitar el transporte de un punto a otro.
- **Capacidad de generación:** Esta característica nos describe la facilidad con la que el panel puede realizar la generación en escenarios con los que se va a encontrar el personal militar en zonas rurales, con aspectos como la facilidad de ser desplegado o si puede acoplarse a la mochila de los soldados de manera sencilla para generar energía mientras se desplazan.
- **Peso:** Este aspecto nos permite identificar según el tipo de sistema la carga extra que deberá llevar el personal militar.
- **Acceso a la tecnología:** Esta característica nos indica si el tipo de sistema analizado tiene un fácil alcance, es decir si se podría adquirir de manera sencilla, es importante indicar que a pesar de haber nuevas tecnologías en cuanto a generación solar, no todas están al alcance de nuestras posibilidades.

La ponderación de los criterios anteriormente mencionados se llevó a cabo teniendo en cuenta la consulta al usuario realizada al personal militar y para su calificación se utilizó la escala de Saaty, los resultados de este análisis se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 4:** vector de prioridades.

Criterios	Vector de prioridades %
Capacidad de generación	31.50646585
Portabilidad	29.14806616
Precio	17.83581705
Peso	12.76346681
Acceso a la tecnología	8.746184129






Fuente: elaboración propia

El vector de prioridades nos indica el peso que van a tener cada uno de los criterios a la hora de realizar la comparación entre los diferentes tipos de sistemas.

Posteriormente se realizó una tabla comparativa con las posibles tecnologías que podrían acoplarse adecuadamente a nuestro proyecto, para llevar a cabo esta comparación se le asignó un valor de 1 a 5 a cada una de las alternativas en función a su desempeño teniendo en cuenta cada uno de los criterios mencionados, siendo 5 un desempeño muy bueno y 1 uno muy malo.

Esta valoración es multiplicada por el peso dado para cada criterio en el vector de prioridades, estos resultados se suman y se saca un puntaje final. La tecnología con el puntaje más elevado será la que presente un mejor rendimiento promedio y por tanto será la seleccionada para llevar a cabo el proyecto como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5: Comparación de tecnologías**

Criterio	Descripción	Capacidad de generación	Portabilidad	Precio	Peso	Acceso a la tecnología	Puntaje final
 Sistema de varios módulos de generación, plegable y adaptable a mochilas de bajo tamaño.	5	4	3	3	5	<b>422,42</b>	
 Sistema de 2 módulos de generación, plegable, con una base para ser desplegado de tamaño considerable.	3	3	3	4	4	246,64	
 Sistema enrollable con posible adaptación a mochila de tamaño mediano.	5	4	1	4	1	367,24	
 Sistema de 2 módulos de generación, plegable, con una base para ser desplegado de tamaño mediano.	3	2	4	1	4	226,73	
 Sistema de varios módulos de generación, plegable de gran área.	4	4	3	3	3	305,42	
 Sistema enrollable con posible adaptación a mochila de bajo tamaño.	4	5	2	5	1	323,88	
Vector de prioridades %		31,51	29,15	17,84	12,76	8,75	

Fuente: Elaboración propia

Al realizar el método AHP nos arroja como resultado final que la tecnología que mejor se acopla a las necesidades del proyecto es la numero 1, esta tecnología tiene un sistema de acople a las mochilas lo que permitiría que se genere energía cuando el personal militar se encuentra desplazándose de un lugar a otro, además es bastante portátil ya que se puede plegar y disminuir el área ocupada en un porcentaje considerable, posee un peso relativamente bajo para la potencia generada, es una tecnología asequible o que puede replicarse de manera sencilla y es fácil de adquirir en Colombia. Por lo tanto esta tecnología va a ser la que se tome como base para proceder a desarrollar el dimensionado del proyecto.

## 5.4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

### 5.4.1 Selección de componentes

A continuación se muestra el proceso de selección de los componentes principales que vamos a implementar en el desarrollo del prototipo teniendo en cuenta sus características de funcionamiento.

#### 5.4.1.1 SELECCIÓN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para el sistema de almacenamiento se optó por utilizar las baterías de ion de litio 18650, estas baterías cuentan con un nivel de comercialización bastante alto, lo que supone una ventaja en aspectos como el precio y la asequibilidad.

Dentro de todas las opciones disponibles en el mercado se optó por las distribuidas por Moviltronics ya que cuentan con un muy buen precio-capacidad, además de ser una marca confiable, ya que es común encontrar este tipo de baterías en el mercado con capacidades de almacenamiento muy altas a precios bajos de marcas poco conocidas.

**Tabla 6:** Especificaciones batería 18650 Moviltronics

Características de baterías 18650	
Peso	45,43 gr
Diámetro	18,4 mm
Altura	65 mm
Vol. Máximo de carga	4,2 V
Vol. Carga nominal	3,6 V
Composición	LiNiMnCoO <sub>2</sub>
Capacidad	2600 mAh
Tasa de carga máxima	1C
Tasa de descarga máxima	3C
Impedancia interna	70mΩ



Fuente: Moviltronics [17].

Si calculamos la energía de cada batería multiplicando la tensión nominal por su capacidad nos da un valor de 9,36Wh, si dividimos el valor de la demanda (59,8Wh) por la capacidad de cada batería nos da un total de 6,4 baterías lo que nos lleva a la selección de 6 baterías que suman **56,16Wh** de energía y un peso de 272,6gr.

El mismo distribuidor con el cual adquirimos las baterías 18650 Moviltronics tenía en su catálogo un BMS para un pack de 6 baterías conectadas en serie, debido a la similitud en las características de estos módulos en el mercado, se decidió comprar el conjunto de las 6 baterías junto con el BMS ya que se adaptaba de manera correcta en el sistema, las especificaciones del módulo se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 7** Especificaciones módulo BMS

Numero de baterías	6
Tipo de conexión de las baterías	Serie
Voltaje de carga [v]	25,2
Corriente de carga máxima [A]	25
Detección de sobrecarga [V]	4,28
Detección de sobredescarga [V]	2,55

Fuente: Moviltronics [18]

#### 5.4.1.2 SELECCIÓN DE PANELES SOLARES:

Para realizar la compra de los paneles solares se encontraron dos opciones disponibles en el mercado:

- Comprar el sistema de paneles ya terminado con características definidas que se acomodara a nuestro diseño.
- Comprar las celdas solares individuales para luego realizar un montaje propio.

La segunda opción posee más ventajas ya que tiene un mayor margen de diseño, permitiendo seleccionar los materiales, configuración y tamaño más adecuados.

Para llevar a cabo la selección de las celdas solares se realizó una búsqueda de las opciones disponibles tanto de manera online como en las tiendas distribuidoras de la región, de esta búsqueda se recolectaron los datos de diferentes opciones que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** Comparación de celdas solares

Opción	Área [cm <sup>2</sup> ]	Voltaje [v]	Corriente [mA]	Precio [COP]	Local	Online	Empresa distribuidora
1	346.5	12	416	\$ 56,000		x	Vistronica
2	210.25	6	500	\$ 49,161		x	Vistronica
3	224	6	500	\$ 30,000	x		Electrónicas de Bucaramanga
4	420	12	500	\$ 45,000	x		Casa Hermes Bucaramanga
5	221	6	500	\$ 32,000	x		Casa Hermes Bucaramanga

Fuente: Elaboración propia con datos de los distribuidores

De las celdas analizadas en la tabla se decidió comprar la fabricada por Hi-tronix (opción 4), ya que a pesar que posee un área considerable, lo cual se convierte en una desventaja al reducir la resistencia del prototipo, es por mucho la mejor alternativa en relación precio-potencia, además estas celdas son comercializadas en la ciudad lo que facilita su adquisición.

Teniendo en cuenta el área total de los paneles y el presupuesto para su compra se decidieron adquirir un total 4 celdas solares con una potencia total de 24W, dichas celdas serán conectadas en serie para garantizar el voltaje de carga de las baterías que es de 25,2 V, las características de las celdas se muestran a continuación:

**Tabla 9:** Especificaciones celda solar Hi-tronix

Características Paneles	
Voltaje nominal	12
Corriente nominal	500
Potencia [W]	6
Voc	13,575
Isc	350
Largo [cm]	27,4
Alto [cm]	16

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.1.3 REGULADOR DE VOLTAJE

Para el prototipo se requiere un regulador para el panel solar con un margen de voltaje de entrada de hasta 50V, y otros dos reguladores con un margen menor de hasta 30V. El regulador LM2596 tiene características de funcionamiento que se acoplan de manera correcta a nuestras necesidades por lo que fue el elemento que se seleccionó, a continuación se presentan sus principales características de funcionamiento.

**Tabla 10:** Especificaciones LM2596

Características de LM2596	
Voltaje Máximo entrada	50v
Voltaje Mínimo de entrada	3v
Voltaje Máximo de salida	36v
Voltaje Mínimo de salida	1.25v
Corriente máxima de salida	3A



Fuente: Moviltronics [19]

## 5.4.2 Diseño del prototipo

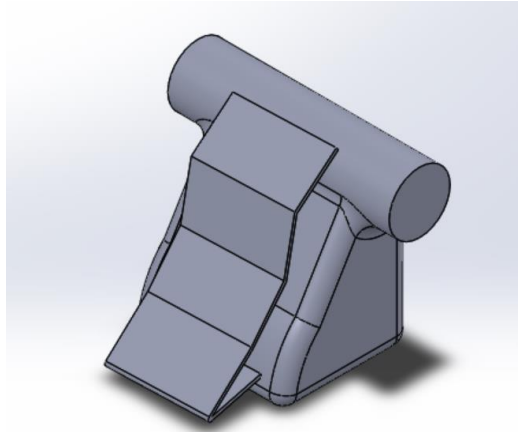
### 5.4.2.1 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA

Para llevar a cabo el diseño estructural del sistema se realizó un esquema de una mochila de campaña típica en SolidWorks, con base en esta se realizó el modelo estructural de los paneles seleccionados para tener un boceto de como sería la disposición sobre la mochila.

El diseño de la estructura de paneles consta de 5 módulos, los 4 primeros son los módulos generadores, es decir los que tienen los paneles solares, el quinto módulo es un compartimento donde va a estar dispuesta la Power bank, este se encuentra en la parte inferior del sistema y puede ser plegado hacia adentro para reducir espacio y dar una inclinación favorable para la generación, también se implementará un sistema de anclaje en la parte superior del sistema de generación mediante el uso de correas de ajuste que conecten a la mochila con el prototipo, esto permitirá que pueda ser montado y desmontado de manera sencilla.



**Figura 14:** Diseño SolidWorks del sistema



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2.2 DISEÑO DEL POWER BANK

Para el diseño del Power bank, teniendo claro los dispositivos que este debe alimentar y sus características, se realiza la búsqueda de los elementos que van a ir anclados en las paredes de la estructura. Para realizar la alimentación de los celulares y las baterías de los GPS se requieren dos puertos USB hembras, para la alimentación de las baterías de los radios de comunicación se requiere 1 plug DC hembra, además se necesita un Switch de corredera para seleccionar que tipo de salida va a estar habilitada. También se hace necesario para la entrada de alimentación un plug DC hembra y un Switch on-off para abrir o cerrar el circuito de las baterías, por último se necesitan los leds, las resistencias y el botón de encendido del sistema indicador de voltaje de las baterías.

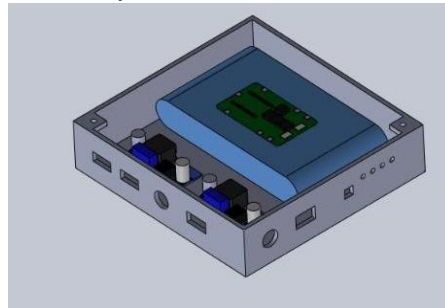
Estos elementos irán fijos en las paredes del Power bank, por ende sus características físicas son el primer paso para realizar el diseño, con ayuda de un pie de rey se midieron los elementos mencionados anteriormente y se realizó un diseño en SolidWorks teniendo en cuenta las siguientes características:

- El tamaño del Power bank debe ir en función al tamaño del compartimiento ubicado en el quinto modulo del sistema de generación, por lo que las baterías deben ser ubicadas una al lado de otra y de esta manera aprovechar mejor el espacio.
- La disposición de los elementos internos de la estructura deben respetar un margen de distancia entre sí con el fin de garantizar que se puedan soldar fácilmente.

- Los elementos que van en las paredes del Power bank se deben distribuir de manera estética y funcional
- El espesor de las paredes del Power bank será de 3mm, esto con el fin de garantizar la resistencia en condiciones de trabajo.

Finalmente y luego de acomodar los elementos en diferentes configuraciones se optó por separar un regulador de voltaje para aprovechar mejor el espacio del Power bank, el regulador de voltaje irá directamente conectado al arreglo de paneles y tendrá su propia estructura. La configuración final del Power bank se puede ver en la Figura 15.

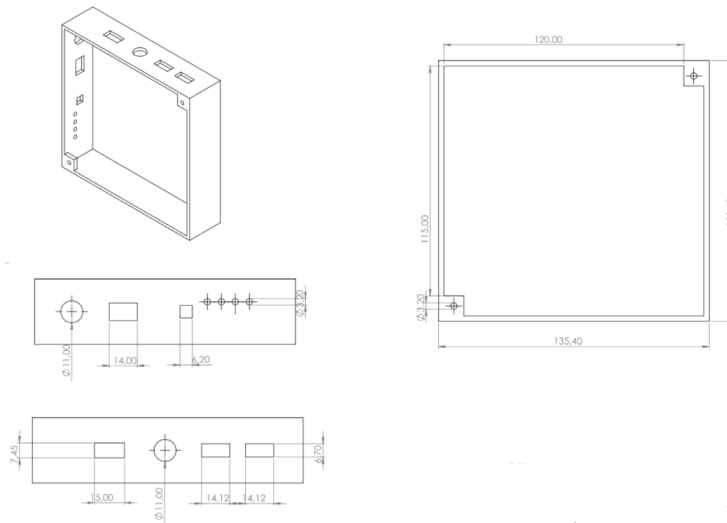
**Figura 15:** Disposición final de los elementos



Fuente: Elaboración propia

También se diseñó un sistema de cierre que consiste en una tapa plana que asegura el Power bank por medio de tuercas y tornillos, dichos elementos se consiguieron en el mercado local de tal forma que su tamaño fuera acorde a las dimensiones del sistema. En la Figura 16 se ve las dimensiones finales del Power bank.

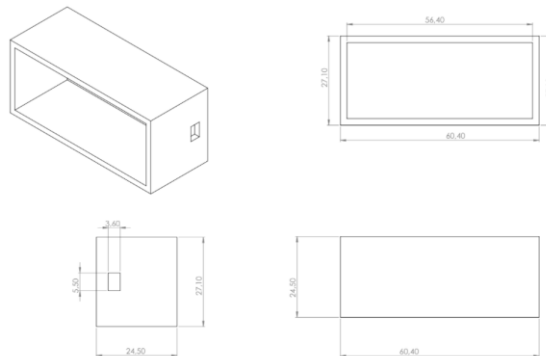
**Figura 16:** Diseño Power bank en SolidWorks



Fuente: Elaboración propia

Posterior a esto se procedió a realizar el diseño para la estructura del regulador de voltaje en base a sus dimensiones y del grosor de los cables de entrada y salida.

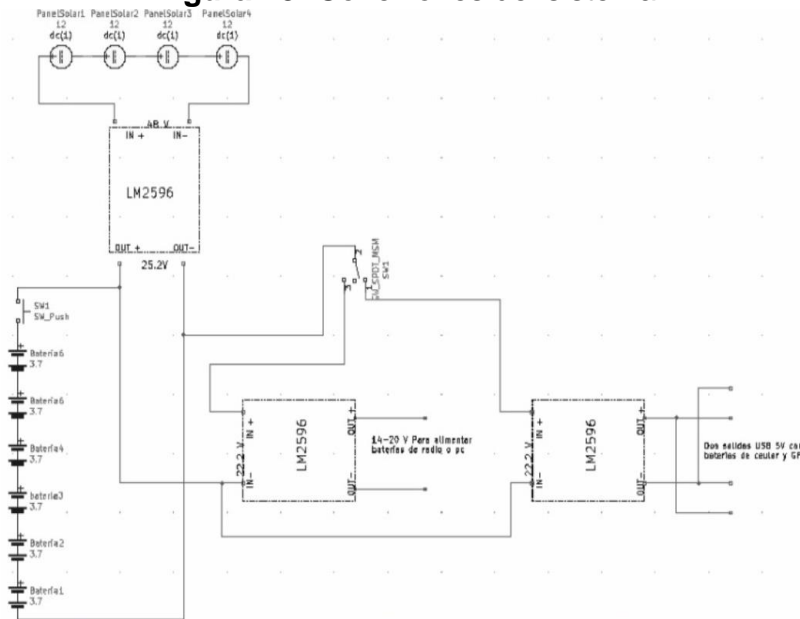
**Figura 17:** Diseño estructura del LM2596



Fuente: Elaboración propia

También se realizó un esquema en donde muestra el cableado interno y las conexiones entre elementos del sistema:

**Figura 18: Conexiones del sistema**

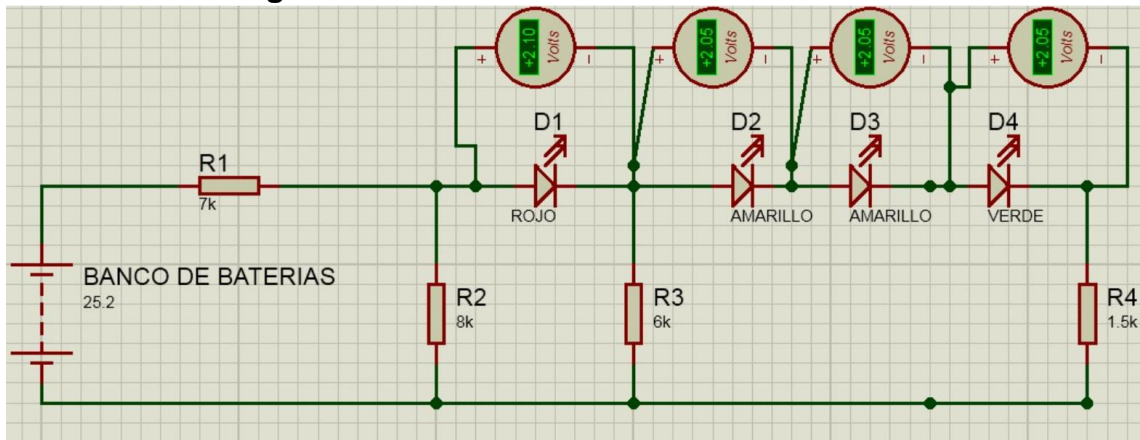


Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2.3 DISEÑO DEL INDICADOR DE CARGA

Para este diseño se decidió realizar un sistema simple con diodos led y resistencias cuya única función sea la de dar un indicativo general del estado de carga de las baterías, se usaron 4 diodos led de distintos colores y se dispusieron las resistencias de manera tal que cuando las baterías estuviesen totalmente cargadas encendieran todos los leds, esto teniendo en cuenta que para que un led encienda debe tener una caída de tensión de 2V. En la Figura 19 se muestra la simulación para el sistema cuando las baterías están cargadas y descargadas.

**Figura 19:** Diseño indicador del nivel de batería



Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3 Ensamblaje de componentes

#### 5.4.3.1 SISTEMA DE PANELES

Con el fin de utilizar los materiales más adecuados para la fabricación de la lona sobre la cual reposan los paneles se realizó una búsqueda de personal que tuviera experiencia trabajando para el ejército en la industria manufacturera, entre los distintos negocios se encontró “Manufacturas militares”, un local en donde se realizan todo tipo trabajos para el personal militar incluyendo trabajos con paneles solares, el local está ubicado cerca al batallón en la calle 14#32c-68 de la ciudad de Bucaramanga.

Para llevar a cabo el ensamblaje del sistema de paneles a la lona primero se tuvo que realizar la conexión en serie de los paneles solares, luego se tuvo que pegar el arreglo de paneles a una tela, esto debido a que las características físicas de los paneles no permiten realizar puntos de costura sobre los mismos. Para garantizar el agarre de los paneles a la tela se utilizó soldadura fría tipo industrial “Titanex”. Se seleccionó este tipo de soldadura por ser ideal para una gran gama de superficies y por tener resistencia a temperaturas altas de hasta 110°C.

**Figura 20:** a) Soldadura fría b) Paneles pegados a la tela



Fuente: Elaboración propia

Teniendo los paneles ya asegurados a la tela se procedió a mandar a realizar el modelo seleccionado en “Manufacturas militar” con las especificaciones dadas, posteriormente se reforzó el pegamento para garantizar la estabilidad de los paneles en condiciones de trabajo.

**Figura 21:** Panel solar terminado



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.3.2 SISTEMA POWERBANK

Se acudió a la dependencia de la universidad UNAB Creative la cual está pensada para el apoyo de la comunidad estudiantil en diferentes aspectos como el acompañamiento en la realización de proyectos que requieran impresiones en 3D. Allí se llevó a cabo la impresión de los diseños realizados en SolidWorks de la estructura del Power bank y del regulador de voltaje, el material utilizado para la impresión es ácido poli láctico (PLA).

Al terminar la impresión las estructuras quedan con ciertas superficies irregulares las cuales debieron ser lijadas para tener un acabado uniforme y permitir que los elementos que debían ser incorporados en la estructura se acoplaran de manera

precisa, dichos elementos se aseguraron con masilla bicomponente, soldadura fría y cinta doble faz de alta resistencia para soportar las condiciones de trabajo a las que van a ver expuestas. Finalmente se procedió a soldar todos los componentes internos y a asegurar la tapa con el sistema de cierre.

**Figura 22:** Power bank imagen interna y externa



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.3.3 PROTOTIPO TERMINADO

Una vez terminados los elementos del sistema se realizó una modificación a una mochila de uso personal para tener un punto de anclaje para el sistema fotovoltaico. Este sistema de anclaje permite un montaje o desmontaje rápido y un ajuste seguro que garantiza la estabilidad de los paneles sobre la mochila.

**Figura 23:** Sistema de acople del panel a la mochila



Fuente: Elaboración propia



Se acopló todo el sistema y se comprobó que todos los elementos cumplieran con las expectativas de diseño, en la Figura 24 vemos los elementos se acoplan correctamente.

**Figura 24:** Prototipo terminado



Fuente: Elaboración propia

Al finalizar el ensamblaje del prototipo y teniendo todos los elementos dispuestos de manera correcta en su ubicación final tanto en el sistema de carga como en el sistema de almacenamiento, se procedió a realizar la toma del peso que posee cada elemento, empezando por el sistema de generación el cual tuvo un peso de **1.025 Kg** y posteriormente el sistema de almacenamiento el cual tuvo un peso de **0.455 Kg**, así el peso final del prototipo que deberán asumir los miembros del personal militar es de **1.48 Kg**



## 5.5 PRUEBAS Y RESULTADOS

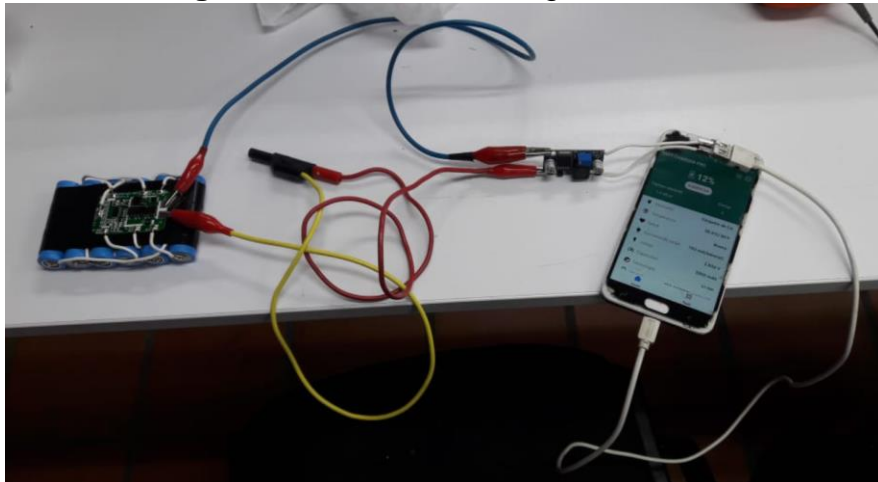
Se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento con el fin de validar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de trabajo, se llevaron a cabo pruebas de carga de los dispositivos electrónicos y pruebas de carga del arreglo de baterías, dichas pruebas se describen a continuación:

### 5.5.1 Pruebas de carga de dispositivos

#### 5.5.1.1 CELULARES

Estas pruebas fueron las más detalladas ya que se hicieron antes del ensamblaje de la Power bank, esto facilitó la medición de la corriente entregada por la batería antes y después del LM2596,

**Figura 25:** Pruebas de carga de celular

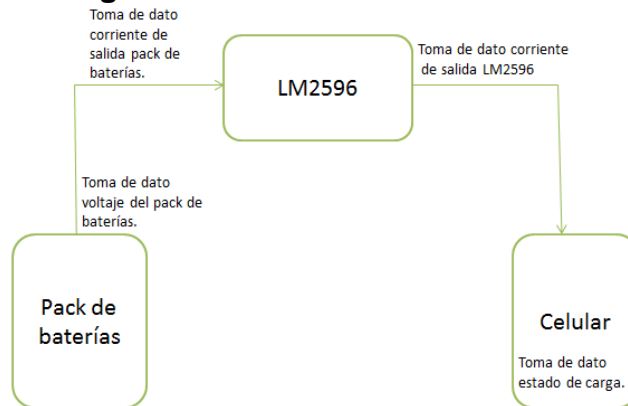


Fuente: Elaboración propia

Para la prueba se usaron dos celulares tipo “Samsung Galaxy”, ambos con una batería de 3000mah y 3,85 de voltaje nominal. También es importante decir que estas baterías han estado en uso por bastante tiempo, por lo que la capacidad real será menor a su valor nominal.

Se midieron los valores de voltaje y corriente del arreglo de baterías, la corriente a la salida del LM2596 y estado de carga del celular, en el siguiente esquema se muestran los puntos de tomas de datos.

**Figura 26:** Puntos de toma de datos



Fuente: Elaboración propia

En la tabla x se muestran los valores de corriente máxima de carga que se produce en la primera etapa de carga de los celulares, esto con el fin de comparar la velocidad de carga del prototipo con la de los cargadores actuales.

**Tabla 11:** Medición de corriente instantáneas

Con un celular	Corriente maxima antes del LM	0,34 A
	Corriente maxima despues del LM	1 A
Con dos celulares	Corriente maxima antes del LM	0,47A
	Corriente maxima despues del LM	1,42A

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos en esta prueba se puede decir que al conectar dos celulares al tiempo la corriente de carga para cada uno es menor que la que se entrega cuando se conecta solo un dispositivo, pero la corriente que nos entrega el banco de baterías con los dos dispositivos es mayor.

También se realizaron 2 pruebas en las que el Power bank entregó toda su energía a las baterías de los celulares. La primera prueba se realizó basada en un escenario de uso real por lo que se tomaron 5 momentos de carga en la que los celulares

permanecieron encendidos variando los valores de carga inicial tiempo total de carga.

Al concluir la prueba los resultados son llevados a tablas de datos y se sintetizan en una tabla de resumen final que muestra el comportamiento general del sistema durante esta prueba, dicha tabla se presenta a continuación:

**Tabla 12:** Comportamiento con carga de celulares

Momento de carga		1	2	3	4	5	Total
Pack	Capacidad [Ah]	0,50	0,59	0,34	0,38	0,62	2,43
	Energía [Wh]	12,12	13,56	7,49	8,26	12,73	54,16
Celular	Capacidad [Ah]	1,57	1,69	1,12	1,03	2,12	7,53
	Energía [Wh]	7,85	8,43	5,58	5,16	10,61	37,63
Ef. Prom LM	69%						

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de esta prueba nos muestran que la eficiencia promedio del regulador LM2596 con un voltaje de salida de 5V es del **69%**. También se puede ver que las baterías se descargan totalmente a los 20V y que entregaron una energía aproximada de **54,16Wh**, un valor muy cercano al nominal (56,16Wh) lo que nos indica el buen estado de las mismas.

Se realizó la segunda prueba la cual consiste en entregar un ciclo de carga completo del Power bank a los celulares completamente descargados con el fin de conocer el máximo de dispositivos que el sistema puede cargar completamente antes de descargarse. Los resultados obtenidos en esta prueba nos indican que el Power bank tiene la capacidad de cargar un total de 4.3 baterías de este modelo de celular.

#### 5.5.1.2 GPS GARMIN

Estos dispositivos son alimentados por un par de pilas AA, la capacidad típica de este tipo de baterías ronda los 1300mAh. En la página de mercado libre se encontró un cargador que permite cargar un par de baterías por medio de un cable USB (ver figura 27) a una tensión de 5V.

**Figura 27:** Cargador USB para baterías AA



Fuente: Mercado libre [20]

Debido a que un par de baterías AA tienen características de carga muy similares a las de una batería de celular, estas pruebas finalmente no se llevaron a cabo, asumiendo que los resultados van a ser muy similares exceptuando el tiempo de carga que está determinado por la velocidad del cargador.

### 5.5.1.3 RADIOS

Para realizar la prueba de carga con los radios fue necesario contar con el apoyo de la policía nacional para el acceso a los equipos necesarios. Se utilizó un cargador para radio Motorola Impres 2 el cual tiene un voltaje de salida de 14V con 2,8A y también una batería APX 8000 la cual tiene una capacidad de 3400mAh y un voltaje nominal de 7,4. También fue necesario realizar la compra del cable con el plug de entrada del cargador de radio.

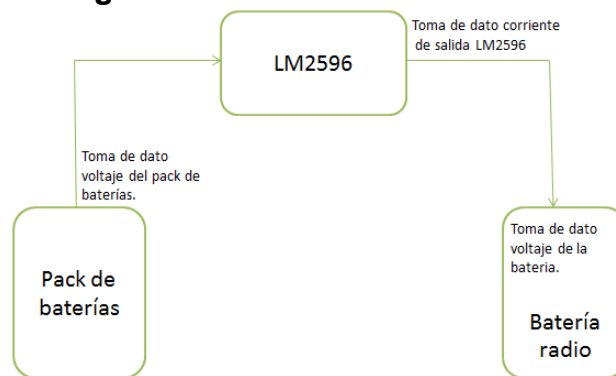
**Figura 28:** Prueba de carga batería de radio



Fuente: Elaboración propia

Se realizó la prueba de carga para la batería de radio, la cual se encontraba totalmente descargada y se tomaron datos de voltaje del banco de baterías, corriente a la salida del LM2596 y voltaje de la batería del radio, vale la pena aclarar que para el momento de realizar esta prueba la Power bank se encontraba completamente terminada, es decir el cableado interior ya se encontraba soldado y por este motivo no se pudo tomar la medida de corriente a la salida del banco de baterías, los datos se recolectaron cada determinado tiempo para esta prueba, en el siguiente esquema se muestran los puntos de tomas de datos.

**Figura 29:** Puntos de toma de datos



Fuente: Elaboración propia

Debido a que la prueba fue realizada dentro de las instalaciones de la policía, no conto con mucha disposición de tiempo, por lo cual la prueba tuvo una duración de una hora y los resultados se muestra a continuación:

**Tabla 13:** Comportamiento con carga de baterías

Tiempo	0	2min	5min	15min	40min	1h
Voltaje pack	24,3	24,3	24,2	24,04	23,72	23,5
Corriente radio	0,5	2	1,6	1,6	1,6	1,6
Voltaje radio	1,87	2,8	5,4	7,38	7,64	7,7

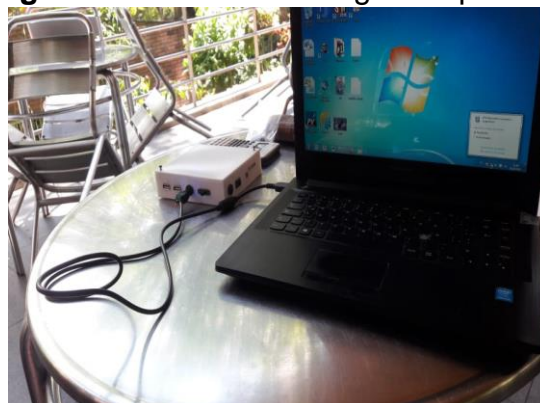
Fuente: Elaboración propia

Se observa en los primeros instantes de la carga del radio cómo la corriente aumenta su valor hasta alcanzar un pico de 2A, posterior a esto esta cambia su tendencia y disminuye hasta alcanzar un valor constante de 1.6A que es el 50% del valor de corriente de carga que entrega el cargador original, otro aspecto importante que se pudo apreciar durante el desarrollo de esta prueba fue el aumento considerable de la temperatura en el regulador de voltaje, esto debido al alto nivel de corriente manejado.

#### 5.5.1.4 COMPUTADOR

Se realizó la prueba de carga de la batería de un computador portátil con el modelo Lenovo G40-30, aunque la carga de este dispositivo no hace parte de los alcances del proyecto se decide realizar para analizar el comportamiento del sistema de cara a una posible implementación para futuras alternativas, el cargador de este portátil presenta un voltaje de alimentación de 20v con una corriente de 2.25 A y una batería Lenovo con una capacidad de 2200mAh y un voltaje nominal de 14,4 V. También fue necesario realizar la compra del cable con el plug de entrada de alimentación del portátil.

**Figura 30:** Prueba de carga computador



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14:** Comportamiento con carga de computador

Prueba de computador				
Tiempo	0 min	30 min	60 min	90 min
Voltaje pack	25,2	24,4	23,6	22,8
Corriente PC	0,8	0,8	0,8	0,8
% de carga pc	0%	18%	35%	53%

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el voltaje de salida en los reguladores LM2596 debe ser 1.5v menor al voltaje de entrada, la prueba se realizó limitando la tensión del banco de baterías a un valor por encima de 21.5v que es valor mínimo admisible en la entrada para tener una salida estable de 20v, se decidió trabajar con un voltaje mínimo en el banco de baterías de alrededor de los 22v para no poner en riesgo el sistema, podemos observar cómo la corriente mantiene un valor constante de 0,8A a lo largo de toda la prueba y el porcentaje de carga final del computador portátil fue de 50%.

### 5.5.2 Características de carga del sistema

Esta prueba se realizó para medir las características de generación de los paneles bajo distintos valores de irradiancia, ángulo de incidencia, azimut y porcentaje de sombreado, tanto para el sistema desplegando en el suelo como con el sistema acoplado a la mochila. Se midieron los valores de corriente a la salida de los paneles solares y mediante un sensor, el valor de irradiancia, estos datos se recolectaron a diferentes horas del día.

**Figura 31:** Toma de pruebas del sistema



Fuente: Elaboración propia

Antes de empezar con las pruebas se realizó la corrección al sensor de irradiancia “DBTU1300”, ya que presentaba una lectura más elevada respecto a la que arroja la estación meteorológica, se realizaron mediciones en momentos del día en que la radiación solar fue constante para comparar el dato minuto a minuto de la estación con el dato instantáneo del sensor.

**Tabla 15:** Cálculo del factor de corrección:

Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]		Factor de correccion
DBTU1300	Estacion solar	
158	121	0,77
165	125	0,76
250	188	0,75
500	378	0,76
750	563	0,75
1050	797	0,76
1150	877	0,76
1330	980	0,74
Promedio		0,75767

Fuente: Elaboración propia



También se midieron algunas características específicas del sistema fotovoltaico, en la siguiente tabla se muestran los resultados:

**Tabla 16:** Características del sistema de generación:

Características de las celdas	
Voc [V]	52,3
Isc [A]	0,26
Area de las celdas [m2]	0,17536
Eficiencia panel	8%

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se puede apreciar como la corriente de corto circuito apenas supera la mitad del dato proporcionado por el fabricante (500mA), a pesar de que cada panel fue probado antes de realizar el montaje y el valor de corriente era cercano a 500mA, luego del montaje se presentó un fallo que provoco que este dato se redujera considerablemente, por lo que los resultados del desempeño del sistema se verán afectados.

#### 5.5.2.1 PRUEBAS CON EL SISTEMA DESPLEGADO EN EL SUELO

##### ➤ Pruebas sin sombra

Esta prueba se realizó con el prototipo dispuesto en un lugar despejado de manera que ninguna sombra creada por un edificio o un árbol interviniera en la toma de datos, se midió la corriente que el sistema fotovoltaico entregaba al banco de baterías con el sistema desplegado de manera horizontal sobre el suelo y en un ángulo en el que el valor de corriente fuera el máximo.

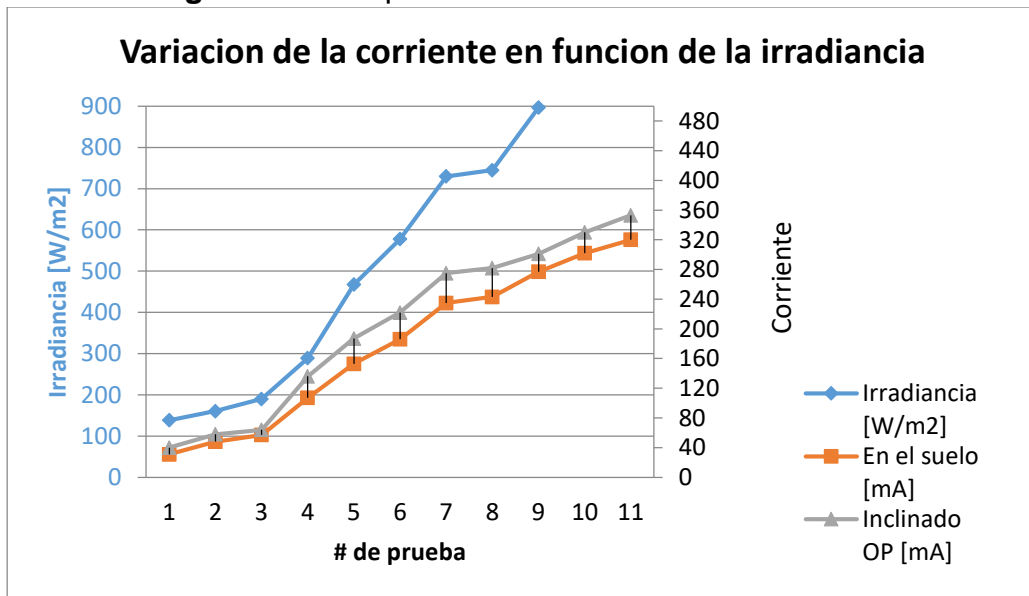
**Tabla 17:** Resultados pruebas sin sombra

Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	En el suelo [mA]	Inclinado OP [mA]
138,32	31	40
160,36	48	58
190	57	64
288,8	107	136
467,4	153	187
577,6	186	222
729,6	235	275
744,8	243	282
896,8	277	301
988	302	330
1097,44	320	353

Fuente: Elaboración propia

De los resultado podemos destacar el valor máximo de corriente que se pudo lograr **353mA**, si multiplicamos este valor por el voltaje nominal de carga nos da una potencia entregada por los paneles de **7,625W**. También se observa cómo al tener el panel con un ángulo de incidencia favorable la corriente generada experimenta un aumento significativo en comparación a cuándo se tiene desplegado totalmente horizontal en el suelo, para tener una visualización mejor de los resultados se realizó una gráfica que describe el comportamiento del sistema.

**Figura 32:** Comportamiento del sistema sin sombra



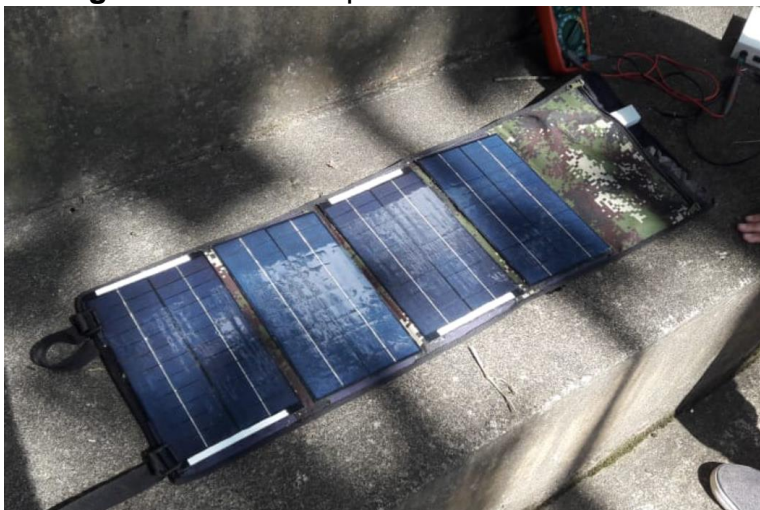
Fuente: Elaboración propia

Al trazar las líneas de comportamiento de la corriente se observa como estas decrecen a medida que la irradiancia disminuye, y el ángulo de incidencia favorable provoca que su generación siempre se encuentre por encima de la línea del panel totalmente horizontal.

➤ Pruebas con sombra parcial

Esta prueba se realizó utilizando la sombra de árboles no muy frondosos para tener una condición de sombra parcial sobre el prototipo (ver Figura 33). Los resultados se muestran a continuación.

**Figura 33:** Paneles parcialmente sombreados



Fuente: Elaboración propia

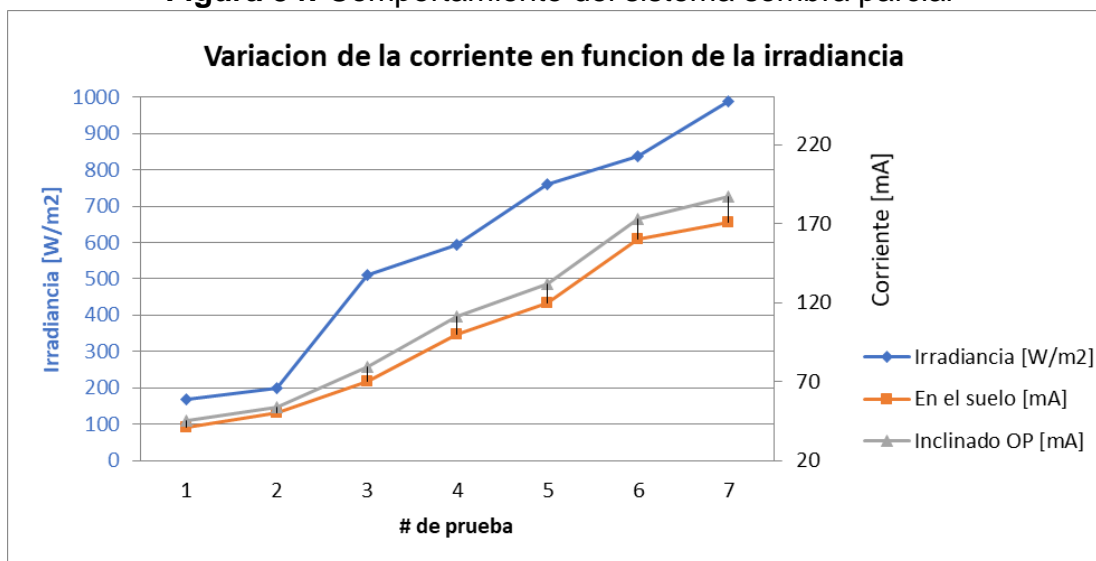
**Tabla 18:** Resultados pruebas sombra de arbustos

Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	En el suelo [mA]	Inclinado OP [mA]
167,96	41	45
197,6	50	54
509,2	70	79
592,8	100	111
760	120	132
836	160	173
988	171	187

Fuente: Elaboración propia

Al comparar esta prueba con el escenario anterior donde no existía la sombra se puede observar como la generación del sistema tiene una disminución significativa en su rendimiento, sin embargo esta sigue teniendo un aumento proporcional conforme aumenta la irradiancia.

**Figura 34:** Comportamiento del sistema sombra parcial



Fuente: Elaboración propia

➤ Pruebas con alto porcentaje de sombras

Por último se dispuso el panel bajo la sombra de un árbol frondoso que apenas deja pasar la luz solar, los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 19:** Resultados pruebas sombra de árbol

[W/m²]	Inclinado OP [mA]
233	41
260	50
714,4	53
836	80

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra el comportamiento del sistema cuando se ve expuesto a un porcentaje de sombra alto, se puede observar que la generación de corriente es

muy baja y no aumenta significativamente con el aumento de irradiancia, por lo que en zonas boscosas la generación no será significativa.

#### 5.5.2.2 PRUEBAS CON EL SISTEMA ACOPLADO A LA MOCHILA

Para estas pruebas se acoplo el sistema a la mochila y se realizaron diferentes mediciones variando la irradiancia y el azimut con respecto al sol en una zona despejada, los resultados se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 20:** Resultados pruebas con mochila

Azimut con respecto al sol						
Irradiancia	0°	20°	35°	60°	90°	105°
[W/m <sup>2</sup> ]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]
190	39	30	22	12	0	0
334,4	100	89	76	55	26	0
456	127	116	88	64	32	0
532	150	122	92	73	37	9
577,6	193	143	122	105	40	12
638,4	215	197	172	129	72	14
767,6	259	231	198	152	95	20
858,8	274	255	228	157	111	26
988	318	290	257	194	140	40

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse, la generación con los paneles acoplados a la mochila es menor a la medida anteriormente bajo un ángulo favorable de incidencia, también se observa cómo al llegar a los 105° de azimut la generación se cae drásticamente, lo que nos dice que cuando el personal se desplace de cara al sol el sistema tendrá una generación prácticamente nula.

### 5.5.3 Pruebas de carga continua

#### 5.5.3.1 CARGA CON FUENTE DE PODER

Con ayuda de los bancos DC del laboratorio de electrónica se realizó una prueba para determinar el aumento de voltaje de las baterías en función de la energía entregada por el banco, para esto se cargaron las baterías a un nivel bajo de carga con el fin de asegurar un aumento constante en el voltaje de las mismas:

**Tabla 21:** Carga de baterías con fuente de poder

Tiempo (h)	Voltaje de las baterías	Energía del banco [Wh]	Aumento de voltaje
0	21,74	-	-
0,25	22,25	5,56	0,51
0,5	22,8	5,70	0,55
0,75	23,27	5,82	0,47
1	23,77	5,94	0,50
Promedio	22,77	5,76	0,51

Fuente: Elaboración propia

De manera aproximada se logra ver que para aumentar en **0,5V** el voltaje de las baterías se necesitan **5.75Wh**.

#### 5.5.3.2 CARGA CON EL SISTEMA ESTÁTICO

Estas pruebas se realizan con el fin de apreciar el aumento del voltaje de las baterías en un día típico de la ciudad de Bucaramanga, para esto se dispuso el panel en una zona despejada con un ángulo de inclinación favorable y se tomaron las medidas de irradiancia promedio de cada hora desde las 9:00am hasta las 4:00pm. También se realizó el cálculo del performance ratio dividiendo la potencia real que llega a las baterías con la potencia máxima teórica del panel solar.

$$PR = \frac{7,625}{48 * 0,5} = 0,3177$$

**Tabla 22:** Resultado prueba de carga

Hora	I [Wh/m <sup>2</sup> ]	Energía entregada [Wh]	Aumento de voltaje teórico	Aumento de voltaje medido
9-10	789	6,02	0,53	0,42
10-11	572	4,36	0,39	0,36
11-12	838	6,39	0,57	0,48
12-13	803	6,12	0,54	0,46
13-14	547	4,17	0,37	0,36
14-15	347	2,65	0,23	0,29
15-16	223	1,70	0,15	0,12
Total	4119	31,41	2,79	2,49

Fuente: Elaboración propia

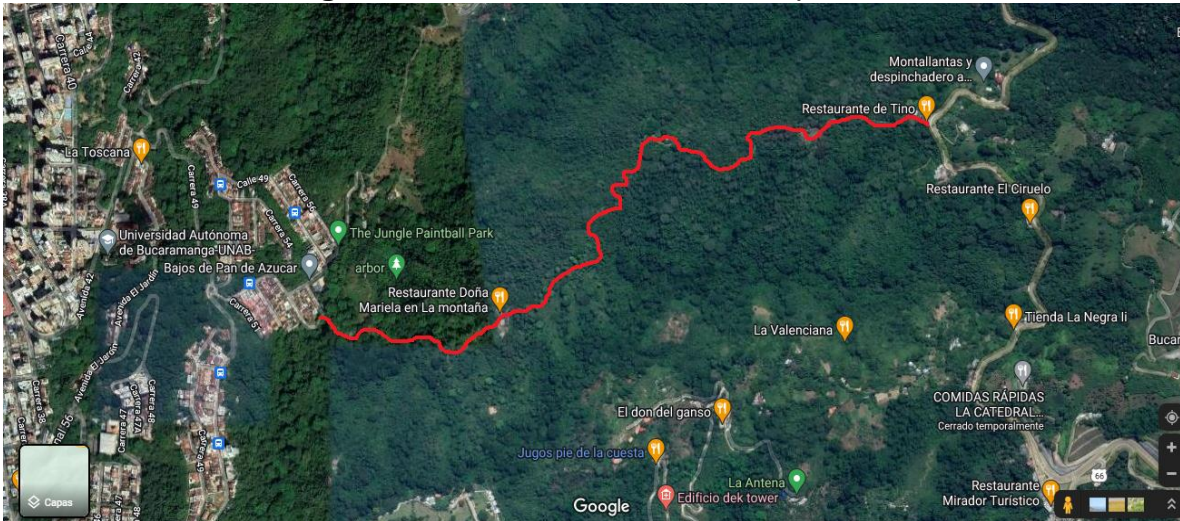
Utilizando el Performance ratio y suponiendo una incidencia solar constante, se calculó la energía entregada por los paneles solares al banco de baterías, esta obtuvo un valor total de 31,41Wh, además el aumento total del voltaje en las baterías fue de 2,49V, un valor muy cercano al esperado (2,79V). Al observar los resultados de la prueba se puede indicar que para cargar completamente el banco de baterías se necesitan de al menos dos días con buenas condiciones de irradiación solar manteniendo al panel desplegado con un ángulo de incidencia favorable, en condiciones reales de operación del personal militar el tiempo estimado de carga total del banco de baterías será más elevado.

#### 5.5.3.3 SIMULACIÓN ESCENARIO REAL

Con el fin de determinar el desempeño del prototipo en un escenario real se decidió hacer un recorrido por un sendero montañoso cerca de la UNAB.



**Figura 35:** Sendero recorrido en la prueba



Fuente: Elaboración propia

El sendero que conecta Pan de azúcar con el kilómetro 8 vía Cúcuta se caracteriza por ser una zona rural con una capa vegetal considerable seguido de tramos despejados (ver Figura 36), esto lo hace una ruta de interés para determinar el desempeño del prototipo en condiciones reales de trabajo ya que a este tipo de escenarios son a los que se enfrentan los miembros del ejército nacional a la hora de realizar operaciones en zonas aisladas.

**Figura 36:** Sendero recorrido para la prueba



Fuente: Elaboración propia

La prueba tuvo una duración de cuatro horas, se realizaron cuatro mediciones de voltaje al banco de baterías, una al inicio del recorrido, otra al terminar el trayecto



de ida, posteriormente al regresar al punto de partida y se tomó una última medida en un punto donde el sistema se fijó en el suelo. Además se realizó una estimación de la irradiación promedio entre cada punto con ayuda del sensor solar, a continuación se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 23:** Resultados prueba en campo

Hora	I [W/m <sup>2</sup> ]	Energía entregada [Wh]	Aumento de voltaje teórico	Aumento de voltaje medido
10:00-11:32	742	5,66	0,50	0,21
11:32-1:04	815	6,21	0,55	0,33
1:04-2:09	467	3,56	0,32	0,25
Total	2024	15,43	1,37	0,79

Fuente: Elaboración propia

De lo anterior se puede observar cómo el sistema podría entregar una energía total de 15,43Wh con un aumento de voltaje de 1,37V si estuviese estático, el aumento real del banco de baterías experimenta un aumento de voltaje de 0.79V, al realizar la comparación entre el aumento de voltaje teórico y el medido obtenemos:

$$\frac{v_{teorico}}{v_{medido}} = \frac{0,79}{1,37} * 100 = 57,66\%$$

Este valor es un indicativo de la energía que se dejó de producir debido a las condiciones topográficas del sendero en el que se realizó la prueba.

#### 5.5.4 Análisis de costos

Para conocer el costo final del prototipo se realizó la caracterización de los diferentes gastos asociados a los materiales y los servicios utilizados en el desarrollo del proyecto, aclarando que en dichos gastos no se tendrá en cuenta las prestaciones brindadas por la UNAB, como lo son los servicios y el material para la impresión 3D de las estructuras desarrolladas y los elementos prestados en el laboratorio de electrónica.

Se realizó una tabla en donde se incluyen los precios y las cantidades de los elementos que se adquirieron por canales online o en distribuidores con locales físicos en la ciudad de Bucaramanga:

**Tabla 24:** Costos de los elementos del prototipo.

Elemento	Cantidad	Precio unitario	Precio total	% de participacion en costos
Celdas solares	4	\$ 46.000,00	\$ 184.000,00	37,3%
Baterias 18650	6	\$ 15.000,00	\$ 90.000,00	18,2%
Reguladore LM2596 HV	1	\$ 13.000,00	\$ 13.000,00	2,6%
Reguladore LM2596	2	\$ 7.000,00	\$ 14.000,00	2,8%
BMS	1	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00	5,1%
Puerto USB hembra	2	\$ 3.000,00	\$ 6.000,00	1,2%
Plug DC macho	3	\$ 2.000,00	\$ 6.000,00	1,2%
Plug DC hembra	2	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00	0,8%
Interruptor on-off	1	\$ 2.500,00	\$ 2.500,00	0,5%
Switch 2 posiciones 3 pines	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	0,6%
Masilla bicomponente	1	\$ 7.000,00	\$ 7.000,00	1,4%
Cinta doble faz	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00	4,0%
Soldadura fria	4	\$ 10.000,00	\$ 40.000,00	8,1%
Cable de alimentacion pc	1	\$ 9.700,00	\$ 9.700,00	2,0%
Cable de alimentacion Radio	1	\$ 9.700,00	\$ 9.700,00	2,0%
Cargador de pilas AA	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00	6,1%
Otros	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00	6,1%
<b>Total</b>			<b>\$ 493.900,00</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

A estos costos deben sumarse la prestación de servicios como lo fue todo el proceso de manufactura necesario para acoplar los paneles en un solo elemento cuyo costo fue de **\$65.000**, y los servicios para el transporte de los elementos que fueron comprados fuera de la ciudad de Bucaramanga cuyos costos suman un total de **\$21.600**.

Finalmente los costos asociados al prototipo ascienden a un total de **\$580.500** pesos.

## CONCLUSIONES

Se realizó un estudio mediante la realización de entrevistas y visitas a personal militar que nos permitieron caracterizar la demanda que poseen los militares la cual fue de 59.8 Wh, además de conocer las condiciones de trabajo que presentan y las zonas de interés.

Se realizó la selección del tipo de sistema a utilizar mediante el método AHP para que cumpliera con las condiciones dadas por el personal militar de manera correcta dentro de nuestras posibilidades logísticas y económicas, además se realizó la selección de componentes en función del cumplimiento de la demanda y condiciones de trabajo que presenta el personal militar dando como resultado un prototipo funcional con un peso bajo y una alta capacidad de transporte.

El prototipo diseñado se construyó con elementos adquiridos en la región y tiene potencial para posteriormente ser implementado como una versión de prueba para un escenario real de operaciones militares en zonas aisladas del país por lo que podemos decir que es un proyecto viable.

El sistema de generación en condiciones de irradiación cercana a los 1000 W/m<sup>2</sup> y con un ángulo favorable de incidencia solar puede entregar una potencia de alrededor de 7,56W al sistema de almacenamiento, dicha potencia es menor a la esperada según las características de los paneles indicadas por el distribuidor, por este motivo se realizó una medida de control donde se corroboró que el sistema estaba generando una corriente menor a la esperada, esto nos indica que los paneles adquiridos para llevar a cabo el sistema de generación del prototipo tenían defectos de fábrica.

La generación de energía del prototipo cuando se encuentra en zonas con una alta densidad de follaje no es significativa para lograr suplir la demanda requerida, por lo que se requiere que el sistema siempre tenga un porcentaje de incidencia directa del sol.

## RECOMENDACIONES

Con el fin de aumentar la producción de energía del sistema de generación es recomendable adaptar una estructura que permita configurar la inclinación del prototipo cuando este se encuentre desplegado en el suelo, ya que como se pudo observar al estar el sistema con un ángulo de inclinación favorable la generación experimenta un aumento considerable de energía. Esta estructura deberá diseñarse con un material de alta resistencia pero debe ser liviano para que no represente un aumento considerable en el peso del prototipo.

Para incluir el computador portátil dentro de los dispositivos que el prototipo puede cargar, se deberá implementar un regulador de voltaje tipo Buck-boost donde el voltaje de salida puede ser más bajo o igual que el voltaje de entrada.

Al realizar las pruebas de carga de los celulares, el cálculo medio de la eficiencia del regulador de voltaje fue de 69%, esto se debe a que los reguladores LM2596 vienen con un circuito impreso de regulación estándar para un rango de voltaje amplio, esto quiere decir que los elementos capacitivos e inductivos no son los más adecuados para los voltajes de entrada y salida de nuestro sistema en particular, por lo que su eficiencia no va ser óptima por esta razón es recomendable adquirir los condensadores y la boina con los valores más adecuados para disminuir las perdidas en este elemento.

Es importante resaltar como otra posible mejora del prototipo la selección de paneles solares con una mejor tecnología de generación que permitan una mayor eficiencia en condiciones de sombreado y de menor tamaño que brinden una mayor resistencia, ya que en el campo de operaciones por las características de las condiciones de trabajo de los militares estos se verán sometidos a esfuerzos que con el tamaño actual de las celdas pueden terminar ocasionando fallas en la estructura.

Para futuras versiones se recomienda la implementación de un disipador de calor en el regulador de voltaje, ya que este puede experimentar altas temperaturas debido a los tiempos prolongados a altos valores de corriente durante los procesos de carga de los dispositivos, así mismo se recomienda realizar un medidor-indicador de nivel de voltaje de baterías más preciso, que logre identificar mejor los niveles críticos del nivel de carga de las baterías.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] BP, “Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing,” p. 66, 2020.
- [2] Ministerio de minas y energía, *Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia*. 2015.
- [3] ESMAP, SOLARGIS, WB, and IFC, “Global Solar Atlas,” *Global Solar Atlas*. p. 1, 2019, Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=3.535352,-74.025879,5&s=-0.527336,-60.864258&m=site>.
- [4] P. Rogers Tardec, “Army technology: A publication of science and technology news from the U.S Army,” vol. 2, no. 6, 2014.
- [5] R. Parra *et al.*, “Rediseño, optimización y producción de fuente fotovoltaica portatil (fase II),” 2010.
- [6] H. AMSELEM, “ESTUDIO ENERGÉTICO DE CARGADORES SOLARES PARA TELÉFONOS MÓVILES ” Autor: HAMZA AMSELEM,” pp. 1–85, 2018.
- [7] J. A. Gonzáles, R. C. Pérez, and M. A. Castro Gil, *Centrales de energias renovables: Generacion electrica con energias renovables*. 2009.
- [8] E. J. Cueva Sánchez, J. Lucero, A. Guzman, J. Rocha, and L. Espinoza, “Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices,” *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 1, pp. 166–176, 2018, doi: 10.29019/enfoqueute.v9n1.202.
- [9] D. K. Kim, S. Yoneoka, A. Z. Banatwala, Y.-T. Kim, and K.-Y. Nam, *Handbook on Battery Energy Storage System*, no. December. 2018.
- [10] I. Buchmann, “Learn About Batteries - Battery University.” <https://batteryuniversity.com/articles> (accessed Nov. 26, 2021).
- [11] N. Actualmente and S. La, “SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS ( BMS ),” pp. 2–4, 2007.
- [12] J. . Huircán, “Reguladores de Voltaje,” 1, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2010, [Online]. Available: [http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/PDF\\_CTOSII/reguieeee.pdf](http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/PDF_CTOSII/reguieeee.pdf).
- [13] Educachip, “Regulador de Voltaje LM317,” pp. 1–39.
- [14] C. Quinde, “Implementación De Una Fuente Regulada Variable De 0 a 15 Voltios (Cc) Para El Laboratorio De Electrónica De La Carrera De Ingeniería

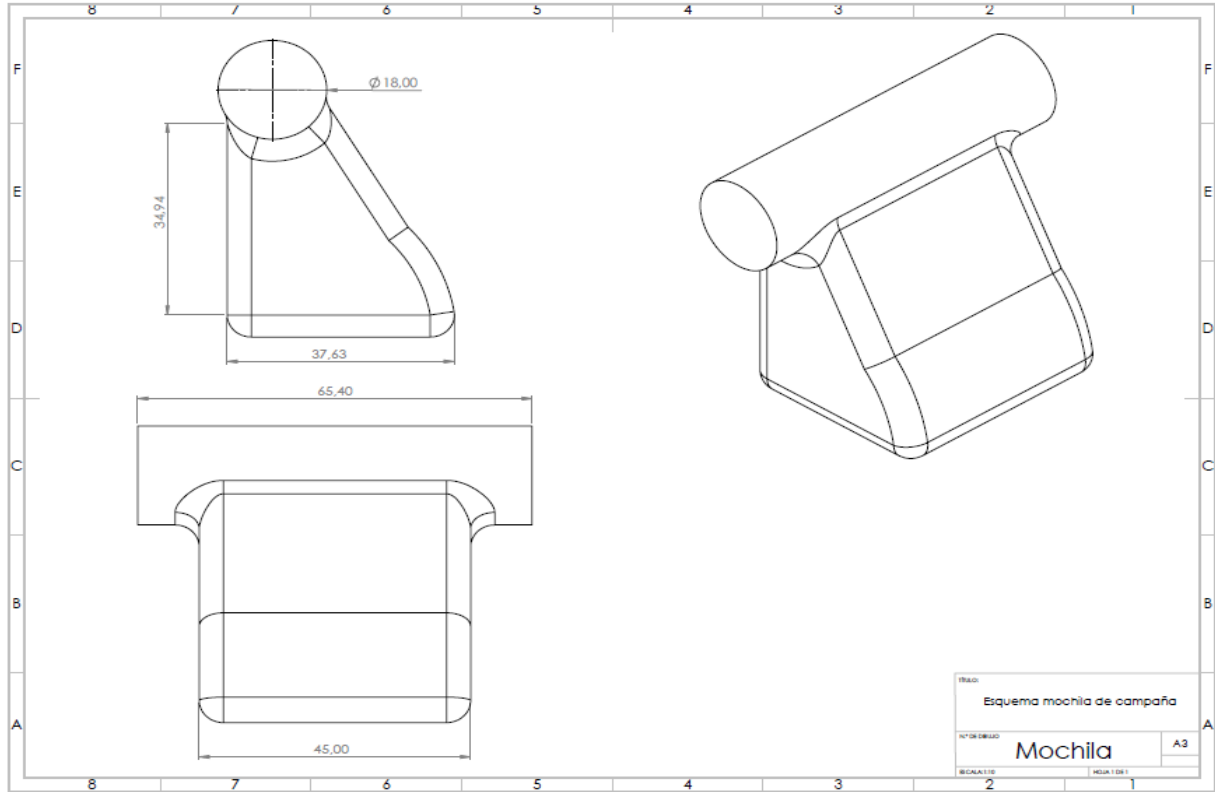
En Teleinformática,” p. 83, 2019.

- [15] T. M. U. W. P. R. Ned Mohan, *Electronica-De-Potencia-Mohan-3Ra-Edicion*. 2009.
- [16] G. B. Toskano Hurtado, “The Analytic Hierarchy Process (AHP) as a Tool for Making Decisions in the Selection of Suppliers,” *Tesis Digit. UNMSM*, p. 100, 2005, [Online]. Available:  
[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano\\_hg/cap3.pdf%0Ahttp://www.jstor.org/stable/978380?origin=crossref](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.pdf%0Ahttp://www.jstor.org/stable/978380?origin=crossref).
- [17] “Bateria 18650 3.6V 2600mah - Moviltronics.”  
<https://moviltronics.com/tienda/18650-2600/> (accessed Dec. 12, 2021).
- [18] “BMS 22.2V 6S 6 Celdas litio - Moviltronics.”  
<https://moviltronics.com/tienda/bms-6s/> (accessed Dec. 12, 2021).
- [19] “Fuente reductora LM2596 DC-DC 1.25-35V - Moviltronics.”  
<https://moviltronics.com/tienda/fuente-lm2596/> (accessed Dec. 12, 2021).
- [20] “Cargador USB Baterias AA 1300 Mah Pbe21130aahc C2 | MercadoLibre.”  
[https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-836094312-cargador-gp0-usb-con-2-baterias-aa-1300-mah-pbe21130aahc-c2-\\_JM#position=45&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=3995d255-2a8b-42bc-a8e0-bda9e5de5338](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-836094312-cargador-gp0-usb-con-2-baterias-aa-1300-mah-pbe21130aahc-c2-_JM#position=45&search_layout=stack&type=item&tracking_id=3995d255-2a8b-42bc-a8e0-bda9e5de5338) (accessed Dec. 18, 2021).

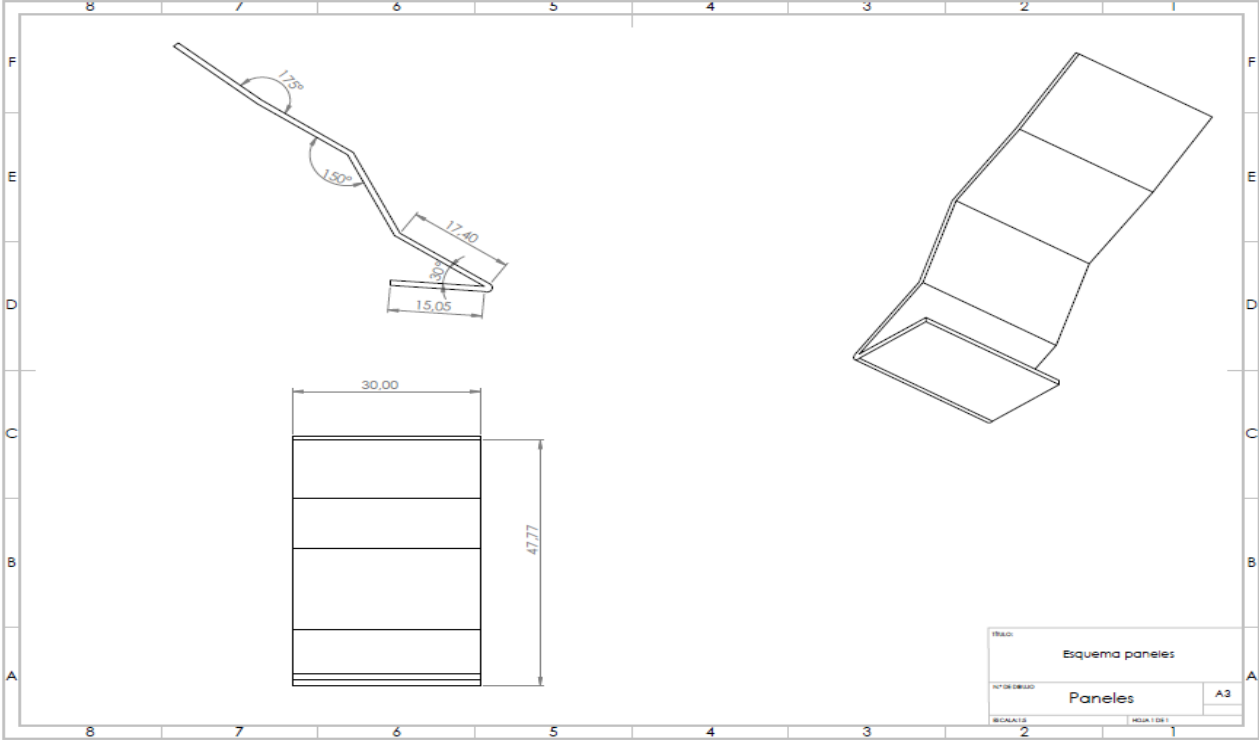
# ANEXOS

## Anexo 1: Planos del sistema en SolidWorks

Planos mochila de campaña:

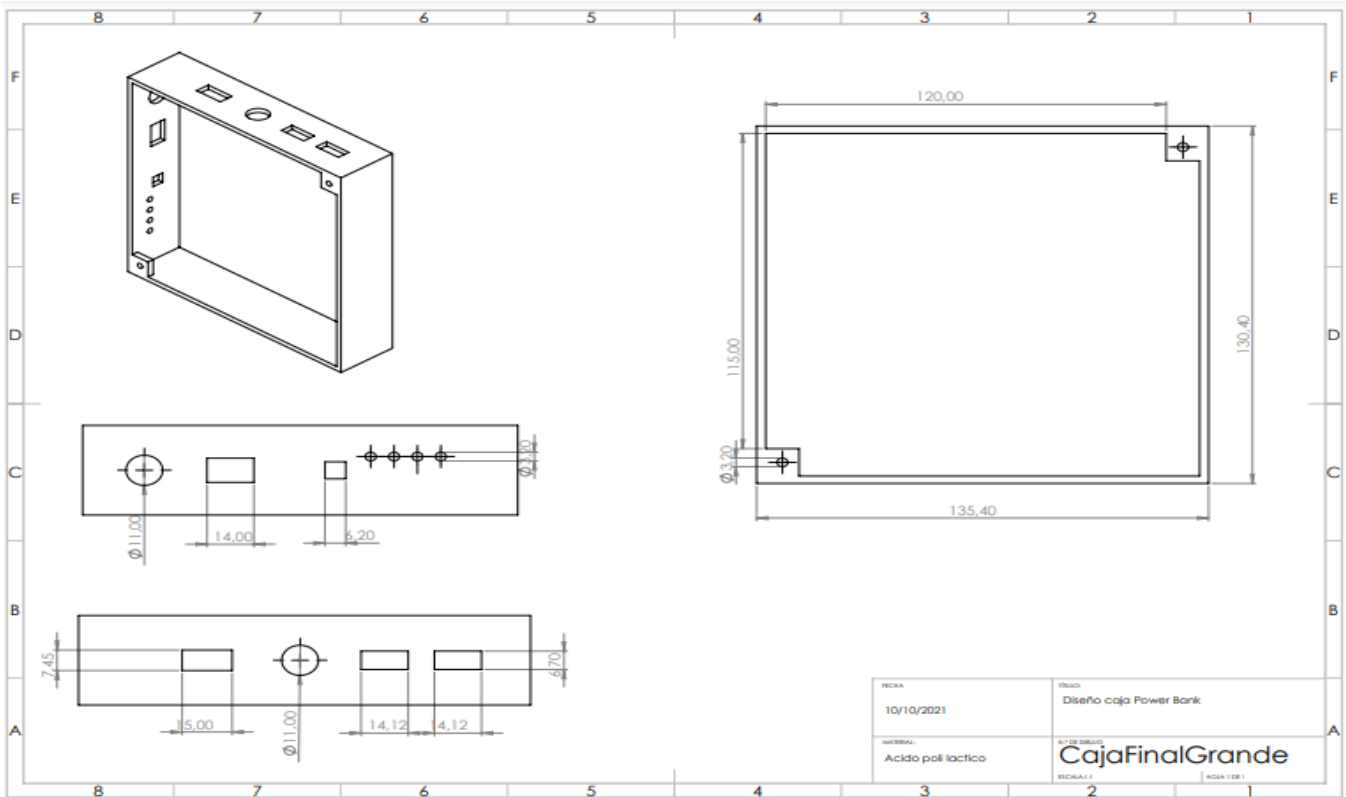


Planos sistema de generación:





Planos estructura Power bank:



Planos estructura Regulador de voltaje:

