

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



Facultad de Ciencias de la Electrónica

Sistema inteligente de administración energética de una casa
habitación energizada por un paquete de baterías en una
localidad aislada de la red eléctrica

Tesis para obtener el título de
Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA:

Remedios Belen Suarez Flores

Director de tesis: Dr. Enrique Quiroga González

Asesor de tesis: M. en I. Erick Javier Jiménez Tenorio

Junio 2023

Resumen

Esta tesis se centra en el desarrollo de un sistema inteligente de administración de energía para una casa habitación aislada de la red eléctrica, contemplando un periodo nocturno en el cual la demanda de energía se abastece con una batería de ión Litio sub-dimensionada. La generación de energía (no contemplada en el proyecto) podría ser un sistema fotovoltaico autónomo, que podría abastecer de electricidad y cargar la batería durante el día.

El primer paso del proyecto es el determinar qué cargas se energizan en una casa habitación para satisfacer necesidades básicas de una familia promedio. Con esto se puede realizar un cálculo de necesidades energéticas Y se puede dimensionar la batería que cubra las necesidades. En particular, para el proyecto se consideró un sub-dimensionamiento de 50%, para hacer necesario el desarrollo de un sistema de administración energética. La batería se ha seleccionado con base a investigaciones exhaustivas de las propiedades de baterías. Se eligió una batería de LiFePO₄ debido a su relativamente bajo costo y a su densidad de potencia.

Partiendo del análisis de los métodos más comunes para calcular el estado de carga de una batería (SOC) y de las curvas características de la batería de LiFePO₄, se ha desarrollado un modelo matemático de determinación del SOC de la batería en el software Origin.

Se ha desarrollado una tabla de verdad que da prioridad de energización de cargas en función del SOC. Con esta tabla se desarrolló un algoritmo.

Como último paso en el desarrollo de la tesis, se realizó un programa con el algoritmo resultante de la tabla de verdad, usando el software Matlab. Éste fue acompañado del diseño de una interfaz de usuario para el sistema de administración energética.

Finalmente, a partir de los resultados y discusiones desarrolladas a lo largo del capítulo cuatro de la tesis, se han plasmado las conclusiones, mostrando los beneficios, alcance y posible mejora del programa de administración energética.

Summary

This thesis focuses on the development of an intelligent energy management system for a house isolated from the electrical network, contemplating a night period in which the energy demand is supplied with an undersized lithium-ion battery. Power generation (not contemplated in the project) could be an autonomous photovoltaic system, which could supply electricity and charge the battery during the day.

The first step of the project is to determine what loads are energized in a house to satisfy the basic needs of an average family. With this, a calculation of energy needs can be made, and the battery can be sized to cover the needs. In particular, for the project an under-dimensioning of 50% was considered, to make it necessary to develop an energy management system. The battery has been selected based on exhaustive investigations of battery properties. A LiFePO₄ battery was chosen due to its relatively low cost and power density.

Based on the analysis of the most common methods to calculate the state of charge of a battery (SOC) and the characteristic curves of the LiFePO₄ battery,

A mathematical model for determining the SOC of the battery has been developed in the Origin software.

A truth table has been developed that gives load energization priority based on the SOC. With this table an algorithm was developed.

As the last step in the development of the thesis, a program was made with the algorithm resulting from the truth table, using the Matlab software. This was accompanied by the design of a user interface for the energy management system.

Finally, based on the results and discussions developed throughout chapter four of the thesis, the conclusions have been drawn, showing the benefits, scope, and possible improvement of the energy management program.

Agradecimientos

A Maria Guadalupe Flores Degante, por darme la vida.

A mi hermano Victor C. Suarez Flores por creer en mí, aún en momentos cuando yo lo deje de hacer.

A mi abuelita que este donde este, nunca me dejara sola.

A mi asesor el Dr. Enrique Quiroga González, por toda su paciencia.

A mi co-asesor el Dr. Erick Jiménez, por la confianza.

A todos mis amigos de cuatro patas que siempre me enseñan algo.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	I
SUMMARY.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 PRODUCCIÓN Y GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO.....	5
2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	8
2.2.1 FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	11
2.2.2 DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO (MES MÁS DESFAVORABLE O PEOR MES).....	14
2.3 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN.....	17
2.3.1 TIPOS DE BATERÍAS.....	19
2.3.2 BATERÍAS DE IÓN LITIO.....	21
2.4 TASA DE DESCARGA DE UNA BATERÍA (C).....	23
2.5 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE UNA BATERÍA.....	25
2.6 CARACTERÍSTICAS DE UNA TABLA DE VERDAD.....	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	32
3.1 ESTIMACIÓN DE CARGAS.....	32
3.2 DIGITALIZACIÓN Y MODELADO DE CURVAS DE SOC DE BATERÍAS.....	34
3.2.1 DIGITALIZACIÓN DE CURVAS DE SOC.....	35
3.2.2 MODELADO DE CURVAS DE SOC UTILIZANDO ORIGIN 2023.....	39
3.3 ELABORACIÓN DE TABLA DE VERDAD PARA ENERGIZACIÓN DE CARGAS.....	43
3.4 DESARROLLO DE ALGORITMO PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA EN MATLAB.....	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	48
4.1 CÁLCULO DE CARGAS.....	48
4.2 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE BATERÍA.....	50
4.3 TABLA DE VERDAD PARA ACTIVACIÓN DE CARGAS.....	62
4.4 SOFTWARE DE ADMINISTRACIÓN ENERGÉTICA.....	67

4.4.1 ALGORITMO DE ADMINISTRACIÓN	67
4.4.2 INTERFAZ DE USUARIO	75
4.4.3 ANÁLISIS DE COMPARATIVA DE RESULTADOS QUE ARROJA EL SOFTWARE.....	78
5. CONCLUSIONES	81
GLOSARIO DE TÉRMINOS	83
ÍNDICE DE FIGURAS.....	86
ÍNDICE DE TABLAS.....	89
REFERENCIAS	91

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

A medida que se desarrolla la sociedad, la demanda energética a nivel mundial es cada vez mayor, pues de ésta dependen, en gran medida, los medios de comunicación, y transporte. En el caso doméstico, para satisfacer esta necesidad energética del día a día, se debe estar conectado a una red eléctrica con capacidad suficiente para toda la población, o se debe contar con generación energética suficiente desconectada de la red.

El sector energético desempeña un papel estratégico en el país, tanto en partes económicas como en sociales, en 1879 ocurrió la primera aparición de energía eléctrica en la República Mexicana en la ciudad de León, Guanajuato. Después de esto se comenzó a extender por todas las regiones, pues es un hecho irrefutable que gran parte del desarrollo humano se debe a su llegada (Enrique de la Garza, 1994).

El arribo de una red eléctrica contribuyó al desarrollo acelerado, a facilitar herramientas para interactuar entre sí como, por ejemplo: dispositivos de comunicación, medios de transporte y máquinas de fabricación. Pese a la gran importancia que recae en este sector, hoy en día más de un 1.5% de la población en la república mexicana no cuentan con energía eléctrica, lo que equivale a más de 352,000 hogares o 1.3 millones de personas aproximadamente, lo que figura en un grave problema, pues repercute sobre el bienestar y oportunidades de desarrollo de éstas, por lo regular esto surge al no tener acceso físico a estos lugares, porque son comunidades con un número reducido de población o porque no se tiene el recurso económico necesario (Nava, 2021).

Al no contar con un servicio básico en una comunidad o vivienda, como lo es la energía eléctrica se cae de forma automática en una situación de pobreza, esto tiene como efecto el rezago educativo, económico, social e incluso problemas de salud (Aguila, 2021).

Para una posible solución a esta problemática en muchos de los casos se hace la elección de generación eléctrica por medio de fuentes renovables, al contar con una tasa elevada de recuperación en relación con su uso y una mínima emisión de gases de efecto invernadero. Entre las variadas opciones, la energía fotovoltaica es un tipo de tecnología que se caracteriza por su autonomía en relación con la conexión a red eléctrica (Aguila, 2021)..

Es común que esta clase de sistemas se conecten a la red eléctrica para que ésta provea el faltante de demanda que no se llega a cubrir; de esta manera siempre se cumple con el objetivo principal, que es el proporcionar energía (Schallenberg, 2013). Por otro lado, los sistemas que comúnmente se utilizan en estos casos son los autónomos, estos en particular cuentan con una parte para el almacenamiento de energía que actúa como soporte. Por ejemplo, paquetes de baterías pueden ser usados para proveer energía durante la noche, cuando los sistemas fotovoltaicos no se encuentre generando y de este modo proveer energía en un periodo nocturno (Cota, 2023).

1.2 Definición del problema

Con los párrafos anteriores queda claro que hoy en día es una tarea de gran importancia el proveer de energía a las comunidades ya sean de difícil acceso, pequeñas poblaciones o en situación donde el recurso económico es limitado, para así poder disminuir la brecha de desigualdad social. Por lo general se opta por una opción que se adapte a las necesidades particulares de cada usuario, pero esto por lo regular no se realiza en su totalidad, pues el recurso económico es un gran factor para delimitar o subdimensionar los elementos del sistema.

Cuando se habla de un sistema fotovoltaico autónomo surge la necesidad de administrar meticulosamente la energía que se tiene y sobre todo si está sub-dimensionada, esto se centra en el soporte que da un paquete de baterías, que por lo regular son de un costo elevado por este motivo el sistema se encuentra diseñado acorde al recurso económico.

Es en este punto donde se plantea la problemática que se aborda en esta tesis, pues al contar con un recurso limitado es fundamental tener un sistema que administre el poco recurso que se tiene, ya que al considerar el alto nivel de dependencia energética con el que se vive en estos días, no cumplir con la demanda energética provoca circunstancias en las que se ven interrumpidas y afectadas las actividades diarias, como los son la comunicación, el entretenimiento, el transporte, y hasta la seguridad.

En cuanto a lo que se refiere al almacenar energía de manera doméstica la mejor opción es el uso de baterías recargables, de las cuales existen gran variedad de tecnologías.

Las baterías más socorridas para uso estacionario de baja capacidad son de plomo-ácido. Sin embargo, considerando un proyecto para más de una decena de años, las baterías de ión litio pueden ser la solución.

La parte central del sistema será un programa desarrollado mediante el software Matlab. De manera adicional, recopilará los hábitos de consumo del usuario y generará opciones de distintas combinaciones para aprovechar al máximo la energía disponible. Con esto, el usuario podrá tomar las decisiones pertinentes de consumo, sin tener que contar con conocimientos especializados de alguna área o necesitar de aparatos adicionales para su manejo.

El sistema de administración no sólo conectará al consumidor con el sistema energético de manera práctica y efectiva, sino que al mismo tiempo proveerá seguridad, rentabilidad y eficiencia al sistema.

1.3 Justificación del proyecto

Después de analizar varias fuentes de información se encontró que existen diversas herramientas que se han desarrollado para una gestión energética en sistemas aislados o autónomos, como lo son sistemas inteligentes de administración energética.

El inconveniente que se identificó fue que, por lo regular un software de administración energética no está al alcance donde el recurso económico es limitado y además están dimensionados para proveer el 100% de demanda que solicita el sistema. Por este motivo en el presente trabajo de tesis se diseñará un sistema inteligente de administración de energía para una casa habitación aislada de la red eléctrica, con la finalidad de solucionar el problema de administrar el recurso que se tiene en la parte de almacenamiento, para así cubrir todas las necesidades básicas en el periodo donde los paneles fotovoltaicos no se encuentran trabajando.

Se contempla un sistema energético sub-dimensionado por razones económicas (de una comunidad marginal), por lo que es de suma importancia el administrar el recurso pues se encuentra limitado.

Este sistema de administración debe contar con una herramienta que auxilie al consumidor en el control y manejo de la energía almacenada, de modo que el consumidor pueda disponer de ésta conforme a la cantidad de energía disponible sin necesidad de conocimientos especializados, por este motivo se desarrolló una interfaz de usuario, amigable para el usuario.

1.4 Objetivos

Objetivo general:

Diseñar un sistema inteligente de administración de energía para una casa habitación aislada de la red eléctrica, contemplando que en el periodo nocturno se deben satisfacer necesidades energéticas por medio un paquete de baterías sub-dimensionado que se carga por medio de un sistema fotovoltaico durante el día.

Objetivos particulares:

1. Analizar los métodos más comunes para calcular el estado de carga de una batería de iónLitio: estimación mediante voltaje, medida directa, densidad relativa, impedancia interna e intensidad, para así implementar uno de manera simple para el sistema a desarrollar.
2. Determinar qué cargas se energizan en una casa habitación para satisfacer necesidades básicas de una familia.
3. Generar un algoritmo que dé prioridades de uso de cargas de acuerdo con combinaciones de encendido de estas y al estado de carga del paquete de baterías, a partir de una tabla de verdad.
4. Desarrollar un programa con el algoritmo resultante de la tabla de verdad, usando el software Matlab, con la finalidad de generar una interfaz de usuario para el sistema de administración energética.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Producción y generación de energías renovables en México

Como se estableció con anterioridad la demanda energética va en aumento y la proyección a futuro incrementa día a día, por este motivo es de importancia el tomar alternativas para satisfacer esta demanda, como por ejemplo las energías renovables. De este modo es fundamental el conocer la producción y generación con la que se cuenta en la república mexicana. A continuación, se citan algunos de los avances que se encuentran en el área.

La figura 1 muestra una tabla del consumo en los años 2019 y 2020, cada año tiene una fila perteneciente al SIN (Sistema Interconectado Nacional) y al SEN (Sistema Energético Nacional), en cuanto a las columnas: GWh representa el consumo bruto diario y INC el incremento.

En el PRODESEN (Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional) se menciona que el consumo bruto de energía en México en el año 2020 fue de aproximadamente 315,968 GWh según cifras otorgadas por el SEN, en la figura 1 se observa que la zona occidental (OCC) tiene el mayor consumo con 68,154 GWh, mientras que la peninsular consume 12,492 GWh situándose en último lugar (SENER, 2021).

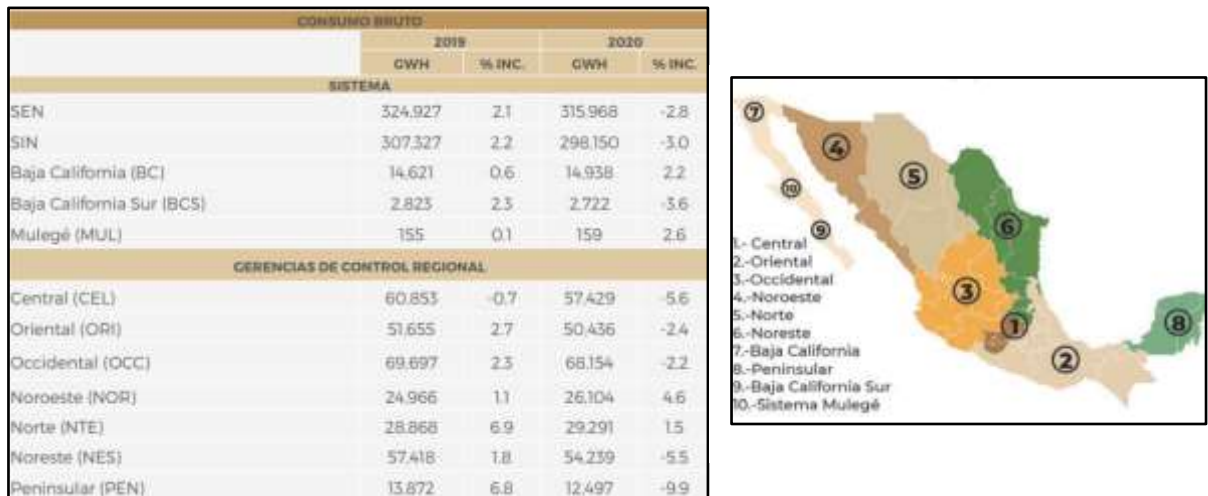


Figura 1 consumo bruto a nivel nacional, dividido en diez zonas, en la parte derecha se observa el mapa donde se encuentran los estados que conforman cada zona, (SENER, 2021).

Para el año 2020, la capacidad instalada de energías limpias fue de 25,594 MW, en la figura 2 se puede ver la aportación de cada una, quedando el ciclo combinando con mayor capacidad instalada, alrededor de 9,828 MW y con la menor aportación la bioenergía con 127.97 MW.

La energía producida de igual manera se puede apreciar en la figura 2, donde en 2020 la producción de energía limpia fue de 80,088 GWh es decir el 25.64% del total del consumo bruto de energía, como se puede apreciar el ciclo combinado representa un 59.4 %, es decir un 47,572.27 GWh y la combustión interna un 720.792 GWh (SENER, 2021).

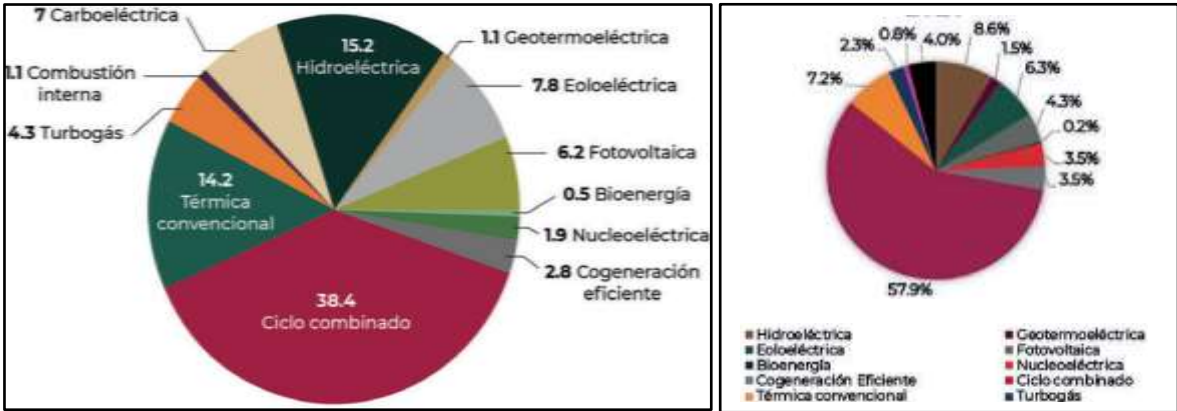


Figura 2 Grafico de capacidad instalada en parte izquierda, donde se aprecian los respectivos porcentajes de aportación, en la parte derecha, se encuentra la generación, de igual manera el porcentaje de aportación (SENER, 2021).

En el SEN el 99.4% de Generación Distribuida (GD) al cierre de 2020 es por sistemas fotovoltaicos, de los cuales se tiene registro de una capacidad instalada acumulada del orden de 1,388 MW, en 2020 fue instalada una capacidad de 365 MW que se estima tuvieron una generación de 334 GWh, un incremento de 9.12% con respecto a lo instalado en 2019 (SENER, 2021).

En la figura 3 se puede observar como la capacidad instalada acumulada de energía fotovoltaica ha crecido a pasos agigantados, es claro que esta tecnología representa un papel muy importante en el país.

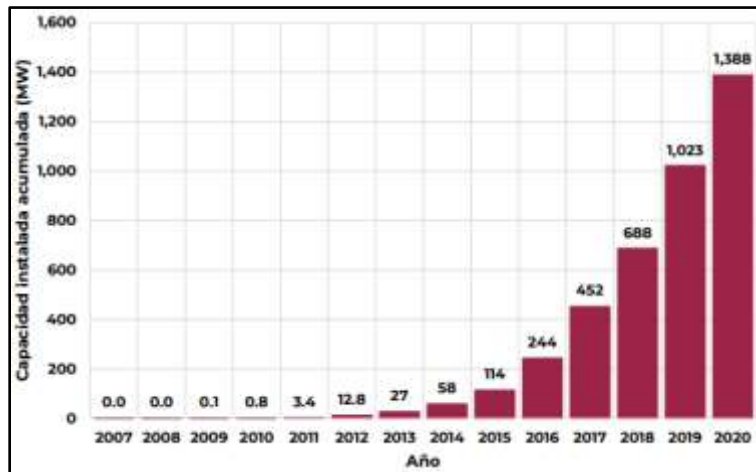


Figura 3 Capacidad instalada acumulada de energía fotovoltaica

En cuanto a la aplicación en sistemas residenciales, las cifras son bastante satisfactorias, según cifras del ENCEVI 2018 (Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares), un 0.25 del total de viviendas en México utilizan un panel solar para abastecimiento de energía eléctrica esto equivale a 87,622 hogares del total de estos 48,025 se apoyan de la red pública y 39.597 son de carácter autónomo (INEGI S. , 2019).

Del 100% de paneles instalados el 70% están instalados en hogares 20% en comercios, 9 % en industrias y el 1% en otros sectores del mercado, esto indica que la aplicación residencial tiene el mayor número de paneles (SOLARAMA, 2019).

Pese a la situación económica esta tecnología va en aumento, pues presenta un crecimiento de más de dos dígitos en los últimos cinco años (Cervantes, 2021)

Como se puede apreciar de los anteriores párrafos la producción con energías renovables va en aumento, el área de energía fotovoltaica cada vez tiene mayor producción y la aplicación en zonas residenciales goza de tal grado de aceptación que cada vez más hogares buscan implementar sistemas de este tipo, además que se sitúa como una posible solución para llevar energía eléctrica a lugares de difícil acceso, pues su versatilidad le permite acceder a situaciones donde no se cuenta con red eléctrica.

2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una de las energías renovables con más presencia en todo el mundo, debido a que su gestión, instalación y uso es más accesibles tanto para uso doméstico como para uso industrial. Su origen se deriva del sol por la reacción de fusión nuclear que ocurre como resultado de reacciones químicas, la energía solar llega a la tierra en forma de radiación electromagnética mediante luz, calor y rayos ultravioleta (BBVA, 2022).

Su uso se puede dividir en dos categorías, la primera como fuente de calor para sistemas solares térmicos, en este caso la radiación solar se convierte en energía térmica para calentar un fluido, la segunda como fuente de electricidad, es decir, sistemas fotovoltaicos (Cesar Leonardo González Pinzón, 2013).

Por ser la fuente de energía encargada de proporciona el recurso que se va a administrar en el presente trabajo se profundiza en la segunda categoría, sistemas fotovoltaicos.

A partir del efecto fotovoltaico se obtiene de manera directa electricidad al convertir los fotones provenientes de la luz del sol. Fue el físico francés Edmond Becquerel quien lo descubrió en 1839, al percatarse de que una celda de electrodos metálicos producía más electricidad a través de una solución conductora cuando quedaba expuesta a la luz, en 1883, el científico norteamericano Charles Fritts creó la primera célula fotoeléctrica utilizando el selenio como material semiconductor (factorenergía, 2018).

Un sistema energético es un conjunto de unidades procesadoras, canales, motores, calderas, torres de destilación, turbogeneradores, subestaciones, líneas de transmisión y distribución, tanques, cisternas, compresores y muchos otros más, trabajando en conjunto para llevar una forma de energía hasta un usuario, partiendo de este concepto en los siguientes párrafos se identifican los elementos que componen los sistemas energéticos fotovoltaicos, así como los tipos más comunes (Julieta C. Schallenberg Rodríguez, 2008).

Estos se pueden clasificar según la manera en que se conectan o no a la red eléctrica, por lo general son de tres tipos: sistemas conectados al a red eléctrica, sistemas autónomos o de isla y sistemas híbridos (Solutions, 2016).

Los sistemas interconectados a la red eléctrica son los más económicos, forzosamente deben estar conectados a la red eléctrica nacional. Estos sistemas requieren muy bajo mantenimiento. En la mayoría de los casos, el mantenimiento requerido se limita a la limpieza de los paneles solares para eliminar la suciedad y el polvo. Un sistema típico de este tipo está compuesto de los paneles solares, que proporcionan energía eléctrica en corriente continua (CC), esta energía pasa por el inversor de corriente para transformarla en energía de corriente alterna (CA) que funciona en paralelo con la red eléctrica, otros elementos son la estructura de montaje (soportes para los paneles), cable especial para sistemas fotovoltaicos, conectores y accesorios de conexionado. Estos sistemas tienen una vida útil de por lo menos 22 años (Ensys, 2019).

Un SFA se define como: una red eléctrica hecha para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los periodos en los que la generación es inferior al consumo, por lo regular se pueden emplear en lugares con un acceso complicado, como por ejemplo; zonas rurales aisladas, carreteras y poblados aislados, su tiempo de vida útil oscila entre los 18 y 22 años (Lamigueiro, 2020). Suelen estar conformados por los siguientes elementos:

- Panel fotovoltaico: elemento que genera la electricidad a partir de energía lumínica proveniente del sol.
- Banco de baterías: conformados por acumuladores electroquímicos, capaces de almacenar energía eléctrica mediante una transformación electroquímica. Estas almacenan la electricidad generada, para su utilización posterior en momentos en que no se encuentren trabajando los paneles.
- Regulador de carga: dispositivo electrónico cuyo objetivo es controlar el proceso de carga y descarga de las baterías, evitando sobrecargas y descargas profundas, alargando así la vida útil de las baterías.
- Inversor: transforman la corriente continua (CC), en alterna (CA) utilizada de forma habitual en los hogares.

En la figura 4 se encuentran de manera visual los elementos que componen un SFA, se puede ver como todos trabajan en conjunto para cumplir un objetivo en particular, proporcionar energía al hogar que la demanda.

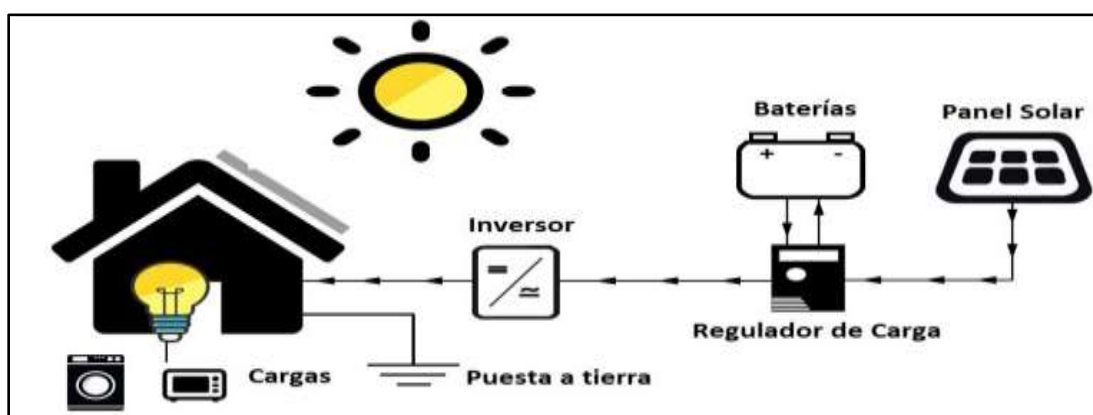


Figura 4 Esquema de un SFA (engi, s.f.)

El tercer tipo de sistema es una combinación de los dos anteriores, de ahí su nombre. Se trata de sistemas interconectados a la red que cuentan además con un sistema de respaldo de energía con el fin de garantizar el suministro continuo del fluido eléctrico aún en caso de falla de la red, este puede ser de diésel, geotérmico etc. Estos sistemas, al ser más complejos, son los más costosos y el usarlo en una aplicación en particular depende de otras variables diferentes a las puramente económicas. Por este motivo su tiempo de vida depende de cada sistema en particular (Lamigueiro, 2020).

2.2.1 Funcionamiento y características de una célula fotovoltaica

La célula solar funciona gracias a la unión tipo P-N de los semiconductores que permite extraer los electrones excitados, antes de que vuelvan a su estado de equilibrio térmico, hacia un circuito exterior para que realicen un trabajo. Una célula solar se comporta como un “diodo”, es decir que tiene una parte N, expuesta a la radiación solar y una P, situada en la zona de oscuridad, las terminales de conexión se encuentran sobre cada una de estas zonas, la cara correspondiente P se encuentra metalizada por completo, es decir no recibe luz, mientras que en la N el metalizado está diseñado de tal forma que los fotones contenidos en la radiación solar lleguen al semiconductor, para que de este modo libere electrones que pueden generar una corriente eléctrica, en otras palabras el efecto fotovoltaico (Karen Rodríguez Rosales, 2020).

En la figura 5 se muestra de manera visual un ejemplo de los componentes de una célula fotovoltaica, donde se ve como está diseñada la zona N para que los fotones lleguen al semiconductor, además del encapsulado en el que se encuentran para una protección a inclemencias. La medida estándar de la unión P-N ronda en el orden de μm .

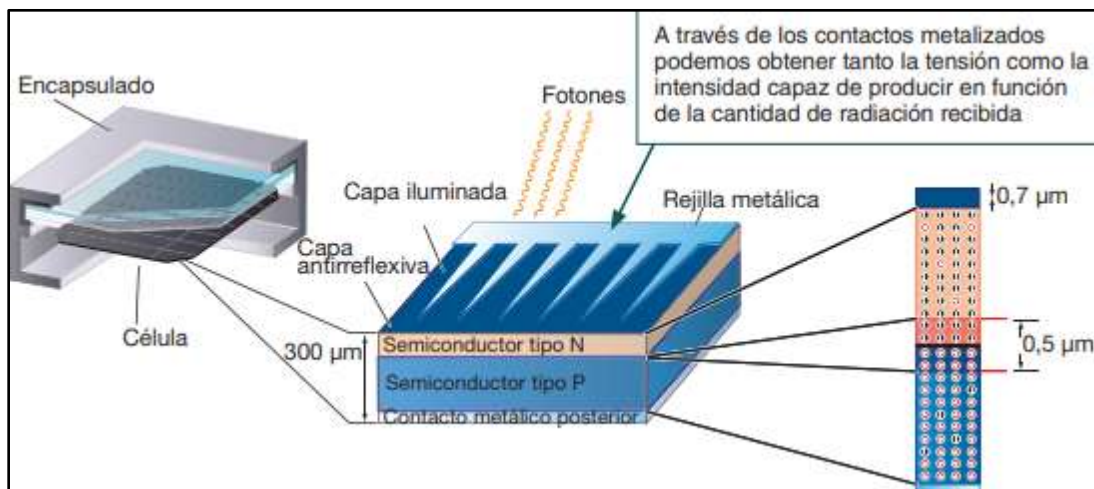


Figura 5 Estructura de una célula fotovoltaica (Karen Rodríguez Rosales, 2020)

Ahora que ya se conoce el funcionamiento de una célula fotovoltaica es importante mencionar sus parámetros fundamentales:

Corriente de iluminación (I_c): la corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula (Abella, 2020).

Corriente de oscuridad: es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del semiconductor (BBVA, 2022).

Tensión de circuito abierto (V_{oc}): la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula (Cesar Leonardo González Pinzón, 2013).

Corriente de cortocircuito (I_{sc}): máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados (Navarra, 2019).

Cuando la célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea máxima (Ec. 1): V_m (tensión máxima) e I_m (intensidad máxima), que siempre serán menores que V_{oc} e I_{sc} . En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la célula solar será (fotovoltaica, 2021):

$$P_m = V_m \cdot I_m \tag{Ec. 1}$$

El factor de forma (Ec. 2) es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. En las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 o 0,8 (Ferichola, 2022).

$$FF = V_m \cdot I_m / V_{oc} \cdot I_{sc} \tag{Ec. 3}$$

La figura 6 muestra las curvas características de una célula fotovoltaica, la primera a la que se hace referencia es la de corriente contra voltaje I-V, gracias a ella se puede identificar distintos valores de voltaje y corriente.

En este caso se representa en color azul, al trazar una línea horizontal (en color verde) desde el punto de corte hasta el eje “y”, se obtiene el valor de I_m , 7,5 A aproximadamente, si se traza una línea vertical desde el punto de máxima potencia, donde corte a la gráfica azul, bajando hasta el eje “x”, se obtiene el valor de V_m 30 V.

La otra curva importante es la encargada de representar la potencia en color rojo, se obtiene multiplicando los valores de tensión e intensidad dados por la gráfica I-V. Los valores de esta gráfica se leen en el eje de la derecha, que se mide en vatios (W). Así, si se traza una línea desde el pico de la gráfica hasta el eje “x”, se obtiene un valor aproximado de 240 W.

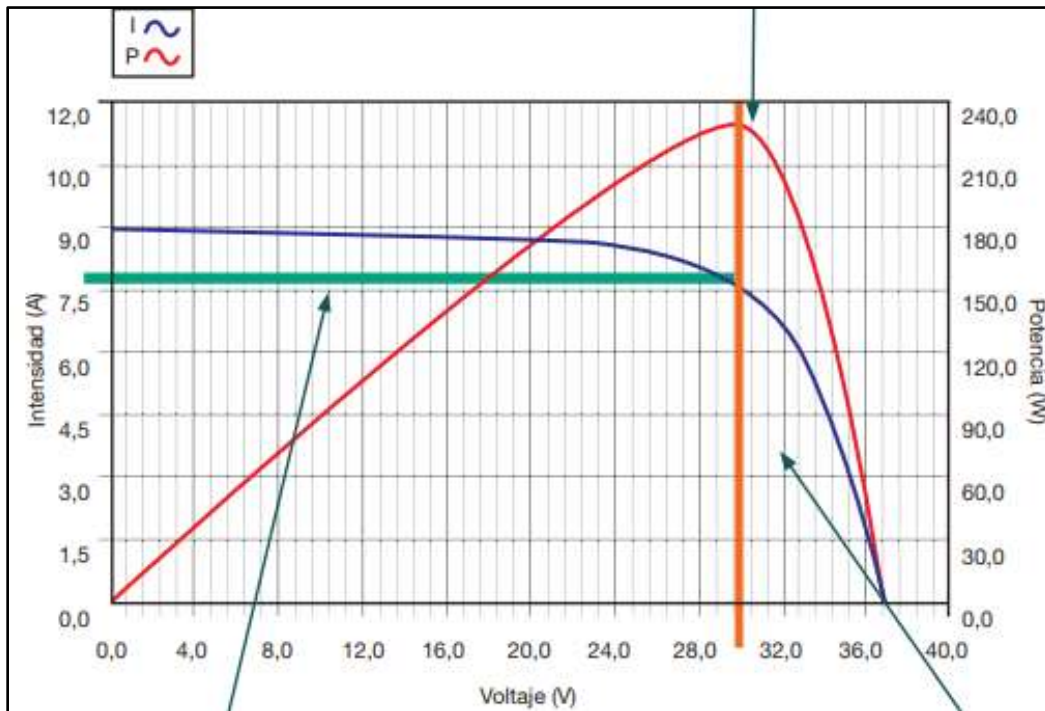


Figura 6 Curva característica de una célula fotovoltaica (Ferichola, 2022)

Ambas curvas son de gran utilidad para identificar el comportamiento de la célula fotovoltaica con relación a sus tres parámetros fundamentales (Terrón, 2018).

2.2.2 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo (mes más desfavorable o peor mes)

Para poder delimitar el proyecto de administración energética de una casa habitación, es necesario conocer cuál y cómo realizar el dimensionamiento del sistema que se va a utilizar como caso de estudio. En este proyecto se utilizará un SFA por cuestiones que anteriormente se mencionaron, como lo son su utilización en localidades aisladas, alto grado de adaptabilidad en aplicaciones domésticas y además la tecnología de almacenamiento para este tipo de aplicación tiene un amplio campo de investigación (Marriele Mango, 2020).

Por dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo se entiende un concepto muy amplio que abarcaría a todas las tareas y especificaciones que se han de realizar y tener en cuenta para que este funcione satisfactoriamente, con la mayor fiabilidad y al menor coste posible. La tarea fundamental del dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo consistirá principalmente en la determinación del tamaño óptimo tanto del generador fotovoltaico como de la batería o conjunto de baterías que forman el sistema. Puesto que estos dos elementos son los más importantes del sistema fotovoltaico autónomo se deberá prestar especial atención a su dimensionado (Jorge Aguilera, 2018).

Existen gran variedad de métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Esta diversidad abarca desde métodos muy complicados y, que necesitan de un programa informático para ejecutarse hasta métodos mucho más simples, que probablemente con una calculadora de mano se permite realizar el dimensionado. Entre estos se encuentra el método del mes más desfavorable o peor mes, consiste en evaluar las condiciones de producción del sistema FV en el mes donde el consumo de energía es mayor y la irradiación solar es menor, es decir, cuando hay peor producción de energía con relación a los otros meses del año. Se opto por elegir este método pues revisando literatura es eficaz y sencillo además de adaptarse de mejor manera a las características del proyecto, pues en este caso en lo que se tiene mayor interés es en el banco de almacenamiento de energía, con el propósito de partir de esta información para desarrollar un sistema de administración energética, contando con un recurso limitado (Espitia, 2019)

Como primer paso para dimensionar un SFA se encuentra la estimación del consumo de las cargas. Esto se puede elaborar en una hoja de cálculo. Aquí se hace una estimación del consumo de las cargas que se introduzcan en el SFA, es decir, todo lo relacionado con los diferentes aparatos eléctricos que serán la carga del sistema. En primer lugar, se debe calcular la energía que el usuario utiliza diariamente tanto en corriente alterna CA, como en corriente directa CD, para ello se deberá determinar la potencia individualmente de todos los aparatos de que constará la instalación, esto junto con el tiempo medio de uso de cada uno de ellos, en la Ec. 3 se muestra como calcular la energía consumida en CA, y CD en Ec. 4, mientras que en t_d representa el consumo total diario.

$$E_{AC} = \sum P_{(AC)i} t_{di}$$

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{BAT}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{BAT} \eta_{INV}}$$

$P_{(AC)i}$ = Potencia nominal del equipo i en W
 t_{di} = tiempo diario de uso en horas (h)
 η_{BAT}, η_{INV} = Eficiencia de la batería, y del inversor

Ec. 3

$$E_{DC} = \sum P_{(DC)i} t_{di}$$

$P_{(DC)i}$ = Potencia nominal del equipo i en W
 t_{di} = tiempo diario de uso en horas (h)

Ec. 4

t_{di} = tiempo diario de uso en horas (h)

En caso de duda, tanto la potencia como el tiempo medio de uso se debe redondear hacia arriba. Posteriormente se podrán calcular diferentes consumos, como podrían ser consumos anuales, medios anuales, etc (Jorge Aguilera, 2018).

Al tener la estimación del total de energía consumida, el siguiente paso es la determinación del promedio de irradiación diaria disponible en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos para cada mes, esto se puede obtener de diversas fuentes como Google earth, una vez que se tiene esta base de datos, se toma el valor del mes más desfavorable.

Después de esto, se toma la elección del tipo de panel fotovoltaico, y, en especial la potencia pico del panel P_{mod} , expresada en W_p , (watts pico), en la Ec. 5 se encuentra la ecuación para calcular el número total de paneles, y la Ec. 6 para conocer cuáles de estos toman un arreglo en serie o en paralelo (Library, 2022).

$$N_T = E_T / [HPS \cdot P_p \cdot P_G]$$

$HPS = G_d(\beta)$ = irradiación global en plano inclinado β
 P_p = Potencia pico del panel
 P_G = Factor global de pérdidas (usualmente entre 0.65 y 0.9)

Ec. 5

$$N_S = V_{BAT} / V_p$$

V_{BAT} = tensión nominal de la batería
 V_p = tensión nominal del panel

Ec. 6

$$N_P = N_T / N_S$$

Ec. 7

Por último, se dimensiona el sistema de almacenamiento, pues como ya se mencionó es uno de los elementos más importantes al aporta energía al usuario cuando los paneles no se encuentran en funcionamiento. Para el cálculo de las baterías se debe considerar la mínima energía que debe proporcionar la batería a las cargas ΔE (Wh) según especificaciones de la instalación y los días de autonomía (D) es decir número de días consecutivos que en ausencia de sol. En la Ec. 8 se observa la fórmula para encontrar el valor de la capacidad del sistema de acumulación (Cavasassi, 2020).

$$C_n (Ah) = \frac{\Delta E}{V_{bat} P_d}$$

Ec. 8

Al contar con los cálculos de los anteriores párrafos se ha concluido con el dimensionamiento de un SFA, es muy importante mencionar que, para este trabajo no se desarrolló todo el procedimiento, solo se utilizó la etapa de dimensionamiento de cargas, debido que el trabajose se centra en la administración de energía que se encuentra almacenada en una batería y no en el desarrollo del dimensionamiento de un SFA.

Esta información servirá en futuros apartados para calcular las cargas del sistema y así poder conocer el valor de la demanda energética.

2.3 Almacenamiento de energía en baterías de primera y segunda generación

Como parte fundamental en el presente proyecto se encuentra la administración energética de un sistema que está almacenada en una batería, por esta razón es necesario tener conocimiento de los tipos de tecnologías y sus principales características. Por este motivo los siguientes párrafos se destinan a tal propósito.

En 1800, el físico italiano Alejandro Volta construyó la primera celda electroquímica simple, la cual consistía en varillas de cobre y zinc sumergidas en una salmuera. Este elemento constituyó la primera “batería” de la historia. Desde ese momento la batería se ha convertido en un elemento fundamental del mundo, estando presente desde los relojes en las casas, pasando por los notebooks, hasta grandes bancos de baterías utilizados en micro-redes y vehículos eléctricos, este es un elemento que hoy en día nos acompaña prácticamente a todas partes (Mellano, 2013).

Una batería (figura 7) es un dispositivo que está constituido por una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad. La mayoría de las baterías comparten un principio de funcionamiento: proceso químico reversible llamado reducción – oxidación (también denominado redox) (Parejo, 2021).

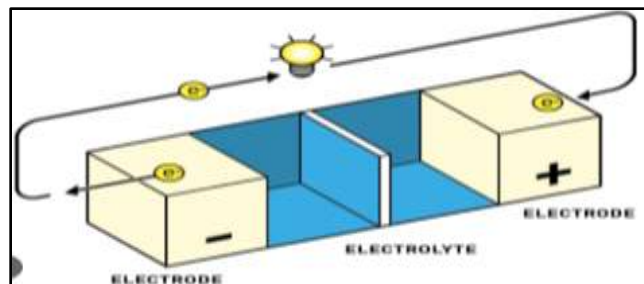


Figura 7 Esquema básico del funcionamiento de una batería (Parejo, 2021)

Dicho proceso consiste en que uno de los componentes se oxida (es decir, pierde electrones) y el otro componente se reduce (es decir, gana electrones) (Bertran, 2017).

Es mediante esta pérdida y ganancia de electrones de los elementos que forman la batería que se genera la diferencia de potencial en sus bornes y así, al conectar un circuito a ellos, se produce el paso de corriente (Bertran, 2017). Una clasificación de baterías puede ser por su naturaleza reversible o no en el proceso de carga y descarga, las baterías primarias, cuya carga no puede renovarse cuando se agota y las baterías secundarias, que sí se pueden recargar sometiéndolas al paso de una corriente eléctrica en el sentido inverso al sentido en el que la corriente de la pila fluye normalmente (Bertran, 2017).

En las baterías recargables las reacciones de oxidación (ceder electrones) y reducción (captar electrones) son reversibles, pueden fluir en ambas direcciones. En la figura 8 se muestra el proceso de funcionamiento, cuando la batería está cargada, todo el litio está en el ánodo. Durante la descarga los iones fluyen a través del electrolito desde el ánodo de hacia al cátodo. Los electrones también fluyen desde el ánodo al cátodo, pero lo hacen a través del circuito exterior, alimentando la carga a la que se encuentra conectada (Bello, 2020).

Como los iones de litio en el ánodo están a un potencial electroquímico más alto que en el cátodo, caen desde el potencial del ánodo al potencial del cátodo. Esa es la razón por la que la batería aporta energía al aparato al que esté conectada (Bello, 2020).

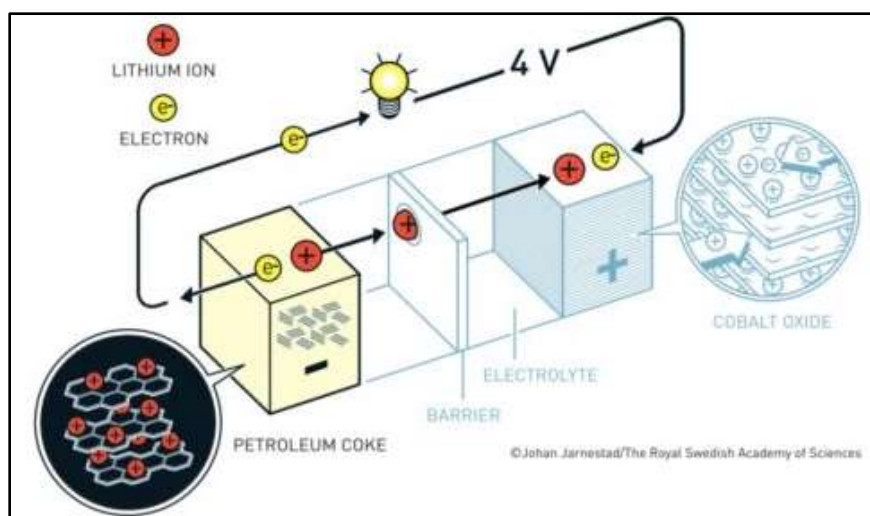


Figura 8 Esquema de funcionamiento de una batería recargable, extraído de <https://culturacientifica.com/2020/02/20/si-funcionan-las-baterias-de-litio/>

La carga de la batería se realiza conectando la batería a una fuente de energía externa como la red eléctrica. Los electrones de la red eléctrica entran en el ánodo a través del circuito externo. Esto provoca que los iones de litio abandonen el cátodo y regresen al ánodo a través del electrolito. Tanto los electrones como los iones litio se quedan acomodados en el ánodo entre las diferentes capas de coque. Cuando no fluyen más indica que la batería está completamente cargada. La batería almacena energía en este proceso porque el potencial electroquímico del ánodo es más elevado que el del cátodo. Esto quiere decir que los iones de litio han tenido que subir desde el potencial del cátodo hasta el potencial del ánodo (Scheingart, 2021).

2.3.1 Tipos de baterías

Níquel-cadmio (NiCd): Actualmente está limitada su comercialización por el uso de metales peligrosos (cadmio), por su toxicidad para el medio ambiente. Se emplea en aplicaciones donde se requiere una alta capacidad de descarga, una larga vida y bajo coste, se puede observar sus características en la tabla 1 (Llerandi, 2021).

Tabla 1 Características de acumulador níquel-cadmio (Llerandi, 2021)

Sustancia del activa del polo positivo	Cd
Sustancia activa del polo negativo	NiO(OH)
Electrolito	K(OH) disuelto disuelto en agua
Rango nominal de tensión bajo carga [V]	1.0 – 1.3
Densidad energética [Wh/kg]	30~60
Ciclo de vida	~2000

Níquel metal hidruro (MIMH): Tiene mayor densidad de energía en comparación con las Ni-Cd pero, admite menor ciclos de recarga. Entre sus aplicaciones de encuentran las de gran potencia se puede observar sus características en la tabla 2 (Llerandi, 2021).

Tabla 2 Características de acumulador níquel metal hidruro (Llerandi, 2021)

Sustancia del activa del polo positivo	NiO(OH)
Sustancia activa del polo negativo	aleación de hidruro metálico
Electrolito	K(OH) disuelto disuelto en agua
Rango nominal de tensión bajo carga [V]	1.0 – 1.3
Densidad energética [Wh/kg]	50~70
Ciclo de vida	>800

Plomo ácido: Desde su invención a la fecha, este acumulador aún sigue vigente, y es todavía el más fabricado en el mundo. Ha dominado durante muchos años el mercado, y se sigue utilizando en aplicaciones vehiculares, sistemas en los cuales es necesario contar con energía de respaldo. Una de las principales ventajas de esta tecnología es que existe gran disponibilidad, presenta un bajo costo, y un bajo nivel de auto descarga, además de ser de fácil fabricación. Mientras que las principales desventajas radican en su baja densidad energética, la necesidad de mantenimiento, y en los materiales que la componen, los cuales son altamente contaminantes, se puede observar sus características en la tabla 3 (Vidal, 2016).

Tabla 3 Características de acumulador plomo ácido (Vidal, 2016).

Sustancia del activa del polo positivo	Pb
Sustancia activa del polo negativo	PbO ₂
Electrólito	H ₂ SO ₄ disuelto en agua
Rango nominal de tensión bajo carga [V]	1.75 – 2.25
Densidad energética [Wh/kg]	30~50
Ciclo de vida	400~600

Alcalina recargable: Este tipo de baterías es conocido por la sigla RAM (Rechargeable Alkaline-Manganese Cell), y se caracteriza por tener una densidad energética inicial mayor que los baterías de níquel cadmio y níquel metal hidruro, sin embargo, se encuentra que dicha capacidad disminuye bastante con los ciclos de vida, se puede observar sus características en la tabla 4 (Mellano, 2013).

Tabla 4 Características de acumulador alcalina recargable (Mellano, 2013)

Sustancia del activa del polo positivo	MnO ₂
Sustancia activa del polo negativo	Zn
Rango nominal de tensión bajo carga [V]	0.9 – 1.4
Densidad energética [Wh/kg]	80 (inicial)
Ciclo de vida útiles	25 (depende del nivel de descarga)

En el siguiente apartado se continúa con las tecnologías de baterías, al ser una batería de iónLitio la que se pretende utilizar para el proyecto, se optó por profundizar en este tema, con el propósito de tener bases más sólidas para el desarrollo de futuras etapas del presente proyecto.

2.3.2 Baterías de iónLitio

El propósito de profundizar en este tipo de tecnología es que la batería seleccionada se encuentra en esta clasificación. Entre las tecnologías que se han ido desarrollando se destacan las siguientes variantes que ya están establecidas (Fernández, 2015) .

El litio es el metal con el menor potencial de reducción (-3,05 V). Esto significa que es el elemento químico que más tendencia tiene a regalar electrones. Cuando regala su electrón más externo, el litio se queda cargado positivamente. Lo representamos como Li^+ y lo llamamos ion litio. De ahí que las baterías de litio también se llamen baterías de ion-litio.

La tecnología de óxido de manganeso y Litio (LMO), níquel, cobalto y manganeso (NMC) Estas dos químicas basadas en iones de litio usan manganeso. Ambas con un voltaje nominal de 3.7-3.8 V. El LMO es adecuado para aplicaciones de potencia a corto plazo mientras que el NMC proporciona un mayor rendimiento general y un buen comportamiento específico de la energía. También existe una mezcla de las dos (LMO/NMC), lo cual optimiza las ventajas de ambos tipos. El LMO/NMC es la opción más común en los vehículos eléctricos de la actualidad (litio B. i.-m., 2021).

En la tabla 5 se puede encontrar una recopilación de otras tecnologías de baterías de litio, ahí se encuentra su química y las aplicaciones más comunes en donde se utilizan.

Tabla 5 Características de acumulador litio-ión (litio B. i.-m., 2021).

QUÍMICA	ÓXIDO DE COBALTO Y LITIO	ÓXIDO DE MANGANESO Y LITIO	LITIO, NÍQUEL Y MANGANESO	FOSFATO DE HIERRO Y LITIO	ÓXIDO DE ALUMINIO, COBALTO, NÍQUEL Y LITIO	TITANATO DE LITIO
Forma corta	Li-cobalto	Li-manganeso	NMC	Li-fosfato	Li-aluminio	Li-titanato
Abreviatura	LiCoC_2 (LCO)	LiMn_2O_4 (LMO)	LiNiMnCoO_2 (NMC)	LiFePO_4 (LFP)	LiNiCoAlO_2 (NCA)	Li_2TiO_3 (LTO)
Observaciones	Alta energía, potencia limitada. Cuota de mercado estabilizada.	Alta potencia, menor capacidad; más segura que Li-cobalto; a veces mezclada con NMC para mejorar el rendimiento.	Alta capacidad y alta potencia. Común en dispositivos destinados a los consumidores. También NCM, CMN, MNC, MCN.	Baja tensión de descarga, alta potencia, baja capacidad, muy segura; autodescarga elevada.	La mayor capacidad con potencia moderada. Similar al Li-cobalto.	Larga duración, carga rápida, rango amplio de temperatura y segura. Baja capacidad; costosa

De entre todos los tipos de baterías se seleccionó emplear una batería de fosfato de hierro y litio, esto por sus características que se mencionan a continuación. La tecnología de fosfato de hierro y litio (LFP), aprovecha el fosfato de hierro. Es una batería de ion-litio con un cátodo de fosfato de hierro-litio que utiliza FePO_4 . La batería LFP (Lithium Ferrum Phosphate, litio-ferrofosfato o LiFePO_4) es una variante de la batería de litio convencional donde este material se sustituye en su mayoría por láminas de fosfatos de hierro. Estas láminas se concentran en el polo positivo o cátodo (Motorpasion, 2019).

Un conjunto de cristales de carbono forma el polo negativo o ánodo, entre los cuales se encuentran pequeñas partículas de litio. Al estar sumergidas en un líquido electrolito, estas partículas obtienen carga eléctrica, abandonando los cristales de carbono y desplazándose al cátodo. En este proceso se genera la corriente eléctrica, que se agota cuando todo el litio se aloja descargado en el cátodo (en este caso, entre las láminas de ferrofosfato) cuando eso ocurre, es posible introducir electricidad desde el exterior para recargar la batería y que las partículas vuelvan a su sitio en el ánodo (litio B. d., 2018).

La figura 9 ilustra el proceso de carga o descarga del fosfato de hierro litio (LFP) electrodo. Como se eliminan los iones de litio durante el proceso de carga, se forma un fosfato de litio-hierro agotado (FP) de zona, pero en medio existe la zona de disolución sólida (en azul oscuro-verde) que contiene algunos átomos de litio distribuidos aleatoriamente, a diferencia de la disposición ordenada de átomos de litio en el material cristalino original (azul claro), este proceso

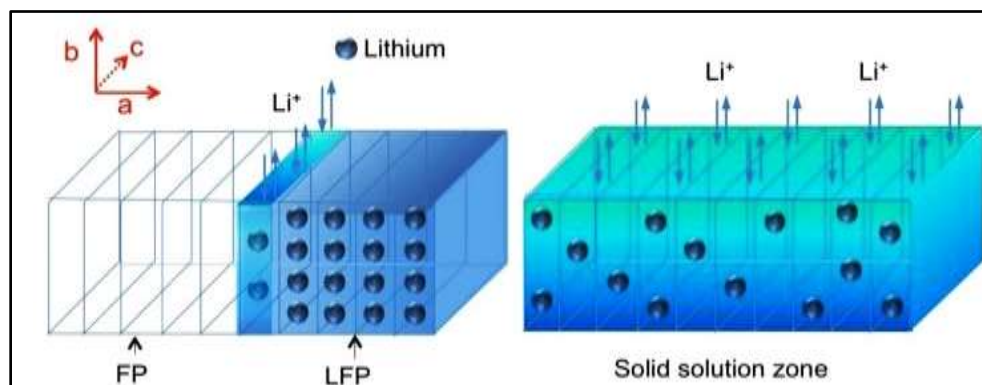


Figura 9 Esquema proceso de carga o descarga del fosfato de hierro litio extraído de <https://www.bateriasdelitio.net/?p=104>

Esta química tiende a proporcionar una excelente seguridad, una larga duración, una mayor autodescarga y buena capacidad a temperaturas más altas. Su voltaje nominal oscila entre los 3.2-3.3 V. Es considerada como la mejor química para aplicaciones seguras, de alta potencia y de descargas cortas. La función de carga rápida de las baterías LFP puede ser un beneficio evidente para las instalaciones que experimentan cortes de energía con más frecuencia en comparación con las baterías VRLA de carga más lenta (Rodríguez, 2017).

Como ya se mencionó en los anteriores párrafos esta batería tiene características que se adaptan a los requerimientos necesarios del caso de estudio propuesto en el presente proyecto como por ejemplo, una excelente seguridad, un factor fundamental para aplicaciones domésticas, al contemplar un sistema con un recurso económico limitado es esencial tomar una tecnología que no sea necesaria remplazar en el tiempo de vida del SFA, por esto su larga duración refuerza esta decisión, por último, una buena capacidad a temperatura elevadas es la razón que consolida a esta batería, ya que las temperaturas donde se instalan por lo regular sobrepasan los 25°C.

2.4 Tasa de descarga de una batería (C)

La capacidad de la batería se expresa en amperios hora (Ah) e indica la cantidad de corriente que una batería puede proporcionar a lo largo del tiempo, es aquí donde surge el concepto de velocidad de descarga por lo regular esta capacidad se abrevia solo utilizando la letra C. Por ejemplo, si una batería de 100 Ah se descarga con una corriente constante de 5 A, estará totalmente descargada en 20 h.

La velocidad a la que se descarga la batería se expresa con la clasificación C. Esta clasificación indica cuántas horas durará una batería con una capacidad determinada, La capacidad de la batería depende de la velocidad de descarga. Cuanto mayor sea la velocidad de descarga es decir la tasa C, menor será la capacidad de la batería (Vitronergy, 2019).

La capacidad de una batería generalmente se califica a 1 C que es la tasa de 1 h, lo que significa que una batería completamente cargada con un valor nominal de 1 Ah debe proporcionar 1 A durante una hora o 60 min.

Entonces, si esta misma batería se descarga a 0.5 C o C/2, esto indica que tiene la mitad de capacidad que en 1 C entonces, debe proporcionar 500 mA en el doble de tiempo que en 1 C, y como el tiempo es de una hora se va a tener la capacidad de suministrar 500 mA durante dos horas, y si la descarga fuera a 2 C entonces la batería entregaría el doble de amperaje que 1 C, es decir 2 A, en cuanto al tiempo este es la mitad de tiempo que en 1 C que equivale a 30 minutos (intervento, 2019).

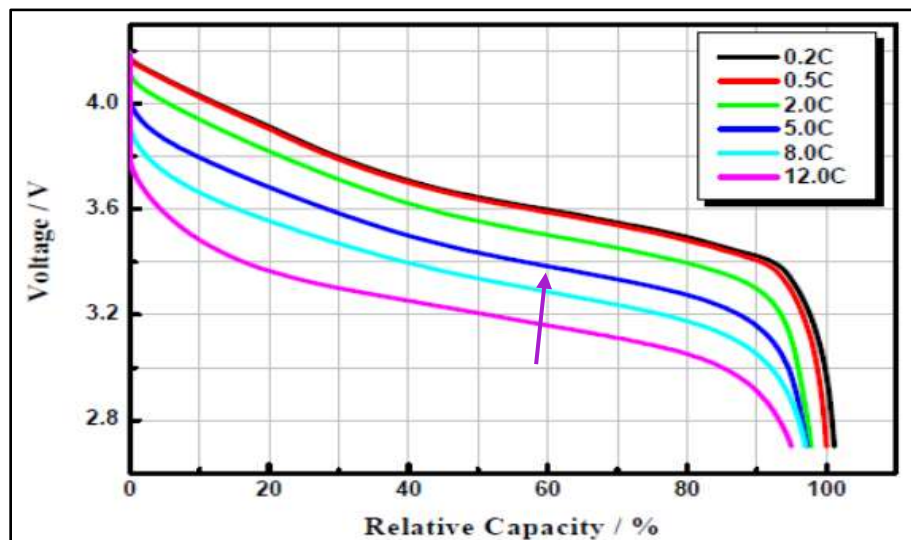


Figura 10 Curvas de voltaje vs capacidad relativa, a diferentes velocidades de descarga de una batería de LiFePO₄ (intervento, 2019)

Al analizar la figura 10 se puede observar un fenómeno interesante en donde se puede tener un porcentaje de carga determinado como por ejemplo 60% (indicado con fecha en color morado), y dependiendo de la curva de descarga el voltaje varía; en la curva de 12 C en color rosa el voltaje es menor a 3.2 V, mientras que en 5 C curva de color azul, es de 3.4 V, entonces hay una variación de voltaje de 0.2 V, con el mismo estado de carga, esto sucede porque la demanda de corriente es mayor en la curva de 12 C que en la de 5 C, por este motivo el voltaje disminuye de manera más rápida (Microtextindia, s.f.).

En conclusión, al tener una mayor demanda de corriente la batería se descargará más rápido pues trabaja a una mayor velocidad, en consecuencia, la curva de voltaje contra capacidad relativa decae de una manera más rápida que en comparación con demanda más pequeña y el voltaje decrece muy rápido, por este motivo el porcentaje de estado de carga de la batería llega a valores pequeños en un periodo corto de tiempo (Yuasa, s.f.).

Por otro lado, cuando el valor de C es pequeño, como 0.2 C (C/5) es decir una descarga en 300 minutos el periodo de tiempo es grande en comparación a 30 minutos entonces, el ciclo de descarga es lento por lo tanto el proceso en la batería también lo es, en este caso el voltaje decrece de manera lenta con relación al porcentaje de carga (Planet, 2018).

Esta información es de gran utilidad, pues al encender los electrodomésticos en el sistema que se dimensionó se puede tomar en cuenta los valores de las corrientes, la Ec. 9 muestra la relación que existe entre la corriente y la velocidad de descarga (Vitronergy, 2019).

$$t = C/I$$

Donde: t= tiempo
C= capacidad
I= Corriente de carga

Ec. 9

Al contar con la información se pueden sustituir los valores de las variables y obtener el valor de C, y teniendo este número se puede obtener una curva de velocidad de descarga y con esto se puede saber el comportamiento de la batería, que es lo deseado en uno de los objetivos del proyecto.

2.5 Métodos de estimación del estado de carga de una batería

El propósito de conocer los métodos de estimación para el estado de carga de una batería es poder elegir cual se adapta mejor al presente proyecto y así poder utilizarlo en el capítulo de metodología como base principal para diseñar el software de administración energética.

- ***Estimación mediante voltaje***

Se basa en las caídas de voltaje terminal debido a las impedancias internas cuando la batería se está descargando, por lo que la fuerza electromotriz (FEM) de la batería es proporcional al voltaje terminal. Dado que la FEM de la batería es aproximadamente lineal al SOC, el voltaje terminal de la batería también es aproximadamente lineal al SOC. De este modo la capacidad restante (SOC), se puede determinar mediante una prueba de descarga en condiciones controladas. El método de voltaje convierte una lectura del voltaje de la batería al valor SOC equivalente usando la curva de descarga conocida (voltaje vs. SOC) de la batería. Sin embargo, el voltaje se ve afectado más significativamente por la corriente de la batería debido a la temperatura y la cinética electroquímica de la batería.

El método de voltaje terminal ha sido empleado a diferentes corrientes y temperaturas de descarga, pero al final de la descarga de la batería, el error estimado del método de voltaje terminal es grande, porque el voltaje terminal de la batería cae repentinamente al final de la descarga (Matúš Danko, 2019).

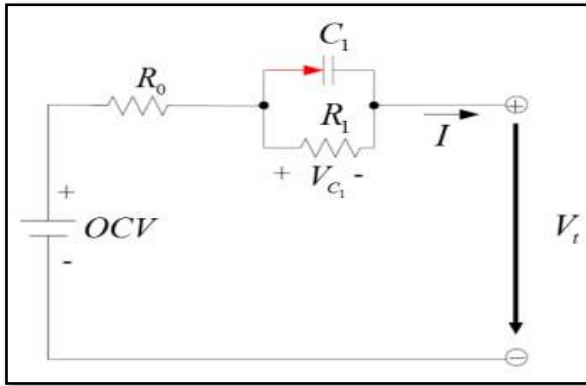
Es posible hacer que este método sea más preciso al compensar la lectura de voltaje con un término de corrección proporcional a la corriente de la batería y al usar una tabla de búsqueda del voltaje de circuito abierto (OCV) de la batería frente a la temperatura.

La necesidad de un rango de voltaje estable para las baterías hace que el método de voltaje sea difícil de implementar. Además, la prueba de descarga generalmente incluye una recarga consecutiva, lo que hace que requiera demasiado tiempo para considerarla en la mayoría de las aplicaciones. Otro inconveniente es que, durante la prueba, la función del sistema se interrumpe (método fuera de línea) a diferencia del conteo de culombios (método en línea) (Murnane, 2017).

- ***Estimación mediante medida directa (voltaje en circuito abierto)***

Para algunos tipos de baterías existe una relación aproximadamente lineal entre el SOC y su voltaje en circuito abierto (OCV). La relación entre el SOC el VOC, se determina mediante una prueba experimental denominada tensión de relajación que consiste en extraer una carga conocida a la batería, luego detener la descarga, esperar un tiempo adecuado de reposo a manera de asegurar que la tensión medida en bornes corresponda efectivamente al VOC (Jorge I. Pérez Valderrama, 2016).

Es recomendable realizar un modelo eléctrico, como en la figura 11 para encontrar la relación entre SOC y VOC. Después de encontrar esta relación se puede establecer el SOC de la batería con la Ec. 9, finalmente para encontrar este valor en cualquier momento de utiliza la Ec. 10 (A. Muh. Rifqa Al Hadi, 2019).



Donde:

R_0 = resistencia interna

R_1C_1 = comportamiento transitorio de la batería

OCV=fuente independiente que simula el voltaje de equilibrio

V_t = SOC

Figura 11 Circuito equivalente de una batería modelo Thevenin con parte transitoria (A. Muh. Rifqa Al Hadi, 2019)

$$V_t = OCV - V_{C_1} - IR_0$$

Donde:

OCV= voltaje en circuito abierto

V_{C_1} = voltaje en el capacitor

IR_0 = voltaje en la resistencia R_0

$\tau_1=R_1C_1$

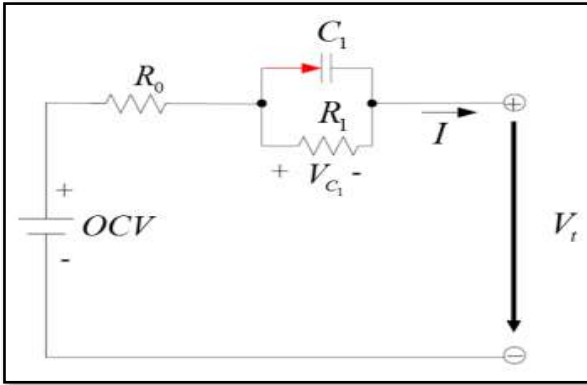
$$V_{C_1,k+1} = V_{C_1,k} e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} + I_k R_1 \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} \right)$$

Ec. 10

○ Estimación mediante resistencia interna

Es un concepto que ayuda a imaginar las consecuencias eléctricas de las complejas reacciones químicas que se producen dentro de una batería, es imposible medir la resistencia interna R_{int} , pero, esta puede ser calculada mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella (Morán, 2008).

La prueba consiste en aplicar una carga breve a la batería y medir los cambios de V y I para así determinar la R_{int} , por lo regular los niveles de R_{int} son más altos en estado de carga e inmediatamente después de cargar. Durante la descarga la R_{int} disminuye alcanzando el punto más bajo al a mitad de carga y empieza a subir de nuevo (Taufiq Alif Kurniawan, 2020). De igual manera que con el método por circuito abierto, en este se utiliza el circuito equivalente de Thevenin con parte transitoria, esto se puede observar en la figura 12.



Donde:

R_0 = resistencia interna

R_1C_1 = comportamiento transitorio de la batería

OCV=fuente independiente que simula el voltaje de equilibrio

V_t = SOC

Figura 12 Circuito equivalente de una batería (modelo Thevenin con parte transitoria) (Taufiq Alif Kurniawan, 2020)

Si el voltaje antes y después de las fluctuaciones de corriente son iguales a V_1 y V_2 , respectivamente, se utiliza la Ec.11, para calcular la R_{int} (Davoud Mahboubi, 2021).

$$R_0(SOC) = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

Ec. 11

En la figura 13 se puede apreciar un gráfico que muestra la variación de resistencia en comparación al SOC, a diferentes temperaturas, gracias al cual se puede apreciar uno de los factores que influyen en su variación, como lo es en este caso la temperatura (Davoud Mahboubi, 2021).

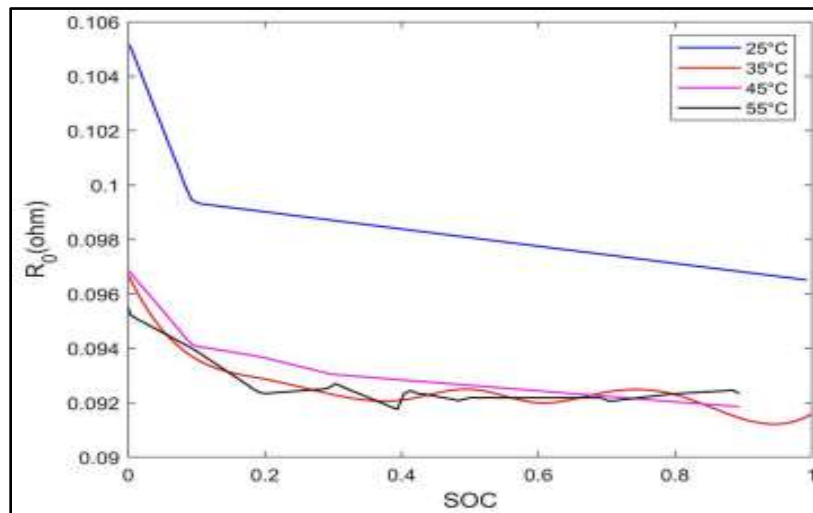


Figura 13 Gráfico de variación de resistencia en comparación con SOC en un rango de 30 °C (Davoud Mahboubi, 2021)

○ **Estimación mediante integral de la corriente**

Este método también es llamado Coulomb Counting y consiste en la integración de la corriente entrante y saliente de la batería. Básicamente el método integra en el tiempo la intensidad que cargan y descargan las celdas y su resultado es la carga almacenada en el interior de esta. Para hacer el cálculo se mide la tensión y las corrientes de descarga o carga de la batería en el tiempo, posteriormente los datos almacenados son tratados matemáticamente, haciendo la integral en el tiempo, para predecir el SOC de la batería en función del histórico de consumo y recargas (Sillero, 2018).

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta_i I dt$$

Donde:

C_N = es la capacidad nominal del acumulador
 I =corriente que sale o entra del acumulador
 SoC_0 = estado de carga inicial del acumulador
 η_i = factor de eficiencia Coulombica

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I d\tau$$

Ec. 12

Usualmente a la Ec. 12 parte superior se le agrega un factor de eficiencia coulombica (η_i), por lo cual se transforma en la expresión que se halla en la parte inferior de la Ec. 9 donde η_i es igual a 1 para la carga y menor a 1 para la descarga.

La principal ventaja de este método es que es simple de implementar y se puede aplicar a todas las químicas de las baterías, sus principales desventajas incluyen la necesidad de una calibración periódica, ya que se produce una acumulación de errores (debido al ruido del sensor y las imprecisiones) con el tiempo debido a la integración, otra desventaja es que este método requiere un SOC inicial preciso para proporcionar una precisión aceptable (Ahmed, 2014).

○ **Estimación mediante densidad relativa**

También denominado de gravedad específica, este método se basa en la existencia de una relación lineal entre la densidad del electrolito y el SOC (Ying-Shing Shiao, 2008). El electrolito de una batería totalmente cargada suele ser 1.26 veces más pesado que un volumen igual de agua pura cuando ambos líquidos están a la misma temperatura. Por lo tanto, se describiría que el electrolito de la batería tiene una "gravedad específica" de 1.26, lo que significa que su peso es 1.26 veces el peso del agua pura.

Cuando la batería se descarga, el ácido sulfúrico del electrolito se combina químicamente con las placas y el electrolito restante se vuelve más liviano, al determinar el peso relativo

del electrolito, se puede saber cuánto ácido se ha combinado con las placas y, por lo tanto, estimar cuánta energía eléctrica queda en la batería (Blank, 2014).

En la figura 14 se puede apreciar la relación entre el SOC y la densidad del electrolito o gravedad específica (SG), como se observa en la tabla de la parte derecha la variación del SG es muy pequeña en comparación con el SOC (Ying-Shing Shiao, 2008).

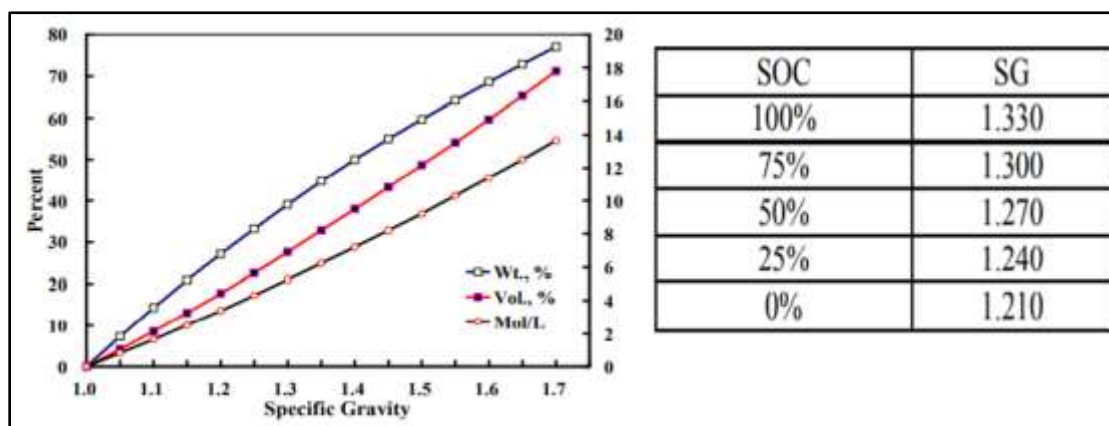


Figura 14 Ejemplo de un estudio de caso donde se utilizó el método de la densidad relativa (Ying-Shing Shiao, 2008)

Después de estudiar cada método de estimación para el cálculo de estado de carga de una batería (SOC) se tomó la decisión de seleccionar el método de estimación mediante voltaje. Esto por dos principales razones, en primer lugar, por cuestiones de contingencia sanitaria no se tiene acceso a laboratorio de almacenamiento, en consecuencia, no es posible tomar un método que implique el desarmar y analizar un elemento de la batería como por ejemplo el

de densidad relativa, como segundo lugar está la dificultad de adquirir una batería pues queda fuera de las posibilidades económicas de este trabajo de tesis.

Por estos motivos se planteó el tomar el método de estimación mediante voltaje, idealmente se monitorea el voltaje directamente de la batería pero, como se mencionó con anterioridad no se tiene acceso físico a una batería, pero si se puede realizar el modelo matemático de una y diseñar un software que le pida al usuario el valor de voltaje, de este modo poder conocer por la estimación mediante voltaje el SOC de la batería y de esta manera poder administrarlo.

2.6 Características de una tabla de verdad

Esta tabla fue ideada por Charles Sander Peirce durante 1880, sin embargo, fueron el analista austriaco Luidwin Wittgenstein y Bertrand Russel, un filósofo y matemático de origen británico, quienes se dieron la tarea de hacer mejoras en la tabla para que ésta finalmente pudiese ser aplicada a la lógica algebraica con mayor provecho (Osteicoechea, 2022).

El proceso de construcción de una tabla de verdad inicia por determinar el número de combinaciones posibles de los valores de verdad de las proposiciones simples constituyentes. Si la proposición consta de n proposiciones simples diferentes, puesto que cada una de ellas tiene dos valores posibles (verdadero o falso) habrá 2^n combinaciones posibles de valores. Existen cinco tipos de relaciones proporcionales con las que se pueden trabajar en una tabla de verdad, en los siguientes párrafos se narra la definición de cada una de ellas, mientras que en figura 15 se muestra de manera visual los cinco tipos (Astrology, 2020).

Negación: Si la proposición ‘A’ es verdadera, su negación (es decir, ‘no A’) será necesariamente falsa. Si la proposición ‘A’ es falsa, entonces su negación será necesariamente verdadera (Barcelo, 2016).

Conjunción: para que la relación ‘A y B’ sea verdadera, la proposición simple ‘A’ y la proposición simple ‘B’, deben serlo también. Si una de estas proposiciones simples es falsa, entonces la relación conjuntiva es también necesariamente falsa (Academic, 2019).

Negación		Conjunción			Disyunción		
A	\neg A	A	B	\wedge B	A	\vee B	
V	F	V	V	V	V	V	
F	V	V	F	F	V	F	
		F	V	F	F	V	
		F	F	F	F	F	

Condicionalidad			Bicondicionalidad		
A	B	\rightarrow B	A	\leftrightarrow B	B
V	V	V	V	V	V
V	F	F	V	F	F
F	V	V	F	F	F
F	F	V	F	V	V

Figura 15 Imagen de los cinco tipos de relaciones proporcionales, que pueden existir en una tabla de verdad (Barcelo, 2016)

Disyunción: para que la relación proposicional ‘A o B’ sea verdadera, basta con que solo una de las proposiciones simples lo sea. De ser ambas proposiciones falsas, entonces la relación de conjunción también lo será (Barcelo, 2016).

Condicionabilidad: la relación 'si A entonces B' indica a la proposición 'A' como causa o antecedente de 'B' pero, no como antecedente exclusivo, sino como una de las causas posibles de 'B'. Por esta razón, la condicionabilidad solo será falsa cuando el antecedente o causa sea verdadero pero, el efecto o consecuente no lo sea. De ser falso el antecedente o causa dado que es solo una de las posibles causas de 'B' el consecuente puede ser verdadero y esto no niega la relación condicional entre 'A' y 'B' (Academic, 2019).

Bicondicionabilidad: en contraste del caso anterior, en este tipo de relación proposicional, la proposición simple 'A' es causa o antecedente exclusivo de 'B'; y 'B' es antecedente también exclusivo de 'A'. Por ello, si una de las proposiciones simples es falsa y la otra verdadera, la relación bicondicional es falsa (Azueta, 2021).

Al conocer todos los cinco tipos de relaciones proporcionales y los resultados que resultan de cada uno, se pueden poner en práctica la información teórica en el presente proyecto.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Estimación de cargas

Para comenzar a ver las combinaciones que se pueden hacer con los electrodomésticos que tiene el sistema, primero, se identifica el nivel de priorización de cargas.

Según cifras del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), el nivel de utilización de cada electrodoméstico es: en primer lugar, se encuentra iluminación, en segundo uso de combustible, en tercero por uso de estufas (si son eléctricas) y refrigeradores, seguido por lavadora y plancha, por último, televisión, internet y climatización (INEGI, ENCEVI, 2018). Después de establecer esto, la priorización se usó queda de la siguiente manera, pues no se cuenta con todas las categorías en el proyecto

Nivel 1: Iluminación y preservación de alimentos (Iluminación interna y externa-Refrigerador).

Nivel 2: Elaboración de alimentos (licuadora y horno de microondas)

Nivel 3: Comunicación (celular y router)

Nivel 4: Entretenimiento (televisión)

Una vez que ya se tiene la dimensión de cargas y el nivel de priorización se requiere desarrollar una tabla de cargas de los electrodomésticos utilizados en la vivienda. Todo esto para saber cuál es la demanda que se requiere en un periodo de cinco horas, y de esta manera poder dimensionar la batería que se adapte mejor al proyecto. Además, es necesario representar de manera visual la priorización en función de uso, pues es uno de los dos aspectos que dan el estado de encendido o apagado a cada carga.

Una vez que se tiene la priorización y el número de cargas, se tiene que integrar en un tabla en Excel para poder desarrollar las combinaciones, los únicos dos electrodomésticos que se mantienen encendido son: refrigerador, pues es una carga que preserva los alimentos al ser este el nivel más alto de priorización permanece siempre encendido, además de este elemento la iluminación exterior también se tiene como nivel de prioridad uno, pues al ser un periodo nocturno en el que se dimensiono el sistema, es de suma importancia contar con iluminación en el exterior pues aporta seguridad el tener una iluminación fuera del hogar.

Para poder establecer los niveles de carga fue necesario identificar las características que se necesitan para tener encendido el refrigerador y la iluminación externa, se encontró que el mínimo estado de carga que se requiere es necesario de 25% del total de toda la energía que tiene la batería, entonces es indispensable contar con esta primera característica, pues si el sistema tiene un porcentaje menor al 25% estos dos elementos no van a estar en estado de encendido.

Como ya se mencionó anteriormente además de las seis variables que representan los electrodomésticos existen otras variables de entrada que corresponden a los estados de carga que son necesarios para encender cada elemento.

Para tener el total de combinaciones se toma en cuenta que se tienen seis dispositivos y tres rangos de estado de carga los cuales son: 26-50%, 51-75% y 76-100 %, entonces se tiene un total de 9 entradas. Para construir la tabla de verdad se aplicó la fórmula de elevar el número dos a la cantidad de entradas, es decir, 2 a la 9, esto dio como resultado 512.

Lo descrito en este apartado sirvió para identificar las cargas pertenecientes al sistema con el que se está trabajando, a partir de esto se pueden tomar las variables de entrada y realizar los cálculos para conocer la demanda total y así buscar una batería que se adapte lo mejor posible.

3.2 Digitalización y modelado de curvas de SOC de baterías

Una vez que ya se conoce el valor de demanda que requiere el sistema es necesario seleccionar la batería que se va a utilizar, al revisar la literatura se encontró que una de las mejores opciones para SFA, son las baterías Lifepo4 además cuentan con un nivel de seguridad alto, muy conveniente en instalaciones domésticas, y por último su gran capacidad de descarga, la cual es necesaria cuando los sistemas no cuentan con un soporte, este tipo de batería se eligió porque su alto nivel de adaptabilidad al proyecto.

Se seleccionó una batería con las características mostradas en la tabla 6.

Tabla 6 Especificaciones de la batería seleccionada tomada de <https://www.clevabattery.com/lithium-ion-battery/deep-cycle-lithium-battery/lithium-12v-deep-cycle-battery.html>

Batería de litio Lifepo4 de 12v 50ah		
Aplicación: Electrodomésticos, carritos de golf, submarinos, bicicletas / scooters eléctricos, vehículos eléctricos, sillas de ruedas eléctricas, sistemas de energía eléctrica, sistemas de almacenamiento de energía solar, fuentes de alimentación ininterrumpida	Continuous Charge Current	50A
Tamaño de la batería: 195 * 166 * 175 mm	Continuous Discharge Current	50A
Nombre de la marca: OEM / ODM	Peak Discharge Current	100A 10S
Certificación: CE / RoHS / UN38.3 / MSDS	Recommend Charge Current	10A
Número de modelo: 12V 50Ah	Charge Cut-off Voltage	14.6±0.2V
Lugar de origen: Guangdong, China	Discharge Cut-off Voltage	10V
Peso: 7KG	Charge Mode	0.2C to 14.6V, then 14.6V until charge current to 0.02C(CC/CV)
Tipo de batería: LiFePO4	Working Temperature (CC/CV)	-20°C~60°C
Voltaje nominal: 12.8V	Self-discharge	25°C, monthly ≤3%
Capacidad nominal: 50Ah	Efficiency of Charge	100%@0.5C
Ciclo de vida: 5000 ciclos	Efficiency of Discharge	96-99% @1C
Protección: Corriente de carga continua Smart BMS incorporada: Corriente de descarga continua de 50A	Internal Resistance	≤10mΩ
: Corriente de descarga máxima de 50A	Cycle Life	≥5000 cycle
: 100A 10S	Dimension	195*166*175mm
Temperatura de trabajo (CC / CV): -20 ° C ~ 60 ° C	Weight	7 kg

En cuanto al método de estimación como ya se mencionó con anterioridad que se utilizará el de estimación mediante voltaje, pues no maneja partes físicas de la batería, ya que por cuestiones de tiempo y de particularidades del proyecto, no sé tiene al alcance un elemento físico, por este motivo las mediciones y el estado de carga se van a modelar en un software. Por este motivo se utilizará el método anteriormente mencionado, ya que este permite simular el porcentaje de carga en relación con el voltaje que se tiene y de esta manera realizar un programa que cumpla con la parte medular del proyecto.

3.2.1 Digitalización de curvas de SOC

Al definir una batería es necesario conocer su curva de voltaje con respecto a la descarga con diferentes velocidades para que se pueda extraer los datos y elaborar una propia con el propósito de facilitar la manipulación de los valores y hacer una aproximación a los datos.

La figura 16 muestra dicha curva, la cual se extrajo directamente de la página del proveedor, se puede observar cinco curvas con diferente C es decir velocidad de descarga, 2 C en color rosa, 1 C en color verde, 0.5 C en color azul, 0.33 C en color rojo y 0.2 C en color negro, a la par se puede notar como en la curva con menor velocidad de descarga, es decir, 0.2 C en color negro el voltaje comienza a descender de una manera más lenta en comparación con la curva de mayor velocidad de descarga 2 C color rosa, esto sucede por la diferencia de tiempo de descarga.

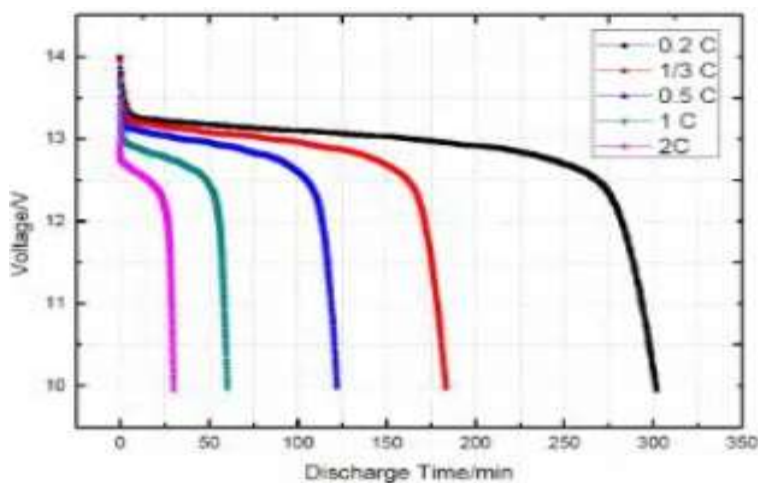


Figura 16 Especificaciones de la batería seleccionada (CLEVA POWER.com)

Luego de obtener esta figura, fue necesario replicarla de manera manual, para hacer esto se utilizó una hoja de cálculo en Excel en la cual se capturaron los datos de tiempo en unidades de minutos y los voltajes que resultaban de las cinco diferentes velocidades de descarga, todos estos datos son a una temperatura de 25° C, pues es el estándar general de temperatura para estas mediciones.

La tabla de Excel comenzó desde los 0.02 minutos y va incrementando de 0.01 minutos pues en un inicio la batería pierde un nivel considerable de voltaje en un periodo de tiempo bastante pequeño en consideración a un minuto, finaliza en los 300 minutos hablando en términos de C (velocidad de descarga), esto equivale a 0.2 C, por este motivo el rango

superior de tiempo pertenece a este valor, la velocidad más lenta de descarga, en cuanto al voltaje, inicia en 9.87 V y finaliza con 14 V.

Se puede observar en la tabla 8, que la base de datos para generar las curvas de voltaje contra tiempo de descarga consta de seis columnas, en donde la primera corresponde al tiempo que va transcurriendo en minutos y las otras cinco a las velocidades de descarga.

En la tabla 7 se puede observar varias características de la base de datos como lo es que el total de datos que se tiene en cada velocidad de descarga es variado, pues en 2 C (30 minutos) el periodo de tiempo es muy corto en comparación por ejemplo a 0.2 C (300 minutos), en 2 C el total de datos son 21, finalizando con un voltaje de 9.875 V.

En 1 C es decir una hora se tienen 40 datos en donde a partir de dos minutos el tiempo incrementa de dos en dos, con un voltaje final de 9.93 V, en 0.5 C equivalente a dos horas tiene 63 datos incrementando de dos en dos el valor del tiempo transcurrido y finaliza con un voltaje de 9.887.

En 0.33 C equivalente a 180 minutos comienza el incremento de velocidad como en las tres primeras columnas pero, a partir del dato 32 equivalente a 52 minutos se incrementó el tiempo de uno en uno, al llegar al minuto 75 el incremento cambio a cinco unidades y al llegar al minuto 105 se incrementó el tiempo de tres en tres así hasta llegar al minuto 180, con un voltaje correspondiente de 9.97, y un total de 84 datos.

Por último, todo este incremento irregular de tiempo se decidió así pues en ocasiones el voltaje tenía variaciones muy grandes en una decena de minutos y en otras el voltaje era casi constante en un par de decenas de minutos.

En la velocidad más lenta de descarga 0.2 equivalente a 300 minutos tiene exactamente el mismo comportamiento que la de velocidad 0.33, hasta el dato 84 equivalente a 180 minutos, después de esto el tiempo incrementa de cinco en cinco hasta llegar al minuto 240, luego se el tiempo se incrementó de tres en tres hasta el valor de 291 y de ahí hasta llegar al valor final de uno en uno es, con un total de 124 datos y un voltaje de 9.98 V.

Tabla 7 Base de datos realizada a partir de las curvas de voltaje vs tiempo de descarga, a una temperatura estándar de 25°C (elaboración propia en Excel)

Descarga a 25°C					
Minutos\Velocidad	2C	1C	0.5C	0.33C	0.2C
0.02	14	14	14	14	14
0.04	13.9	13.8	13.94	13.96	13.98
0.06	13.8	13.7	13.9	13.85	13.95
0.08	13.7	13.55	13.8	13.8	13.9
0.09	13.5	13.4	13.7	13.73	13.81
0.195	13.3	13.3	13.6	13.66	13.76
2	12.9	13.15	13.45	13.58	13.67
3	12.8	13.03	13.4	13.52	13.6
5	12.7	12.95	13.3	13.46	13.53
8	12.6	12.91	13.2	13.38	13.48
10	12.58	12.875	13.15	13.3125	13.41
12	12.53	12.85	13.12	13.29	13.38
14	12.5	12.8125	13.11	13.26	13.35
16	12.45	12.81	13.08	13.22	13.3
18	12.4	12.79	13.07	13.2	13.28
20	12.355	12.78	13.0625	13.187	13.26
22	12.25	12.76	13.05	13.181	13.24
24	12	12.75	13.04	13.173	13.23
26	11.6	12.74	13.03	13.166	13.222
28	10.9	12.73	13.015	13.16	13.21
30	9.875	12.71	13.01	13.15625	13.215

Como se mencionó con anterioridad la toma de decisión de estos incrementos de tiempo fue para dar un valor más aproximado del voltaje 124. Hasta este punto se tiene en los datos la relación entre voltaje de la batería y velocidad de descarga pero, la base del presente trabajo es conocer el porcentaje de carga de la batería y que este se encuentre relacionado con el voltaje, para hallar esta relación se utiliza la Ec. 13:

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - \frac{\text{Tiempo} \cdot 100}{\text{Velocidad de descarga}} \quad \text{Ec. 13}$$

Cuando que se aplicó la Ec. 10 a todas las velocidades ya se tiene la relación que se necesita y se procede a graficar estos resultados. En el apartado de resultados y discusión se tratarán los puntos estratégicos de cada curva, así como el procedimiento que se siguió para llegar a ellas.

Todo esto con el propósito de tener una base de datos que contenga una relación entre el estado de carga (SOC) y el voltaje de batería, para que de este modo se pueda calcular el valor de SOC al conocer el voltaje o en caso contrario calcular el voltaje al tener el valor de SOC.

3.2.2 Modelado de curvas de SOC utilizando Origin 2023

Primero se tomó la base de datos que se laboró en Excel la cual relaciona el SOC con el voltaje, luego se copiaron los datos en un libro en Origin 2023, al notar que el voltaje de funcionamiento de la batería oscila entre los 11 y los 14 voltios, se tomó la decisión de recortar la gráfica que iniciaba en 9.87 V, e iniciar la aproximación desde 11 V, al omitir el intervalo anteriormente mencionado, se inició con la aproximación, para esto se utilizó la función de análisis de función no lineal, luego se seleccionó la curva que se aproximaba de mejor manera a la original, en este caso fue la de tipo “growth sigmoidal-Bidose resp” es decir crecimiento sigmoidal de doble respuesta. Una función sigmoidea de crecimiento representa el comportamiento de desarrollo de un conjunto de datos (Quintero, 2018).

La curva sigmoidal o “S”, como también es conocida posee cuatro fases, en la fase uno comienza el suceso por este motivo la curva se encuentra en valores muy pequeños, en la fase dos el crecimiento es aproximadamente exponencial; al cabo de un tiempo, en la fase tres aparecen sucesos que resultan en que la tasa de crecimiento disminuya; finalmente, en la madurez o fase cuatro, el crecimiento se estanca. Estas cuatro fases se denominan consecutivamente fase de inicio, exponencial, fase (cuasi) lineal y fase de senescencia (Sergio Aguilar, 2012).

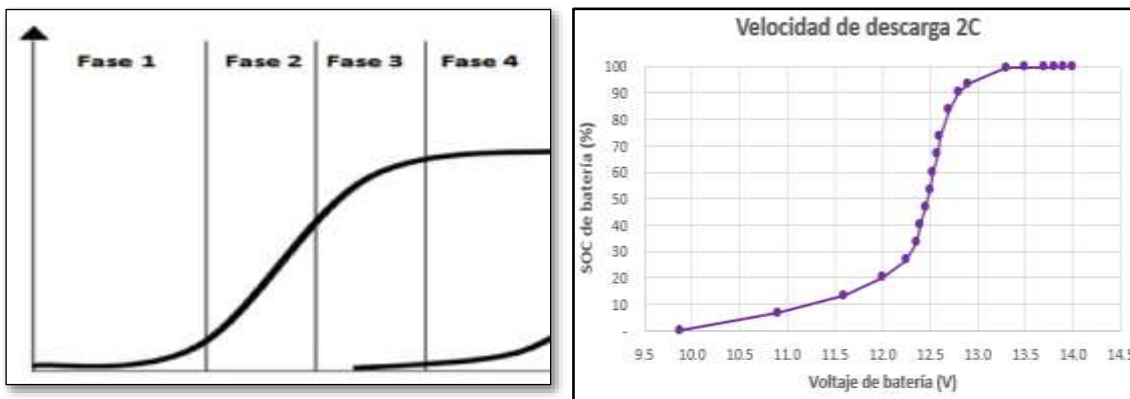


Figura 17 Comparativa entre curva sigmoidal, parte izquierda color negro y curva elaborada con base de datos parte derecha en color morado (elaboración propia en Excel)

En este caso de estudio se encuentra la similitud de este comportamiento con la curva de estado de carga contra voltaje, en la figura 17 se observa como la curva digitalizada en color morado presenta las mismas cuatro fases que una curva sigmoidal, por este motivo se seleccionó dicha curva pues se adapta en gran medida al comportamiento de la curva original.

A demás de la opción de generar una curva que se aproxime a la trasladada en el software se puede ver que en las pestañas se encuentran otras herramientas como la fórmula que se asocia a la curva generada a dicha curva, es decir la que genero Origin 2023.

En la figura 18, se encuentra una captura de pantalla del entorno de Origin 2023 ahí se observa el modelo matemático de las curvas de voltaje vs SOC que se generó a partir de la curva “growth sigmoidal-Bidose resp” la cual es la mejor opción para el trabajo en cuestión, además muestra los parámetros que están contenidos en este y los valores que tiene cada uno.

En el modelo matemático generado por el software la variable “y” representa el estado de carga de batería, mientras que “x” el voltaje que tiene. En este modelo recae la mayor parte de los fundamentos matemáticos del proyecto, pues gracias a él se tiene la relación entre voltaje y SOC de la batería, al conocer esta relación se puede tener una buena aproximación teórica de ambos valores si se conoce uno de los dos.

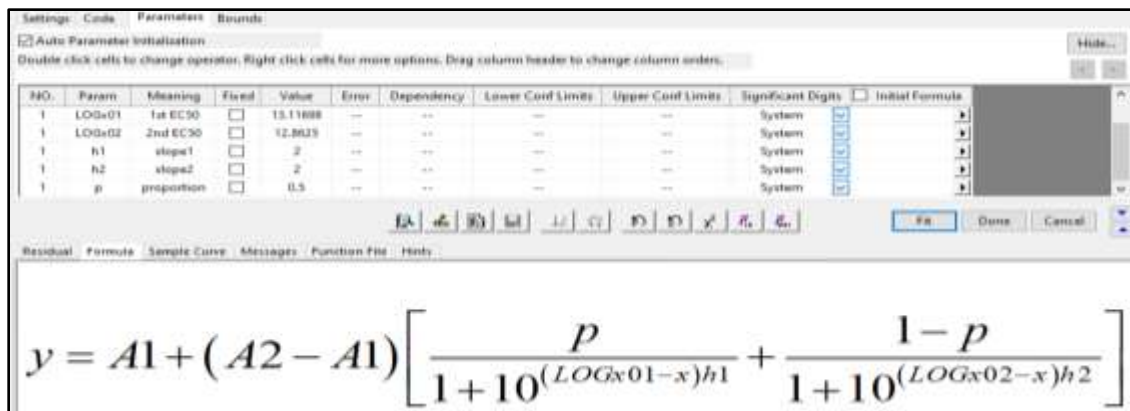


Figura 18 Captura de pantalla de entorno de Origin 2023 y modelo matemático de las curvas que relacionan el voltaje y SOC de la batería (elaboración propia en Origin 2023)

Las curvas generadas por el software representan la velocidad de descarga y voltaje se puede observar en la figura 19 como la curva que origino el software (línea color rojo) es muy similar a la original (cuadros en color negro). De esta manera se puede deducir que fue una buena aproximación a la curva original. Además, el gráfico que arroja el software ya contiene un recuadro en la parte superior izquierda donde aparece la ecuación y los parámetros involucrados, lo que facilita la manipulación de datos, en una figura posterior se muestra una vista ampliada del recuadro, además de una explicación más detallada de este elemento.

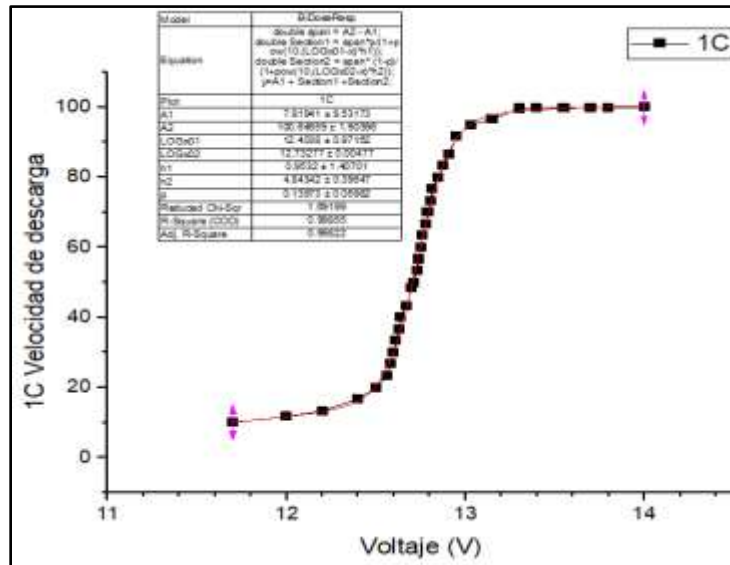


Figura 19 Voltaje vs velocidad de descarga (elaboración propia en Origin 2023)

En este momento ya se cuenta con la relación entre SOC y voltaje de la batería, en este punto el modelo es aplicable solo a las cinco velocidades de descarga que se tienen en la base de datos, por este motivo se toman los parámetros de que modelan en comportamiento de la curva y se identifica la dependencia que tiene con relación a la velocidad de descarga.

Para esto se observa que los parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$, contenidos en el modelo matemático, tienen valores diferentes pues cada uno pertenece a cinco velocidades distintas, entonces, se realiza un segundo ajuste tomando los parámetros de las cinco velocidades que se tienen, después de que se elija la curva más aproximada a la original, el software arroja de nueva cuenta una fórmula que corresponde a esta curva en donde está fórmula ya toma la dependencia con relación a la velocidad de descarga.

En la figura 20 parte derecha se puede observar cómo se aproximó el parámetro $h1$ donde la línea en color negro representa la forma de la curva original y la de color rojo la generada con la aproximación que se elaboró en el software. En esta imagen se puede ver que hay un recuadro en la parte superior izquierda, esta área de la imagen contiene la fórmula para generar la curva del segundo ajuste, es decir, la de los parámetros.

En la parte izquierda de la figura 20 se puede observar una vista ampliada del cuadro que contiene la fórmula de la curva en color rojo, ahí se encuentran los parámetros que contiene y los valores que corresponde a cada uno, en esta fórmula el valor de “ x ” representa las diferentes velocidades de descarga, pues varían dependiendo la corriente que se requiere y es en este punto donde se introduce el valor de la capacidad de descarga de la batería, que a su vez tiene una estrecha relación con el tiempo.

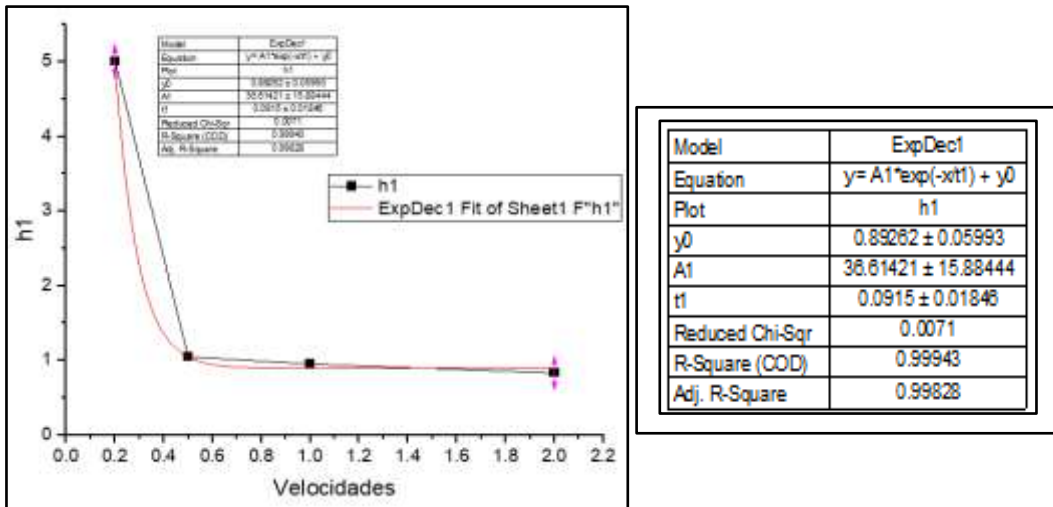


Figura 20 Curva de parámetro h1 y valores de ecuación generada en Origin 2023 (elaboración propia en Origin 2023)

Al sustituir los valores de todas las velocidades de descarga los parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$ dependerán de la velocidad de descarga y al sustituirlo en la fórmula del primer ajuste de curvas, se tendrá una función continua que se puede aplicar a cualquier velocidad de descarga.

Los resultados de este proceso se utilizan para generar el modelo matemático de la batería y a partir de esto conocer el estado de carga (SOC) con relación al voltaje de la batería.

En el apartado de resultados y discusiones se retomarán este proceso para comprobar su aplicación a las 5 curvas de velocidad que se tiene originalmente.

3.3 Elaboración de tabla de verdad para energización de cargas

En la tabla 8 se observa un fragmento de la tabla de verdad, en esta solo se encuentra las variables de entrada, consta de diez columnas: nueve pertenecientes al sistema, la restante es el conteo de combinaciones, 514 filas que representan cada una de las combinaciones y una para títulos de cada elemento.

Tabla 8 Captura de pantalla de tabla de verdad donde se pueden observar sus dimensiones y los valores de encendido y apagado (elaboración propia en Excel)

Com	Interna	Hor. de microondas	Licudadora	Celular	Router	Televisión	Carga 26 -50%	Carga 51-75%	Carga 76-100%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	1	0	1	1
13	0	0	0	0	0	1	1	0	0
14	0	0	0	0	0	1	1	0	1
15	0	0	0	0	0	1	1	1	0
16	0	0	0	0	0	1	1	1	1
17	0	0	0	0	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Cada una de las 514 combinaciones es una posible selección que da el usuario de lo que desea o no encender, entonces los resultados de la tabla 8 se retomaran en el siguiente capítulo ya que son las variables de entrada que tiene el sistema, y gracias a ellas se pueden calcular las combinaciones de salida.

3.4 Desarrollo de algoritmo para la elaboración de un programa en Matlab

Para que un sistema de administración energética sea desarrollado a partir de un algoritmo existen muchos aspectos que se deben abarcar, entre los principales se encuentra el que da la “inteligencia” por así decirlo, la mayoría de las veces el encargado de esta tarea es un software de programación el cual es ejecutado por una computadora.

El conjunto de órdenes e instrucciones que se dan al ordenador para que resuelva un problema o ejecute una determinada misión, recibe el nombre de programa (Aranda).

En este escrito, se utilizó Matlab, pues a ser una plataforma de programación y cálculo numéricos se utiliza para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos (MathWorks, 2021). Esta poderosa herramienta ayudo a cumplir con la parte medular del trabajo de tesis: diseñar un sistema inteligente de administración de energía para una casa habitación aislada de la red eléctrica, y de este modo satisfacer necesidades energéticas básicas en un periodo nocturno. Otro de los motivos para elegir este software de programación es que se tiene un mejor manejo, además que es un recurso gratuito que otorga la BUAP (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla) a todos sus estudiantes.

Fue originalmente escrito por Cleve Moler, fundador de MathWorks Inc., con el objetivo de proporcionar un acceso fácil al software matricial desarrollado en los proyectos de UNIX LINPACK (de LINear equations PACKage) y EISPACK (de EIgenvalue Subroutines PACKage). La primera versión de Matlab, a finales de los años 70, se escribió en FORTRAN, siendo la única estructura de datos la matriz. De ahí el nombre del programa, cuyas siglas corresponden a MATrix LABoratory. Posteriormente, en los años 80, fue reescrito en C. La versión 3 para MS-DOS es de principios de los años 90. En 1993 aparece la versión 4, para Windows 3.11, en esta se incorpora la primera versión del Simulink, desde ese momento a la fecha ha sido un parteaguas para el diseño de programas en múltiples aplicaciones (ETSETB, 2015).

Una vez que se tienen todos los elementos, relacionados con las cargas del sistema y el nivel de priorización de cada uno y el modelo matemático de estado de carga (SOC), se desarrolló un diagrama de flujo para traducir este a un algoritmo en Matlab y de esta manera sea más fácil la programación.

La figura 21 muestra el diagrama de flujo que se utilizó para programar, en él se observa un bloque de inicio que indica que se comienza a leer el proceso que realiza todo el software, después se encuentra un bloque donde se muestra un mensaje para que el usuario introduzca el valor del voltaje que teóricamente tiene la batería.

Después como operación interna aparece un bloque donde se va a calcular el estado de carga para realizar estas operaciones en el siguiente bloque se muestran las variables de entrada, que son: corriente, voltaje, y el modelo de la batería que se generó en Origin 2023.

La variable de salida es el porcentaje que tiene de carga la batería, este porcentaje se va a almacenar en una variable para que se pueda tomar en cuenta en el momento de priorizar las cargas.

Después de calcular el valor aparece un bloque en donde se imprime en pantalla las opciones de electrodomésticos, con la leyenda “Lista de cargas”, en las líneas de código se van a poner todos los electrodomésticos.

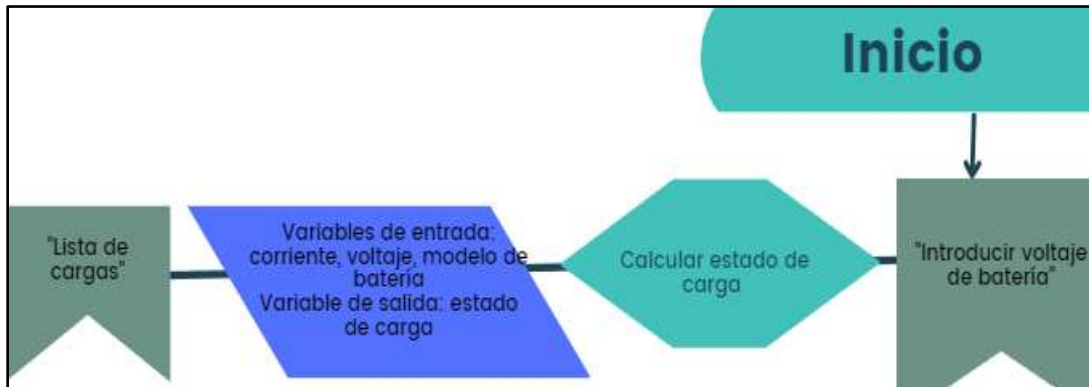


Figura 21 Primer proceso de diagrama de flujo (elaboración propia en Canva.com)

En la figura 22, se muestra la continuación del diagrama, en el primer elemento se observa que inicia el proceso con un bloque donde se pide al usuario que seleccione la carga a encender, para realizar este proceso las variables de entrada son el valor de “1” que representa el encendido de la carga o el valor de “0” que significa que el estado es de apagado, al saber que electrodomésticos quiere encender el usuario se procede a encontrar esa combinación en la tabla de verdad y ver cuáles son las variables de salida.

Todo esto se programa de manera interna en las líneas de código, para saber cuál es la combinación de variables de salida, la tabla de verdad tiene una sección donde aparecen ya priorizadas con base a su nivel de necesidad y el estado de carga (SOC) de la batería.

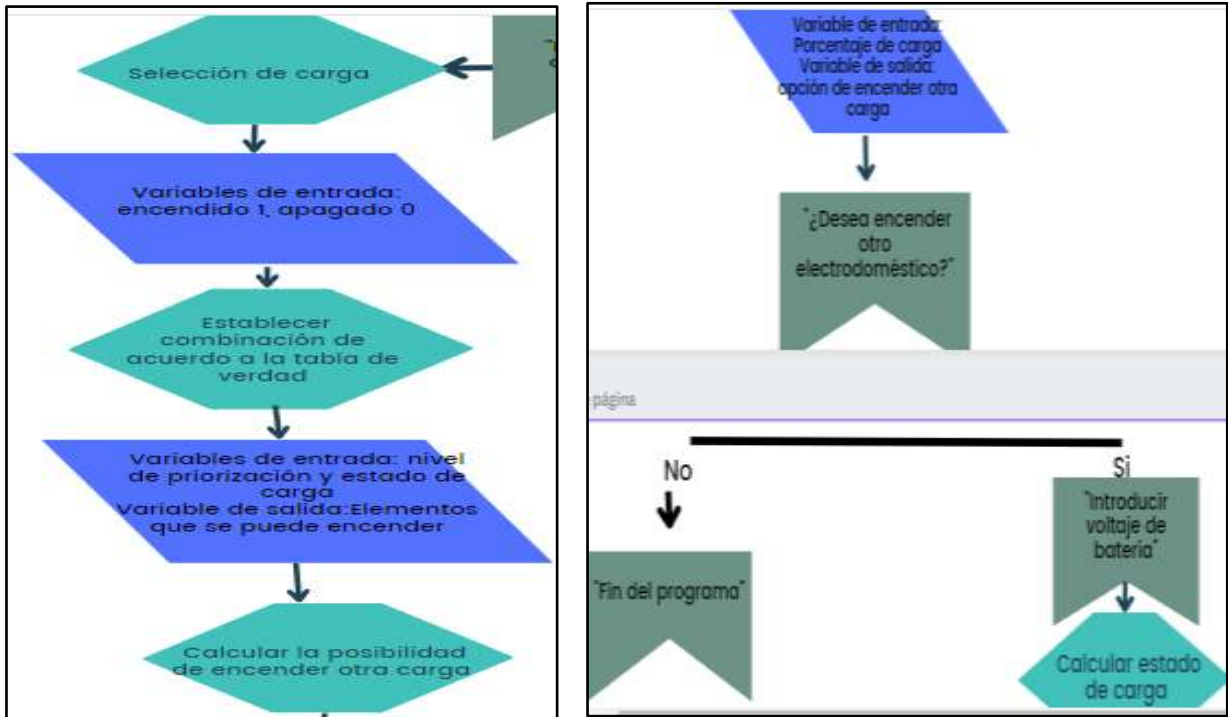


Figura 22 Parte izquierda segundo proceso del diagrama de flujo, parte derecha proceso de selección para comenzar de nuevo el ciclo (elaboración propia en Canva.com)

Cuando se conoce que cargas se van a encender dependiendo de la tabla de verdad aparecerá un indicador que señale en qué estado se encuentra el electrodoméstico, encendido o pagado.

En dado caso que el usuario desee encender algo más el programa calcula el porcentaje de carga sobrante, esta operación se encuentra en el bloque de calcular la posibilidad de encender otra carga, si este valor permite que se encienda el diagrama continúa con una impresión de pantalla con la leyenda “¿Desea encender otro electrodoméstico?”.

En caso de que la respuesta sea afirmativa el usuario va a teclear un “1”, en caso contrario un “0”. En caso contrario, es decir, si el valor que asigna el usuario es “0” en el diagrama aparece un bloque que indica la leyenda “Fin del programa”, pues el usuario no desea encender ningún electrodoméstico.

Si el valor que seleccionado es “1”, se continúa con un bloque donde de nueva cuenta se le pide al usuario ingresar el voltaje teórico de la batería, para que de este modo se calcule el porcentaje de carga.

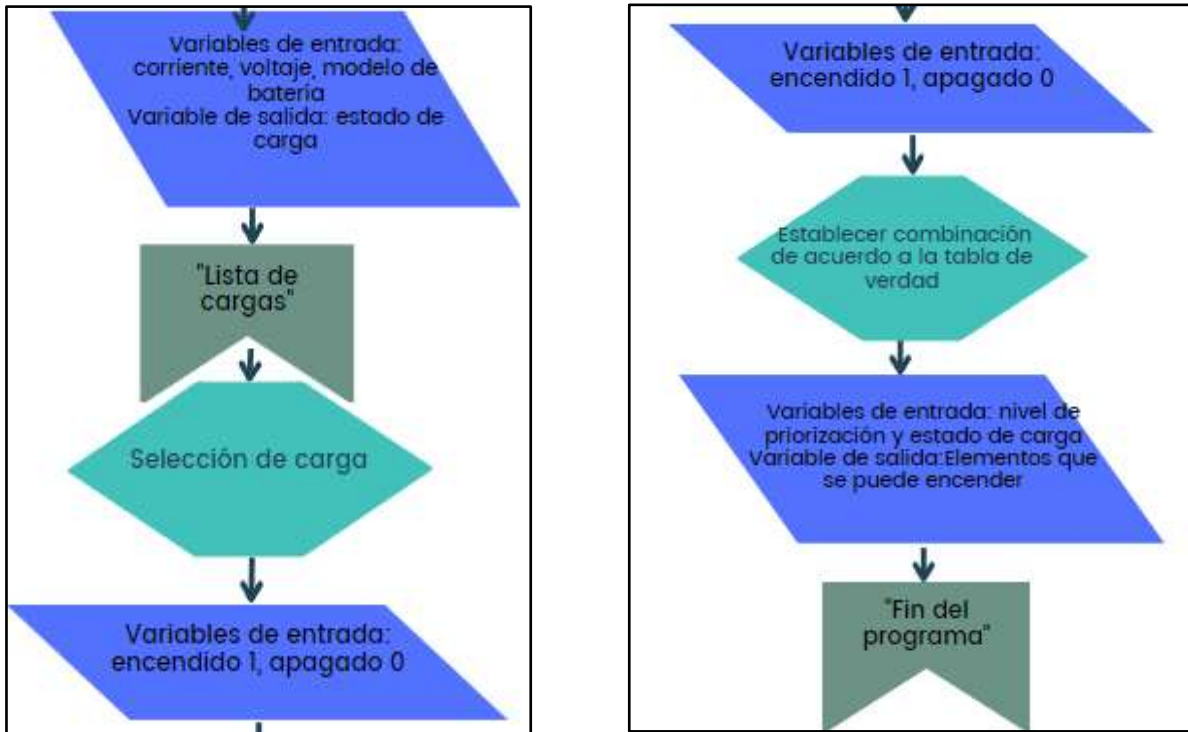


Figura 23 Parte izquierda repetición del ciclo para poder encender otro electrodoméstico, parte derecha último proceso del ciclo (elaboración propia en Canva.com)

Se puede observar en la figura 23 parte derecha, que al seleccionar la opción de encender otro electrodoméstico en el diagrama de flujo se comienza a repetir el ciclo, se calcula el estado de carga, luego se muestra la lista de elementos, el usuario selecciona que elemento desea encender, se establece las combinaciones con relación al nivel de priorización y el porcentaje de carga, por último, aparece una impresión de pantalla donde se muestra la leyenda “Fin del programa”.

Las variaciones modificaciones que se realizan es este ciclo se encuentran en el porcentaje de carga pues al tomar los valores de voltaje y corriente, la corriente toma en cuenta la que ya demanda las cargas encendidas, en cuanto al voltaje se realizó un filtro para que este sea menor al voltaje que se introdujo en el inicio del diagrama de flujo, pues es cierto que el voltaje después de que se enciende un electrodoméstico disminuye, por este motivo el voltaje tiene que ser menor al voltaje inicial que introdujo el usuario.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de programar este diagrama de flujo, además se discute como se utilizaron todas las herramientas hasta este momento desarrolladas para concluir con el software de administración energética.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1 Cálculo de cargas

Para poder calcular las cargas se requiere desarrollar una tabla de cargas de los electrodomésticos utilizados en una vivienda. En la tabla 9, se recopiló la información mencionada en el capítulo 3 metodología, apartado dimensionamiento de cargas.

Esta tabla compuesta por seis columnas, en donde la primera representa el tipo de receptor, con un total de ocho, se puede ver que la parte de iluminación se dividió en iluminación externa e interna, pues la iluminación externa va a permanecer encendida cinco horas, mientras que la interna depende del usuario, esto se hizo para que posteriormente en la tabla de verdad para la activación de cargas, las combinaciones de iluminación externa e interna se traten de manera distinta.

En la columna número dos se encuentran las unidades que se tienen, por ejemplo, en el caso de celular hay tres unidades. La columna número tres representa la potencia promedio (Wh) que se utiliza por unidad de elemento, estas cifras se extrajeron de artículos de PROFECO (procuraduría federal del consumidor) y CONAFOVI (comisión nacional de fomento a la vivienda) (PROFECO, 2021).

La columna número cuatro es la potencia total donde se multiplicó la potencia promedio por las unidades de receptor que se tiene, la quinta columna son las horas teóricas que se utiliza cada receptor, es decir, en el periodo de cinco horas cuántas de estas funciona cada electrodoméstico en el caso del refrigerador se estipuló que va a estar funcionando las cinco horas es decir todo el periodo de tiempo, también la iluminación externa va a estar en funcionamiento las cinco horas, pues al ser un periodo nocturno se utilizan para la iluminación en exteriores.

La última columna representa la energía total que consume cada receptor, este número se calculó del producto de la columna cuatro y cinco, es decir potencia total por horas de funcionamiento.

Se puede observar que la última columna tiene como título energía total en cinco horas, es importante recalcar que cada electrodoméstico tiene un tiempo teórico de funcionamiento que se estipuló en un periodo de cinco horas, mas no están consumiendo energía las cargas durante esas cinco horas, por ejemplo, la televisión va a consumir energía una hora y media de las cinco horas del periodo de tiempo total.

Tabla 9 Cargas en un periodo de 5 horas (elaboración propia en Excel)

Tabla de cargas					
Tipo de receptor	NºUnidades	Potencia (Wh)	Potencia total (Wh)	Tol. Hrs (funcionamiento)	Energía total en 5 horas (Wh)
Iluminación interna	4	10	10	2	20
Iluminación externa	1	10	10	5	50
Televisión 32	1	56	56	1.5	84
Celular	3	6	18	1.5	27
Router	1	4.5	4.5	2	9
Horno de microondas	1	1000	1000	0.1	100
Refrigerador	1	150	150	5	750
Licuadaora	1	700	700	0.075	52.5
Total de Wh en un periodo de 5 horas				1152.5	

Una vez que se tiene en la demanda total de energía requerida por el sistema, lo siguiente es subdimensionar el total de potencia, de este modo se cumple con lo establecido en párrafos anteriores donde se mencionó que el sistema se dimensiona al 50% para así tener poco recurso y administrarlo de manera eficaz.

4.2 Determinación del estado de carga de batería

Al terminar de digitalizar la base de datos se continuó con generar la gráfica, lo que dio como resultado el grafico que se encuentra en la figura 24 parte izquierda, donde se muestran las mismas curvas que proporciona el fabricante solamente que estas ya son las de elaboración propia, se puede observar como en el eje X está la velocidad de descarga que inicia en cero y termina en 300 minutos, mientras que el eje Y representa el voltaje que inicia en 9.87 V y finaliza en 14 V.

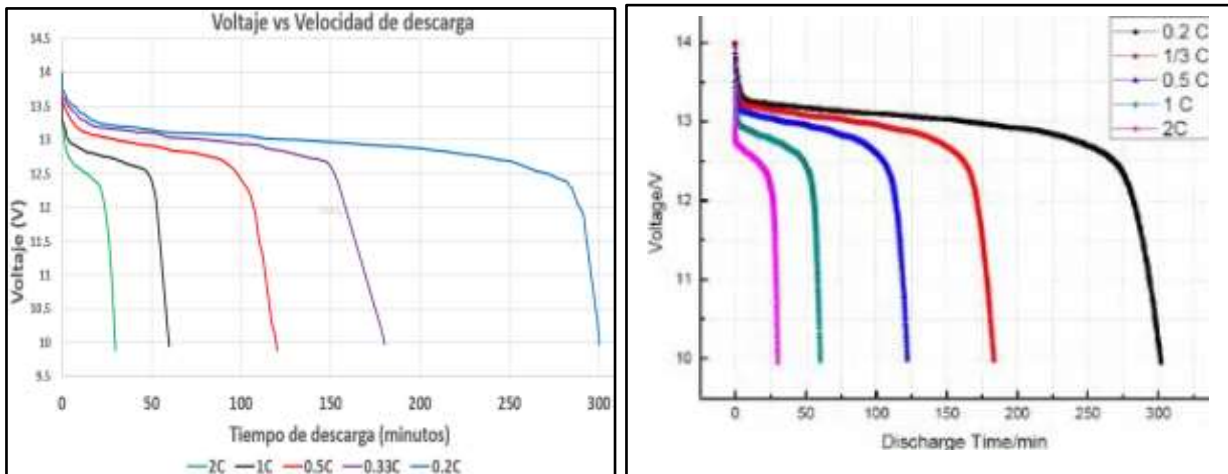


Figura 24 Comparativa de grafica voltaje vs tiempo de descarga, de lado izquierdo la de elaboración propia y de lado derecho la proporcionada por el fabricante (CLEVA POWER.com)

En la parte derecha de la figura 24, se encuentra la gráfica del fabricante, la relación que contiene es de voltaje-tiempo de descarga, para poder realizar el software de administración energética se estableció con anterioridad que la relación que se busca es de voltaje-estado de carga, por este motivo se van a aplicar la Ec. 14, de este modo se puede obtener la relación esperada.

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - \frac{2 \cdot 100}{30}$$

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - \frac{200}{30}$$

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - 6.66 = 93.33$$

Donde:

Tiempo= 2 minutos

Velocidad de descarga =30 minutos

Ec. 14

Al realizar un ejemplo de la sustitución de valores y el resultado (Ec. 15) que arrojo dicha sustitución, se puede observar que cuando se tiene un periodo de tiempo pequeño, en este caso 2 minutos el SOC de la batería se encuentra en un nivel elevado 93.33%, pues lleva poco tiempo que se está descargando, es decir, 2 minutos de los 30 que dura el ciclo de descarga.

Cuando se tiene un periodo de tiempo más elevado como por ejemplo 20 minutos el estado de carga disminuye notablemente, por ejemplo, en la imagen 39 se observa que este tiene un valor de 33.34%, es mucho menor en comparación al de 2 minutos 93.33%. Esto se debe a que la batería ya se descargó durante 20 de 30 minutos que va a durar el proceso de descarga.

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - \frac{20 \cdot 100}{30}$$

Donde:

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - \frac{2000}{30}$$

Tiempo= 20 minutos

Velocidad de descarga =30 minutos

$$\text{Porcentaje de carga} = 100 - 66.66 = 33.34$$

Ec. 15

Una vez que se aplicó la Ec. 10 a todos los valores de cada una de las velocidades de descarga se generó una tabla en Excel con estos, en la tabla 10 se puede observar algunos de los resultados de estos cálculos, esta tabla en Excel consta de 10 columnas y 129 filas.

Cada una de las columnas con el título Vol. contiene el voltaje que se tiene en un determinado tiempo y las columnas con título Vol. número C, representan el SOC de la batería. De las 129 filas representan 128 representan las mediciones de voltaje y SOC y la restante los títulos de identificación.

Tabla 10 Fragmento de base de datos de voltaje (V) y estado de carga SOC (%) (elaboración propia en Excel)

Vol. 2C	2C	Vol. 1C	1C	Vol. 0.5C	0.5C	Vol. 0.33C	0.33C	Vol. 0.2C	0.2C
14	99.933	14	99.967	14	99.983	14	99.989	14	99.993
13.9	99.867	13.8	99.933	13.94	99.967	13.96	99.978	13.98	99.987
13.8	99.8	13.7	99.9	13.9	99.95	13.85	99.967	13.95	99.98
13.7	99.733	13.55	99.867	13.8	99.933	13.8	99.956	13.9	99.973
13.5	99.7	13.4	99.85	13.7	99.925	13.73	99.95	13.81	99.97
13.3	99.35	13.3	99.675	13.6	99.838	13.66	99.892	13.76	99.935
12.9	93.333	13.15	96.667	13.45	98.333	13.58	98.889	13.67	99.333
12.8	90	13.03	95	13.4	97.5	13.52	98.333	13.6	99
12.7	83.333	12.95	91.667	13.3	95.833	13.46	97.222	13.53	98.333
12.6	73.333	12.91	86.667	13.2	93.333	13.38	95.556	13.48	97.333
12.58	66.667	12.875	83.333	13.15	91.667	13.33	94.444	13.41	96.667
12.53	60	12.85	80	13.12	90	13.29	93.333	13.38	96
12.5	53.333	12.8125	76.667	13.11	88.333	13.26	92.222	13.35	95.333
12.45	46.667	12.81	73.333	13.08	86.667	13.22	91.111	13.3	94.667
12.4	40	12.79	70	13.07	85	13.2	90	13.28	94
12.355	33.333	12.78	66.667	13.0625	83.333	13.187	88.889	13.26	93.333
12.25	26.667	12.76	63.333	13.05	81.667	13.181	87.778	13.24	92.667
12	20	12.75	60	13.04	80	13.173	86.667	13.23	92
11.6	13.333	12.74	56.667	13.03	78.333	13.166	85.556	13.222	91.333
10.9	6.6667	12.73	53.333	13.015	76.667	13.16	84.444	13.21	90.667
9.88	0	12.71	50	13.01	75	13.15625	83.333	13.215	90

Al hacer los cálculos con todas las velocidades los datos ahora ya tienen la relación que se buscaba, para poder analizar de una manera visual se generó la curva de toda la tabla de Excel se puede ver en la figura 25 las cinco curvas y como es de esperar cuando la batería tiene un voltaje alto en este caso 14 V el SOC se aproxima a 100% y en caso contrario es decir 10 V el SOC llega al valor de 0, además se observa que cada una de las curvas es distinta entre sí.

De las características de cada una de las curvas se puede decir que: la curva en color morado que representa 0.2 C está desfasada hacia la derecha en el eje “x”, esto significa que el porcentaje de carga es menor con relación al voltaje a descargas con periodos de tiempo grandes o lentos, esto también se observa en las curvas de 0.33 C y 0.5 C en color verde y azul respectivamente.

Caso opuesto la curva de 2 C está desfasada hacia la izquierda en el eje “x”, esto indica que el porcentaje de carga es mayor con relación al voltaje en una descarga rápida como lo es 30 minutos en comparación a una lenta de 0.2 C (300 minutos).

Al mismo tiempo, se observa como ahora en el eje “x” se encuentran los valores de voltaje y en el eje “y” el porcentaje de estado de carga de la batería a diferencia de la gráfica original donde el eje “x” representa el tiempo de descarga y el “y” el voltaje.

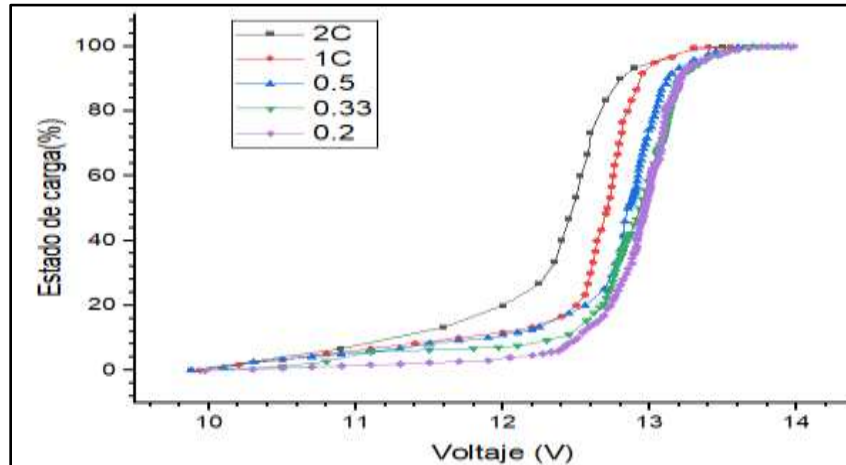


Figura 25 Ejemplo de sustitución para encontrar la relación entre el porcentaje de carga y voltaje con un tiempo de 20 minutos (elaboración propia en Origin 2023)

Con la finalidad de tener una base de datos confiable que funcione como base matemática para la elaboración de software de administración energética, se aproximan los datos en la mayor medida de lo posible por estos motivos se van a trasladar a un software especializado en este tema.

Para elaborar la base de datos se utilizó el software Origin 2023, del cual ya se habló en anteriores capítulos, el proceso que se siguió se enuncia en los siguientes párrafos.

Como ya se mencionó con anterioridad, se puede encontrar entre las pestañas del entorno de Origin 2023 una en la cual se visualiza el modelo matemático de las curvas de voltaje vs SOC que se generaron de la base de datos de Excel.

El modelo matemático se encuentra en la Ec.16 es de tipo descriptivo, sirve para explicar, conocer y determinar el comportamiento de la batería.

Para validarlo se aplica en cada una de las cinco velocidades, donde el valor de “y” es el valor del SOC de la batería y la incógnita “x” pertenece al voltaje de esta, conjuntamente tiene siete parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$.

$$y = A1 + (A2 - A1) \left[\frac{p}{1 + 10^{(LOGX01 - x)h1}} + \frac{1 - p}{1 + 10^{(LOGX02 - x)h2}} \right]$$

Ec. 16

En la figura 26 aparece un ejemplo donde se toma un valor de voltaje al azar en este caso 12 V, y se encierra con flechas en color verde el rango de la imagen en el que está contenido, es muy importante resaltar que a pesar de que el valor del voltaje es el mismo para las cinco curvas, el SOC no lo es, por ejemplo, la curva de 0.2 C el valor es aproximadamente 4%, mientras que en 2 C se acerca a 20%.

Esto sucede a causa de que la batería se descarga más rápido cuando el ciclo de descarga es en un corto de tiempo, entonces el SOC decrementa de manera más rápida en comparación con un periodo de tiempo largo.

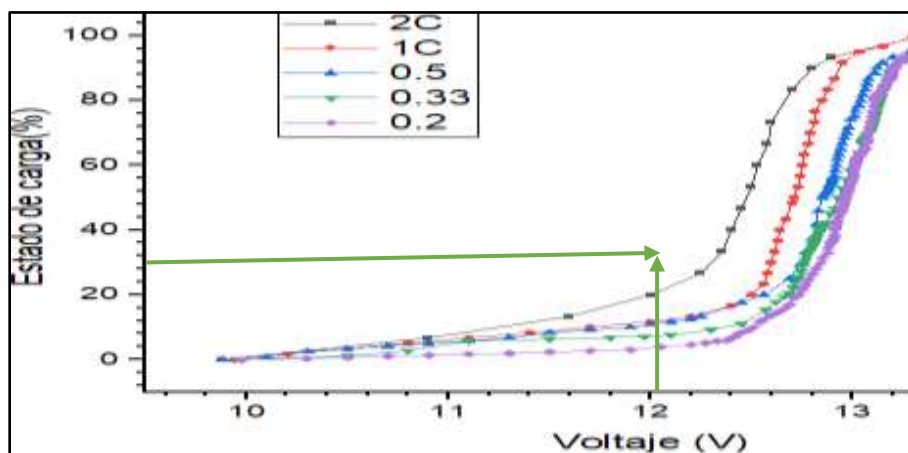


Figura 26 Ejemplo de la importancia de la tasa de descarga en una batería las curvas de voltaje (elaboración propia Excel)

En este primer ajuste de curvas el modelo matemático solo contiene al voltaje y al SOC, es necesario que se tome en cuenta la tasa de descarga, para que así se integre este concepto al modelo y de esta manera poder contar con los tres ejes de prioridad que constituyen las curvas de descarga de la batería que se seleccionó.

Por este motivo se tomó la decisión de realizar un segundo ajuste de curvas en la cual se va a introducir la tasa de descarga para ver como es el comportamiento de cada una de ellas.

En este proceso se comenzó con tomar los parámetros de cada una de las cinco velocidades (c entonces en este punto se tienen cinco valores de $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$, después grafico cada uno de los valores, al tener estas graficas se observó que los valores pertenecientes a la velocidad 0.33 C, no guardan relación con los demás entonces, se tomó la decisión de omitir estos valores en este proceso.

Continuando con el proceso se graficaron los valores de los parámetros de las cuatro velocidades 0.2 C, 0.5 C, 1 C y 2 C, la figura 27 muestra las siete graficas que pertenecen a

cada parámetro. Se puede ver que las únicas curvas que guardan un parecido entre sí son las de los parámetros $A1$ y $h2$, las demás son diferentes entre sí.

Para encontrar el modelo de estas curvas se utilizó la herramienta de función análisis, de igual manera se buscó una curva que se aproximara, en estos casos en particular se utilizaron diferentes tipos de curvas, pues como se puede ver en la figura 27 las curvas son diferentes entre sí.

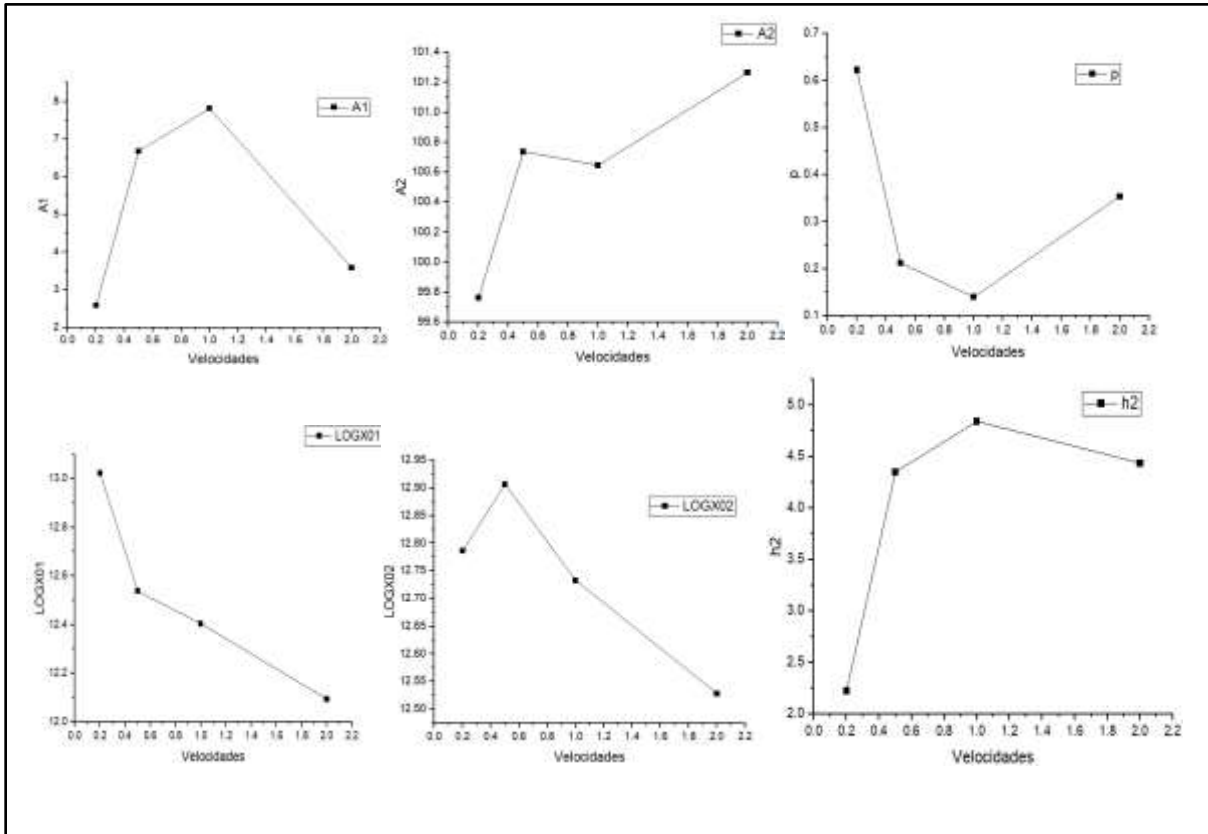


Figura 27 Grafica de parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$ (elaboración propia Origin 2023)

Luego de seleccionada la función adecuada para cada parámetro de las cuatro velocidades de descarga, se genera de nueva cuenta una ecuación que contiene el modelo matemático y los parámetros de los que está constituido.

Para introducir la tasa de descarga en el modelo matemático se toman cada una de las ecuaciones y se sustituye el valor de "x" por la velocidad de descarga, es decir $0.2 C$, $0.5 C$, $1 C$ y $2 C$. Al realizar esto se encontró un valor más exacto de cada uno de los parámetros en las cinco velocidades, la figura 28 lado izquierda, muestra un ejemplo de cómo se aproximó la gráfica del parámetro $h1$, donde la curva en color negro es la original y en color rojo la generada con el software, también se puede ver en el lado derecho un acercamiento del

recuadro donde se encuentra el modelo de la aproximación de las variable $h1$ y las variables que a su vez resultan de esta aproximación en este caso $A1$, $t1$ y $Y0$.

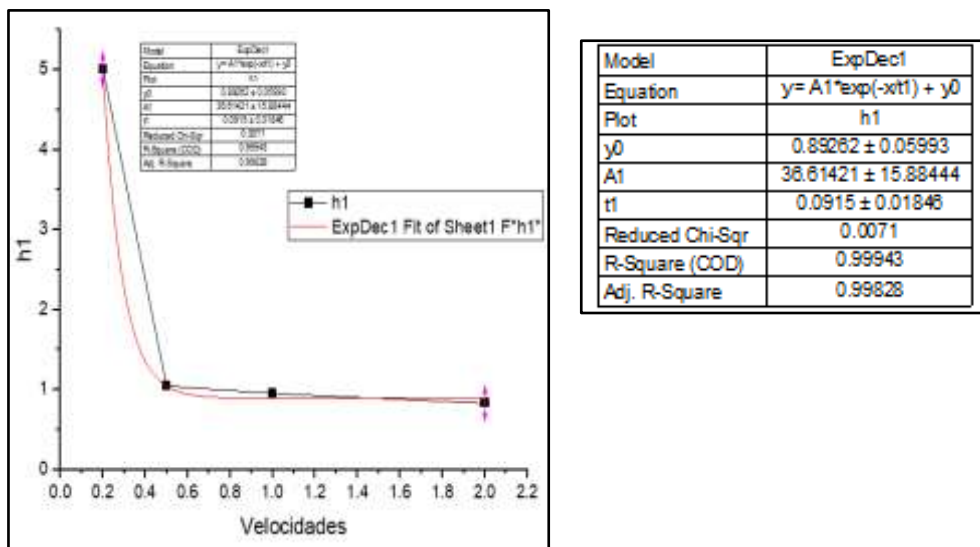


Figura 28 Ejemplo de segundo ajuste de curvas con el parámetro $h1$ y un acercamiento a su modelo matemático (elaboración propia Origin 2023)

En la tabla 11 aparece una recopilación de todas las ecuaciones que generan los modelos matemáticos del segundo ajuste de curvas de los parámetros, en el lado izquierdo aparecen las ecuaciones con todas las variables que involucran, donde “x” es la velocidad de descarga, en parte derecha se encuentra el valor que tiene cada variable, estos son proporcionados cuando se genera la aproximación.

Se observa que el número máximo de variables es cinco y corresponde los parámetros $A1$ y $LOGX02$ todos los demás cuentan con cuatro variables.

Tabla 11 Recopilación de ecuaciones resultantes de modelo matemático de los parámetros A1, A2, p, LOGX01, LOGX02, h1 y h2 (elaboración propia en Excel)

Ecuación A1	A	B	C	D
$A1 = A + B*x + C*x^2 + D*x^3$	-2.10447	27.77925	-23.39232	5.45875
Ecuación A2	a	b	c	
$A2 = a*x^(b*x^(-c))$	100.91202	0.0042	-0.81796	
Ecuación LOGX01	a	b	c	
$LOGX01 = a*x^(b*x^(-c))$	12.33526	-0.02742	0.11724	
Ecuación LOGX02	Y0	xc	W	A
$LOGX02 = y0 + A * \exp(-0.5 * ((x - xc) / w)^2)$	12.52811	0.5	0.36215	0.37853
Ecuación h1	Y0	A1	t1	
$h1 = A1 * \exp(-x / t1) + y0$	0.89262	36.61421	0.0915	
Ecuación h2	A	B	C	
$h2 = A + B*x + C*x^2$	1.38682	6.00105	-2.24871	
Ecuación p	a	b	C	
$p = a - b * c^x$	0.13437	-1.50689	0.00356	

En la tabla 12 se presentan los resultados del segundo ajuste, en *h1*, *p*, *LOGX01*, *LOGX02* los valores son muy similares y van en aumento a medida que el valor de la velocidad de descarga disminuye.

En cuanto a los demás parámetros no existe una relación clara pues tienen variaciones bastante notables como, por ejemplo: *A1* tiene valores que incrementan de 0.33 C a 1 C pero, al llegar a 2 C disminuye, lo mismo sucede con *h2*, mientras que en *A2* los valores de 0.33 C a 2 C van en aumento y el primer valor de 0.2 C que es el más pequeño tiene un valor alto en comparación a 0.33 C que es el valor que lo precede.

Tabla 12 Resultados de la sustitución de valores en cada ecuación resultante de la segundo ajuste (elaboración propia Excel)

0.2C						
A1	A2	LOGX01	LOGX02	h1	h2	P
5.912	100.9544	12.9812	13.31	2.00808	1.88	2.304

0.33C						
A1	A2	LOGX01	LOGX02	h1	h2	P
4.711	100.722	12.770	12.867	1.887	3.122	2.053

0.5C						
A1	A2	LOGX01	LOGX02	h1	h2	P
6.6194188	100.9197597	12.59219199	12.90664	1.04	3.8251675	1.1395

1C						
A1	A2	LOGX01	LOGX02	h1	h2	P
7.74121	100.9262826	12.42508	12.6740517	0.95	5.13916	1.0693

2C						
A1	A2	LOGX01	LOGX02	h1	h2	P
3.55475	100.9604535	12.09	12.52818125	0.83	4.39408	0.96211

Hasta este punto ya se tienen incluidos los tres conceptos fundamentales que se mencionaron con anterioridad: SOC, voltaje y tasa de descarga. Para finalizar, en el modelo matemático resultante del primer ajuste de curvas se sustituyeron los valores nuevos los parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$ una vez que se realizó este cambio en la hoja de Excel donde se está trabajando, se generan los valores para una aproximación más cercana y que cubre con unas buenas bases matemáticas enfocadas en el modelado de las baterías.

Cuando se tienen los datos del segundo ajuste, se puede continuar con la primera y sustituir en el modelo matemático los valores de los parámetros $A1$, $A2$, p , $LOGX01$, $LOGX02$, $h1$ y $h2$, como ya se indicó con anterioridad el valor de “y” es el SOC de la batería y “x” el voltaje.

La tabla 13 muestra la base de datos resultante del modelo que se realizó de la batería, para identificar el comportamiento de las curvas se analizaron las velocidades de descarga más

alta y baja, para que resalten las características de la variación de tiempo de descarga de una batería.

La hoja de datos tiene como características cinco columnas que pertenecen a la velocidad de descarga donde se encuentran como título cada una (tabla 13), además de esto cuenta con una columna en donde se registró el nivel de voltaje el cual comienza en 11 V y va incrementando 0.1 V hasta llegar a 14 V.

Es importante mencionar que el SOC más alto 8.69 % en el nivel más bajo de voltaje, es decir, 11 V pertenece a 2 C, esto indica que en la velocidad de 2 C el SOC va disminuyendo de manera más rápida en comparación con los otros cuatro valores, esto sucede porque es una tasa de descarga rápida, en este caso la batería se descarga en 30 minutos, mientras que en 0.2 C se descarga en 300 minutos, por este motivo el SOC decrece de manera muy rápida en 2 C.

También se puede observar que en 0.2 C el SOC decrece de manera muy lenta pues es el caso contrario de 2 C, además cuando alcanza el valor máximo de voltaje 14 V su SOC es el más aproximado a 100%, mientras que todos los otros presentan valores menores.

De manera general se puede ver en todas las velocidades de descarga que el comportamiento descrito en 2 C y 0.2 C se encuentra en cada una, por esto motivo se puede concluir que es un buen modelo matemático el que se desarrolló para fundamentar las líneas de código que generaran el software de administración energética.

Tabla 13 Tabla de todos los valores de SOC con las cinco velocidades de descarga, comparados con el voltaje (elaboración propia Excel)

Voltaje	0.2C	0.33 C	0.5C	1C	2C
11.00	0.86	1.39	2.71	4.08	8.69
11.10	1.08	1.74	3.40	5.08	10.69
11.20	1.36	2.18	4.24	6.32	13.09
11.30	1.71	2.74	5.29	7.84	15.93
11.40	2.14	3.43	6.58	9.68	19.24
11.50	2.69	4.29	8.15	11.91	23.05
11.60	3.37	5.35	10.07	14.57	27.35
11.70	4.21	6.67	12.39	17.71	32.10
11.80	5.26	8.29	15.16	21.38	37.25
11.90	6.56	10.26	18.44	25.58	42.69
12.00	8.16	12.67	22.26	30.31	48.30
12.10	10.11	15.55	26.63	35.53	53.93
12.20	12.49	18.99	31.56	41.16	59.44
12.30	15.36	23.03	37.00	47.07	64.71
12.40	18.79	27.71	42.85	53.13	69.61
12.50	22.83	33.02	49.00	59.17	74.10
12.60	27.52	38.92	55.28	65.02	78.12
12.70	32.88	45.33	61.52	70.54	81.66
12.80	38.88	52.09	67.54	75.60	84.75

12.90	45.42	59.01	73.18	80.14	87.41
13.00	52.37	65.84	78.31	84.10	89.68
13.10	59.51	72.35	82.84	87.48	91.60
13.20	66.62	78.32	86.74	90.31	93.23
13.30	73.42	83.58	90.00	92.63	94.60
13.40	79.67	88.03	92.66	94.49	95.75
13.50	85.18	91.64	94.77	95.97	96.70
13.60	89.82	94.46	96.41	97.13	97.49
13.70	93.55	96.58	97.65	98.03	98.15
13.80	96.42	98.11	98.58	98.71	98.69
13.90	98.51	99.17	99.26	99.23	99.13
14.00	99.95	99.89	99.75	99.63	99.48

Al finalizar la base de datos, se decidió hacer el gráfico para poder visualizar de una mejor forma el comportamiento de los datos con relación a las cinco velocidades.

La figura 29 representa el resultado de las dos aproximaciones que se hicieron para tener un modelo matemático de la batería que incluyera el voltaje, velocidad de descarga y SOC. En el eje “x”, se encuentran los valores de voltaje, en “y” el estado de carga SOC. Se puede observar como las curvas varían dependiendo la velocidad de descarga.

En el caso de la curva de 2 C en color verde está desfasada hacia arriba en el eje “y”, es decir que teniendo el mismo valor de voltaje en cualquiera de las demás curvas su nivel de SOC es más elevado, por ejemplo: si se toma el valor de 11.4 V en las curvas de 2 C y 1 C (color morado), se puede observar en la figura 29 que en la primera, el valor de SOC se aproxima a 20%, mientras que en la segunda es de 10% la causa de esto es el tiempo de descarga en el caso de 2 C es de 30 minutos, entonces los valores de SOC van decreciendo de manera rápida, mientras que en 1 C con el doble de tiempo es decir 60 minutos, el SOC decae de una

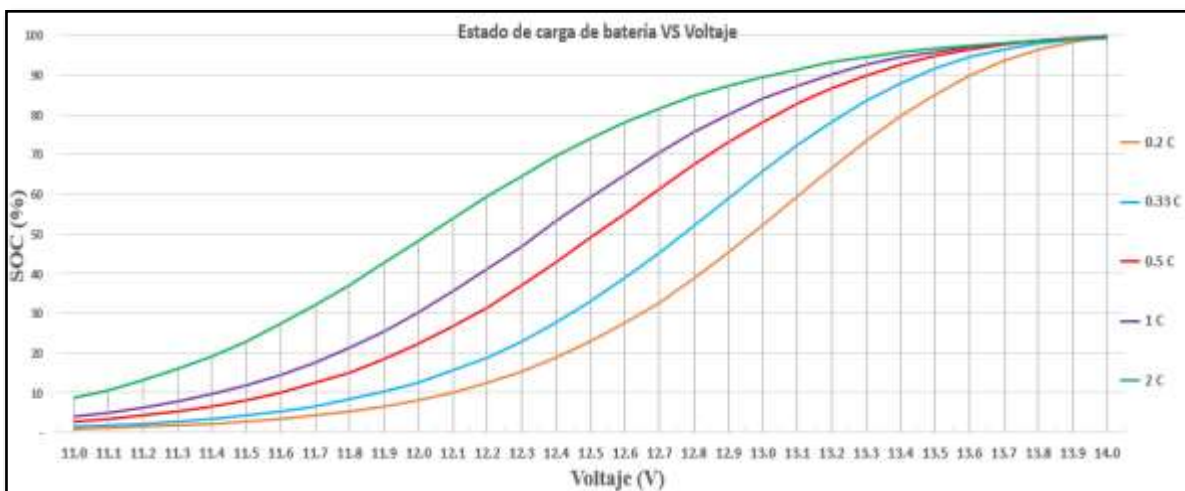


Figura 29 Curvas de voltaje vs estado de carga, generadas a partir del segundo ajuste del modelo matemático (elaboración propia en Excel)

manera más lenta en comparación con 2 C, por este motivo se tienen diferentes valores de SOC en un mismo valor de voltaje.

Por otro lado, cuando la velocidad de descarga es lenta, como por ejemplo en la curva de 0.33 C en color azul, si se toma un nivel de voltaje el valor de SOC es pequeño en comparación con cualquier curva que represente una velocidad de descarga más rápida, esto se puede observar en la figura 30 con el voltaje de 11.6, mientras que la curva de 0.33 C apenas se aproxima al 5%, la de 0.5 C en color rojo ya está en el 10%.

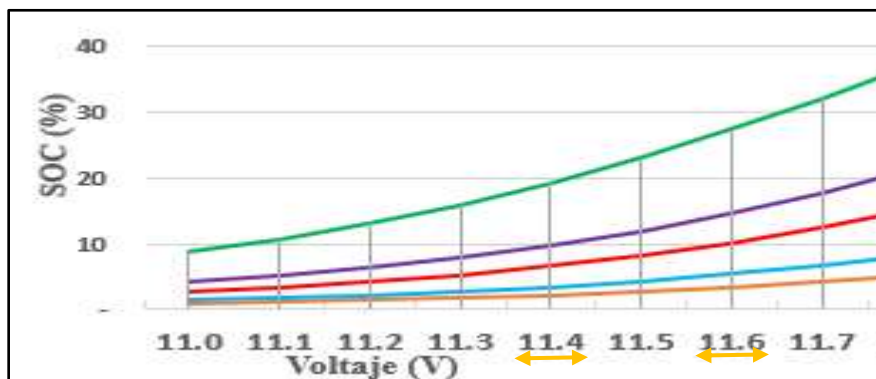


Figura 30 Ejemplo de comparación de SOC con un mismo voltaje en diferentes curvas (elaboración propia en Excel)

En esta etapa del proyecto ya se analizó, seleccionó y se realizó un modelo matemático del método de estimación mediante voltaje, para el cálculo de SOC, de la batería de iónLitio seleccionada con anterioridad, lo siguiente es desarrollar un algoritmo que dé prioridades de uso de cargas de acuerdo con combinaciones de encendido de estas y al estado de carga de la batería, a partir de una tabla de verdad.

4.3 Tabla de verdad para activación de cargas

Para la elaboración de las combinaciones se toma en cuenta la priorización de los elementos en función de la necesidad fundamental, es decir: en primer lugar su utilización para preservar alimentos, como por ejemplo el refrigerador, en segundo lugar el alumbrado, aquí se encuentran bombillas de bajo consumo para iluminación tanto externa como interna, en tercera posición preparar alimentos, en particular la licuadora y el horno de microondas, en penúltima posición la comunicación esto es celular, y router, por último entretenimiento, en otras palabras televisión (INEGI, Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares, 2018).

En la tabla 14 se puede apreciar el nivel de priorización de cargas, la tabla está compuesta por 3 columnas y cinco filas, el sistema desarrollado para este trabajo tiene cinco niveles de priorización y la demanda que requiere es de 1.124kWh.

Para subdimensionar el sistema al 50% se tomó el valor de 1.124kWh y se dividió a la mitad, esto da como resultado 562Wh en base a este valor se buscó una batería que cubra con las características del sistema.

En este punto del trabajo ya se cumplió con el objetivo de determinar que cargas se energizan en una casa habitación para satisfacer necesidades básicas de una familia, la tabla 14 muestra el resultado de este objetivo.

Tabla 14 Tabla de priorización de los ocho electrodomésticos, siendo uno el nivel de mayor prioridad y cinco el de menor prioridad (elaboración propia en Excel)

Tabla de priorización		
Nivel de Prioridad	Elementos	Energía total en 5 hrs (Wh)
1	Refrigerador	750
2	Bombillas	130
3	Horno de microondas-licuadora	152.5
4	Celular-Router	36
5	Televisión	84
Total de cargas en 5 horas (Wh)		1152.5

Al terminar con el dimensionamiento y priorización de cargas, se continúa con el tercer objetivo: desarrollar un algoritmo que dé prioridades de uso de cargas de acuerdo con combinaciones de encendido de estas y al estado de carga de la batería (SOC), a partir de una tabla de verdad.

Para cumplir con este objetivo fue necesario desarrollar un modelo matemático de la batería que se eligió, para que a partir de este se conociera su comportamiento en distintos niveles de carga.

Además de lo anterior se requiere elaborar la tabla de verdad con todas las combinaciones de encendido de cada electrodoméstico, una vez que se tienen estos elementos se comenzó con el desarrollo del código en Matlab 2022 academic, con la finalidad de generar una interfaz de usuario pueda administrar el poco recurso que tiene.

En los siguientes párrafos se narran los resultados de cada uno de estos dos procesos donde se priorizaron todos los electrodomésticos de acuerdo con su uso y tomando en cuenta el SOC de la batería se analizó la base de datos en la cual se encuentran todas las combinaciones de las nueve variables de entrada.

Después de examinar la base de datos se encontró que algunos resultados son incoherentes con la aplicación del sistema, por ejemplo, existían combinaciones en donde más de una casilla correspondiente a los tres estados de carga de la batería tenía valor de verdad, es decir un uno, y eso en la práctica no es posible, pues en el sistema que se propone como caso de estudio no se puede tomar dos estados de carga al mismo tiempo, esto provocaría conflictos en cuanto al encendido de cargas, debido a la dependencia con respecto al nivel de carga, en casos como este no se sabría cuál de los dos estado se tomaría en cuenta, por este motivo se comenzaron a filtrar los datos para evitar posibles conflictos futuros.

Después de esto se eliminaron las filas en donde todos los estados de carga tienen un valor de cero, esto por el motivo que se necesita un mínimo valor de carga para mantener encendido el refrigerador y la iluminación externa.

Al filtrar los datos resulto una tabla con 189 combinaciones, para determinar las condiciones de encendido de las variables de salida se optó por tomar el grupo de combinaciones perteneciente a cada estado de carga y generar una hoja de cálculo para tratarlos de manera individual.

Lo siguiente que se hizo fue poner las variables de salida, se aumentaron seis columnas a cada base de datos, para que cada una de éstas tengan el resultado de encendido o apagado de cada electrodoméstico.

Para ver las condiciones de encendido, se utilizó la función “If”, en donde se estableció que se necesitaba tener un porcentaje mayor del 25% para tener encendido el refrigerador y la iluminación externa, a partir de ese porcentaje se establecieron los tres rangos de SOC.

La tabla 15 muestra la base de datos del rango de porcentaje de 25-50%, las columnas en color rosa representan las variables de entrada, mientras que las amarillas las variables de salida. En cada una de las hojas de cálculo se utilizó la herramienta de condiciones lógicas “If” que permite comparar lógicamente el resultado que se espera y un valor de entrada, por este motivo fue la condición que mejor se adaptó a las características del trabajo, pues se desea conocer el resultado de encendido de un electrodoméstico con relación al estado de carga de la batería y al nivel de priorización.

Como en este caso se presenta el rango más pequeño solo se pueden encender dos electrodomésticos, en caso de que el usuario desee encender dos o más electrodomésticos la condición “If” pondrá valores de encendido en las cargas con mayor prioridad, esto se ve claramente en la fila subrayada en azul donde se quiere encender celular, router y televisión, en esta situación las cargas con mayor prioridad son celular y router, se puede apreciar en la parte donde se encuentran las variables de entrada que en efecto los electrodomésticos se encendidos son celular y router, pues televisión es la carga de menor priorización, entonces se encuentra apagada.

Tabla 15 Fragmento de base de datos carga de 25-50%, donde se observa un ejemplo del encendido y apagado en función de priorización y SOC (elaboración propia en Excel)

						Carga						
Int.	Hor.	Lic.	Cel	Rou	T. V	25 -50%	Int.	Hor	Lic.	Cel	Rou	TV
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1

Para el rango de 50.1-75% se realizó el mismo procedimiento y en este caso se pueden encender tres cargas como máximo, la tabla 16 muestra un ejemplo donde se quieren encender todos los electrodomésticos (indicado con una flecha azul), al observar en las variables de salida los electrodomésticos que se encendieron fueron: iluminación interna, horno de microondas y licuadora.

Esto deja en claro que se encendieron las tres cargas que tienen mayor nivel de prioridad, y las que son de menor nivel se encuentran apagadas.

Tabla 16 Fragmento base de datos carga de 50.1-70%, donde se observa un ejemplo del encendido y apagado en función de priorización y SOC (elaboración propia en Excel)

Int.	Hor.	Lic.	Cel	Rou	T. V	Carga		Int.	Hor	Lic.	Cel	Rou	TV
						50.1 -75%							
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	
1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	

La tabla 17 muestra un fragmento del resultado que pertenece al nivel de carga de 76.1-100%, en este caso se pueden encender como máximo cinco de las seis cargas, se alcanza a ver que en la última combinación de encendido se solicita encender todo, cuando se pasa a la parte de la combinación donde aparece que se enciende el único electrodoméstico que no está encendido es la televisión, pues en anteriores párrafos se mencionó que su nivel de priorización es el más bajo (entretenimiento).

Tabla 17 Fragmento base de datos carga de 76.1-100%, donde se observa un ejemplo del encendido y apagado en función de priorización y SOC (elaboración propia en Excel)

Int.	Hor.	Lic.	Cel.	Rou	T.V.	Carga		Int.	Hor.	Lic.	Cel.	Rou.	T.V.
						75.1-	100%						
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Cada una de las tres bases de datos desarrollada para los distintos niveles de estados de carga, consta de 63 combinaciones y en cada una de ellas se encuentran siete variables de entrada y seis de salida. Los resultados de generar todas las combinaciones de encendido apagado, con base a condiciones de estado de carga de la batería (SOC) y nivel de priorización de cada elemento, se traducen en un algoritmo capaz de administrar el recurso energético que se encuentra en la parte de almacenamiento, por este motivo es fundamental el desarrollo de las combinaciones, pues es la base para el software de administración energética.

Es necesario mencionar que si el usuario requiere encender un solo electrodoméstico esto se puede hacer sin ningún problema, no hace falta que se solicite el número máximo de encendido que corresponde a cada nivel de SOC.

Al terminar con el proceso de las tablas de verdad para el encendido de cada carga, ya se tienen todos los elementos necesarios para desarrollar el programa que administre la energía que se tiene, en los siguientes párrafos se narra este procedimiento.

4.4 Software de administración energética

4.4.1 Algoritmo de administración

En este apartado se muestran las líneas de código que se desarrollaron en el lenguaje de programación de Matlab, a grandes rasgos el programa comienza con la declaración de variables locales, seguido por una variable de entrada que se pide al usuario (voltaje de batería), una vez que se calcula el SOC de batería con respecto al voltaje se tienen tres bloques de programación uno para cada nivel de SOC.

En cada uno de los bloques se programaron todas las combinaciones de la tabla de verdad correspondiente a cada nivel de SOC, dentro de cada bloque se establecieron las condiciones para poder encender una carga, y como impresión de pantalla aparece el estado en que se encuentra cada electrodoméstico en la combinación de salida.

Para que se repita este ciclo un número de veces indefinido se utilizó el comando “*while*”, en caso de que el voltaje de batería no se encuentre en el rango de funcionamiento, el algoritmo cuenta con unas líneas de código donde se sale del ciclo “*while*” y se pide una vez más el voltaje de batería.

En conjunto el algoritmo tiene un total de 258 líneas de código y se puede repetir de manera indefinida si cumple con dos criterios: que el voltaje se encuentra entre los valores de operación de batería y el porcentaje de carga no sea menor a 25%, este último debido a que es necesario tener este valor para mantener encendido el refrigerador e iluminación externa durante todo el periodo en que se dimensionó el sistema.

La figura 31 muestra cómo se desarrolló el código en base al diagrama de flujo, se puede observar en la línea 20 subrayada en rojo que se pide al usuario el ingreso del voltaje de batería, esto a causa de la selección del método de estimación mediante medida directa, en este caso es necesario estar monitoreando constantemente este valor.

Lo ideal es que se tenga un dispositivo encargado de esa tarea pero, por cuestiones de costos, esto no fue posible, así que el programa se diseñó de tal modo que este valor lo introduzco el usuario.

```

20 voltaje1=input('Voltaje de batería');
21 A11=3.55; %A11%
22 A2=(a*m^(b*m^(-c)));
23 p=0.96;
24 log1=13.9;
25 log2=(Y0+A*exp(-0.5*((m-xc)/w)^2));
26 h1=(Ah1*exp(-m/t1) + Y01);
27 h2=(Ah2+ Bh2*m+ Ch2*(m^2));
28 velocidad = (A11+(A12-A11))*(p/(1+10^(LOGx01-voltaje1)*h11))+((1-p)/(1+10^(LOGx02-voltaje1))*h22)
29
30
31 if (voltaje1>=12)&&(voltaje1<=14)
32 %Inicio del proceso cuando el estado de carga 20 a 50%
33 if (velocidad>=20)&&(velocidad<=50)
34 %Elementos%
35 interna=input('Encender foco en habitación ');
36 hornos=input('Horno ');
37 licuadora1=input('Licuadora ');

```

Figura 31 Fragmento del código, donde aparece el inicio del programa al pedir el voltaje de la batería, y la línea de código con el modelo matemático (elaboración propia Matlab 2022 academic)

En la línea 28 subrayada en color rojo se muestra el modelo matemático de la batería, esto para saber el valor de SOC con respecto al voltaje de batería.

A continuación en la línea 31 subrayada se encuentra una condición donde aparecen un rango de voltaje de 12 a 14 V este rango representa el periodo en que funciona la batería. Como las combinaciones de encendido dependen del nivel de SOC las siguientes líneas de código se agruparon según el valor que resulte de este, se puede ver que en la siguiente parte subrayada está una condición para el rango de SOC del 25.1-50%.

Para continuar con el código se tiene que programar las combinaciones de la tabla de verdad, en la figura 32 aparecen subrayadas las líneas donde se escribió la condición “If” que se utilizó en la tabla de verdad.

```

280 Ni1=horno1+interna;
281 Ni2=horno1+interna+licuadora1;
282 Ni3=horno1+interna+licuadora1+celular1;
283 Ni4=horno1+interna+licuadora1+celular1+router1;
284
285 %Foco%
286 if interna==1
287     disp('Foco encendido');
288     in=1;
289 elseif interna==0
290     disp('Foco apagado');
291     in=0;
292 end
293 %Horno%
294 if horno1==1&&interna<=1
295     disp('Horno encendido');
296     ho=1;

```

Figura 32 Fragmento del código, donde aparece las condiciones para encender un electrodoméstico y las impresiones de pantalla dependiendo la combinación de variables de salida (elaboración propia Matlab 2022 academic)

Una vez que se establecieron las condiciones “If” para cada elemento de carga, las siguientes líneas se enfocan en la impresión de pantalla para mostrar el valor de encendido o apagado de cada carga

Por ejemplo, si se asigna un valor de “1” a la variable interna y en la combinación de salida aparece con un valor de “1” en la pantalla aparecerá la leyenda de “Foco encendido”, de lo contrario aparecerá la leyenda “Foco apagado”. En la programación de los demás electrodomésticos se siguió la misma lógica.

En los otros dos ciclos restantes se utiliza el mismo proceso, comenzando con solicitar el voltaje para calcular el SOC correspondiente al valor de voltaje, luego entrar en el subproceso que corresponde a ese estado de carga y por último seleccionar el electrodoméstico que se desea encender, y que el programa busque esa combinación en la tabla de verdad para arrojar en la pantalla la leyenda de encendido y apagado que corresponden a cada carga.

Al tener el software de administración energética terminado es esencial correr el programa y ver si de verdad funciona como se espera, para así observar si el software cumple con su objetivo de administrar un recurso limitado.

A continuación, se presentan una serie de ejemplos donde se encuentran los resultados que arrojó el seleccionar la misma combinación pero, con diferente nivel de voltaje, en la figura 33 aparecen cuatro imágenes, cada una dividida con una línea roja, la parte superior es la combinación de entrada es decir, lo que el usuario desea encender, mientras que la parte de abajo representa la combinación de salida, en donde se indica con un texto en qué estado se encuentra cada carga.

En la primera imagen parte superior izquierda se presenta el primer caso donde el valor de voltaje es 14 V y el usuario desea encender todos los electrodomésticos, se puede apreciar que en la parte inferior el único electrodoméstico que no se encendió fue T.V, esto porque como se mencionó con anterioridad el número máximo de cargas que se puede encender es cinco, pese a tener un alto nivel de SOC.

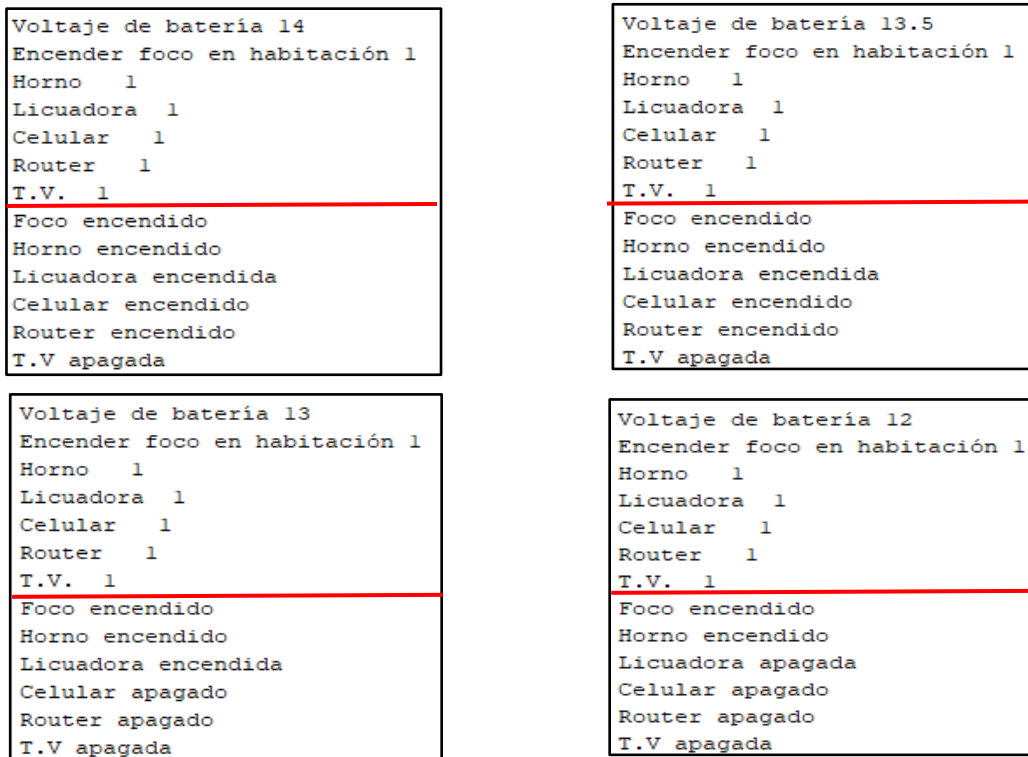


Figura 33 Aparece un ejemplo donde se ve la priorización de cargas en función al estado de carga SOC y al uso de electrodoméstico (elaboración propia Matlab 2022 academic)

También se puede ver que cuando el voltaje es 13.5 V segundo caso parte superior derecha, sucede lo mismo, pues el nivel de SOC es suficiente para encender cinco de las seis cargas, de acuerdo con la tabla de verdad este nivel se encuentra en el rango de 70.1-100%, y permanece apagado lo que tiene menor nivel de priorización, en este caso el televisor, entonces se puede deducir que el programa se está ejecutando de forma correcta.

En el tercer caso sucede lo contrario cuando el voltaje es menor a 13 V, en la parte inferior izquierda de la figura 33, se puede observar que solo tres de las seis cargas se encienden, pese a que el usuario solicitó encender todas, esto sucede a causa de las condiciones que tiene internamente el software, debido a la tabla de verdad, es decir que el encendido de cada carga depende de su nivel de priorización y el estado de carga (SOC), por este motivo se encuentran en estado de encendido foco, horno y licuadora, ya que son las de mayor prioridad.

Es importante mencionar que de manera interna se programó una subpriorización dentro de cada nivel de priorización, en este caso se enciende la iluminación y los dos elementos que componen el grupo elaboración de alimentos (horno y licuadora), esto se consigue por el nivel de SOC que permite encender tres electrodomésticos, pero en caso de que solo se puedan encender dos, el nivel de subpriorización se activa.

Por último, en la parte restante de la figura 33 se encuentra el cuarto caso, el voltaje es de 12 V, este valor pertenece al rango más pequeño de SOC 25-50%, de acuerdo con la combinación de entrada el usuario desea encender todos los electrodomésticos, pero, al ver las condiciones, el software solo permite encender dos cargas.

Esto sucede pues el rango de SOC en que se encuentra la batería solo permite encender dos cargar, las cargas que se encienden son las de mayor prioridad, iluminación y elaboración de alimentos, como ya se mencionó con anterioridad es aquí donde se activa la subpriorización pues no se pueden encender los dos electrodomésticos de la categoría de elaboración de alimentos. Así que en las líneas de código cuando se presenten situaciones similares el programa va a encender lo que tenga mayor prioridad en este caso el horno de microondas.

En cuanto a la subpriorización en el grupo de iluminación no existe pues solo es un elemento, en elaboración de alimentos el horno de microondas se encuentra antes que licuadora, pues es más común calentar que licuar algo por la noche.

Para el bloque de comunicación el primer lugar lo ocupa el celular, pues este sirve para el uso que se estableció en el trabajo, sin necesidad de conexión a internet.

El televisor al estar solo en la categoría de entretenimiento no cuenta con líneas de código para subpriorización.

Para analizar los resultados de una corrida del software se eligió el siguiente caso demostrativo, mostrado en la figura 34. En un inicio se supone que el usuario introduce un valor de 13.8 V y quiere encender el foco en una habitación, hacer un licuado, poner a cargar el celular, conectar el internet y encender la televisión, después de introducir esta combinación el software da la combinación de salida, el resultado es que se puede encender todo, menos la televisión.

Posteriormente como se debe de estar monitoreando constantemente el voltaje para saber en estado de SOC está la batería después de haber encendido las cargas el software pide al usuario que introduzca de nueva cuenta el voltaje de batería.

En la imagen se puede ver que el usuario introduce 13.5 V como voltaje de batería y además quiere encender, foco en la habitación, horno y licuadora, como el estado de carga (SOC) es elevado en la combinación de salida se enciende todo lo que el usuario solicitó.

<pre> Voltaje de batería 13.8 Encender foco en habitación 1 Horno 1 Licuadora 1 Celular 1 Router 1 T.V. 1 Foco encendido Horno encendido Licuadora encendida Celular encendido Router encendido T.V apagada Voltaje de batería 13.5 Encender foco en habitación 1 Horno 1 Licuadora 1 Celular 0 Router 0 T.V. 0 Foco encendido Horno encendido Licuadora encendida Celular apagado Router apagado T.V apagada </pre>	<pre> Voltaje de batería 13.2 Encender foco en habitación 1 Horno 0 Licuadora 0 Celular 1 Router 1 T.V. 1 Foco encendido Horno apagado Licuadora apagada Celular encendido Router encendido T.V encendida Voltaje de batería 12.3 Encender foco en habitación 1 Horno 1 Licuadora 1 Celular 0 Router 1 T.V. 0 Foco encendido Horno encendido Licuadora encendida Celular apagado Router apagado T.V apagada </pre>
--	--

Figura 34 Funcionamiento de código, con un caso demostrativo (elaboración propia Matlab 2022 academic)

Después de un determinado momento se desea encender otras cosas, para esto se solicita el voltaje de batería, en este caso es de 13.2 V el foco que está encendido en esta combinación permanece igual además celular, router y televisión se le asigna valor de encendido, entonces el software arroja la combinación de salida, en ella se ve que todo lo solicitado se puede encender, pues el SOC es alto, y corresponde al rango en que se pueden encender cuatro cargas sin necesidad de entrar en las líneas de código que contienen las condiciones “If”.

Al introducir 12.3 V como valor de voltaje de batería, el usuario desea encender el foco en habitación, horno, licuadora y router, se puede ver en la figura 34 que el router no aparece con la leyenda de encendido en la combinación de salida, esto sucede porque con este voltaje el nivel de SOC, no es suficiente para encender cuatro cargas, en esta situación el programa acude a sus líneas de código donde se encuentran las condiciones de encendido de cada electrodoméstico y ejecuta las instrucciones adecuadas para seleccionar cual se enciende y cual permanece apagado. Como router pertenece al grupo de nivel de carga más bajo en comparación con los demás, permanece apagado.

En la figura 35 continúa el caso de estudio demostrativo, al inicio se observa que el voltaje de batería es de 12 V, la combinación de entrada es encender todo excepto foco en habitación, en la combinación de salida solo tiene la leyenda de encendido horno y licuadora, esto sucede debido a que el voltaje es bajo, al querer encender cinco cargas, el software comienza a ver las condiciones de encendido de cada una, una vez finalizada esta tarea el programa determina cual se puede encender, es por esto que los electrodomésticos encendidos son horno y licuadora al ser los de mayor nivel de priorización.

```
Voltaje de batería 12
Encender foco en habitación 0
Horno 1
Licuadora 1
Celular 1
Router 1
T.V. 1
Foco apagado
Horno encendido
Licuadora encendida
Celular apagado
Router apagado
T.V apagada
```

```
Voltaje de batería 11.9
Encender foco en habitación 0
Horno 0
Licuadora 0
Celular 1
Router 0
T.V. 1
Foco apagado
Horno apagado
Licuadora apagada
Celular encendido
Router apagado
T.V encendida
```

```
Voltaje de batería 11.4
Voltaje de batería 11.5
Voltaje de batería 11.6
Voltaje de batería 11.7
Encender foco en habitación 0
Horno 0
Licuadora 0
Celular 0
Router 1
T.V. 1
Foco apagado
Horno apagado
Licuadora apagada
Celular apagado
Router encendido
T.V encendida
```

Figura 35 Continuación funcionamiento de código, con un caso demostrativo (elaboración propia Matlab 2022 academic

Continuando con el ciclo del programa, se puede ver que el siguiente voltaje de batería es 11.9 V, en este caso se quiere encender celular y T.V. la combinación de salida indica que ambos se pueden encender.

Esto pasa ya que solo se quieren encender dos cargas, y como ya se mencionó en anteriores párrafos el nivel mínimo de SOC permite encender como máximo dos cargas, es importante resaltar que independientemente del nivel de priorización las cargas se pueden encender, por ejemplo en este caso, T.V. pertenece al nivel de priorización más bajo y celular uno antes que ésta pero, como no se solicitó encender un electrodoméstico con rango más alto de priorización, sin ningún inconveniente se pueden encender ambas.

Por último, se muestra cual es el valor de voltaje en que opera el programa, en anteriores capítulos se mencionó que el nivel mínimo de porcentaje de SOC para mantener encendido refrigerador e iluminación externa es 25%. El programa está diseñado para cuando se encuentre en casos donde el voltaje de batería señale valores menores a 25%, se solicite una vez más este valor.

En la figura 35, parte superior derecha aparece que en un inicio el voltaje de batería es 11.4 V, como es de esperar de nuevo se solicitó al usuario introducir el voltaje de batería, al poner los valores 11.5 y 11.6 el software pidió una vez más el voltaje, pues con estos valores de voltaje el nivel de SOC se encuentra por debajo del límite establecido.

Al introducir un valor de 11.7 V el programa comienza a solicitar la combinación de entrada, en este caso, se desea encender router y T.V. en la parte de la combinación de salida se observa que en efecto ambos se pueden encender, pues el sistema permite encender como mínimo dos cargas.

Al terminar con el apartado de líneas de código se puede decir que el algoritmo funciona de manera adecuada, pues los resultados son congruentes con los elementos que se desarrollaron en la tabla de verdad para combinación de encendido de cargas y con el modelo matemático de la batería para determinar el SOC con respecto al voltaje.

Una vez que se determinó que el algoritmo trabaja de forma correcta se desarrolló una interfaz de usuario con la finalidad de un entorno más amigable en el momento de manejar el programa.

En el siguiente apartado se menciona de manera detallada el diseño y las líneas de código de la interfaz de usuario.

4.4.2 Interfaz de usuario

En cuanto a la interfaz de usuario esta se desarrolló con ayuda de la herramienta de diseño de App, en Matlab 2022 academic. El propósito general de diseño recae en que el usuario pueda interactuar de manera sencilla con el programa, la figura 36 muestra la vista de diseño.

Se puede ver que tiene siete bloques de valores numéricos de entrada que son: voltaje, interna, licuadora, router, horno, celular y televisión. En la casilla de voltaje se introduce el valor teórico que tiene la batería. En las casillas relacionadas con las cargas los valores que se pueden poner son “1” para encender y “0” para apagado.

Para apreciar de manera visual el estado en que se encuentra la carga junto a cada valor numérico se posicionó un led que cambia de color dependiendo el estado de carga.

En la parte inferior está un botón de accionar, con la leyenda “Encender”, esto se utiliza con la finalidad de que el usuario lo oprima y de este modo comience el ciclo del código.

El botón restante llama al estado de carga (SOC) de la batería después de encender las cargas.

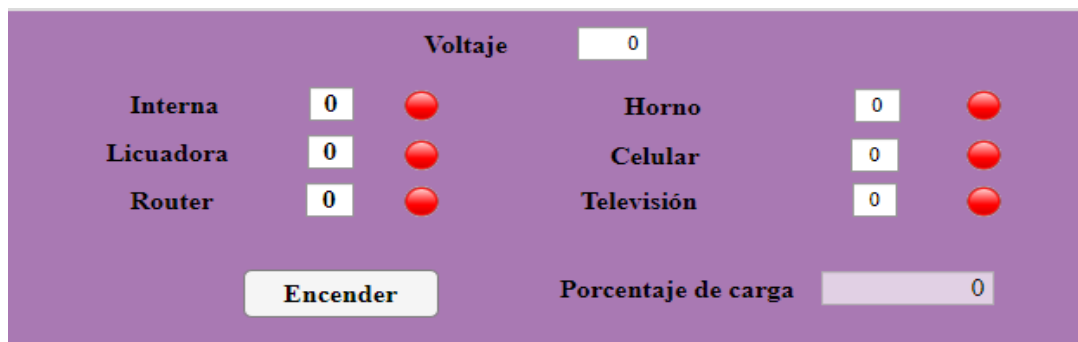


Figura 36 Estructura de interfaz de usuario, donde se ven todos los elementos que la componen (elaboración propia Matlab 2022 academic)

La parte donde más se programó recae en el botón de encendido, pues al presionarlo el algoritmo comienza a hacer todo su proceso, en los demás elementos solo se asignaron las imágenes que representan cada carga. Por último, para visualizar el estado de carga (SOC) se asignó este valor al valor numérico que lleva dicho nombre.

Para verificar que la interfaz funcione de manera adecuada se hace una pequeña prueba, después de oprimir el botón de accionar para que inicie la interfaz, la figura 37 muestra el cómo se introdujo la combinación de entrada donde: el voltaje de batería es de 11.9 V, se quiere encender la licuadora y televisión, hasta este punto aún no se presiona el botón encender, por eso todos los focos son de color rojo, pues el programa se encuentra en un estado inicial.

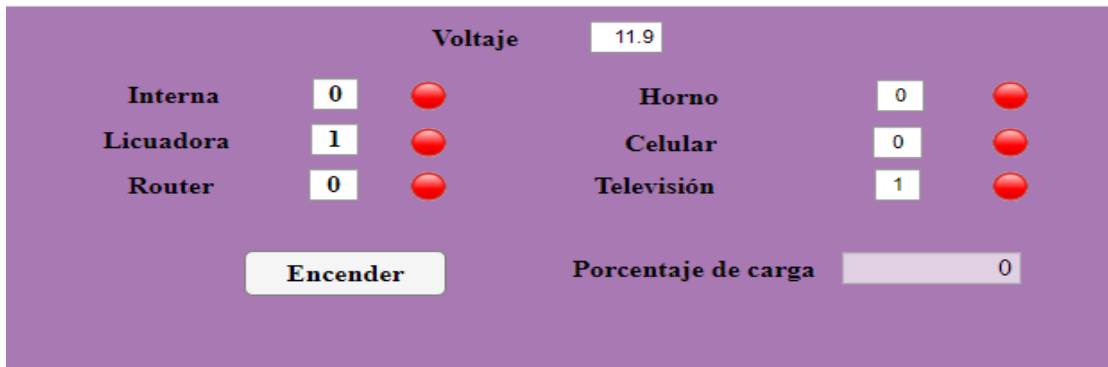


Figura 37 Estructura de interfaz de usuario, donde se ven la combinación de entrada, sin que se oprima el botón de encender (elaboración propia Matlab 2022 academic)

Una vez que se presiona el botón de “Encender” el algoritmo comienza su funcionamiento, en la figura 38 se observa como los focos asociados a los electrodomésticos que se pueden encender en la combinación de salida están en color verde, es decir cambio el color de rojo a verde.



Figura 38 Interfaz de usuario, donde se ve el resultado de oprimir el botón “encender”, ahora los indicadores de encendido se encuentran activos (elaboración propia Matlab 2022 academic)

Otra cosa que se observa es que ya aparece el valor de “estado de carga” (SOC), en este caso es de 38.24%. Cuando ocurre esta combinación de entrada, ambas cargas se pueden encender, pues el algoritmo permite que así suceda, pese a un valor bajo de voltaje de batería.

En la figura 39 aparece otra combinación para encender cargas, ahí se muestra que el voltaje de batería es 12.4 V, y los electrodomésticos que se desean encender son, licuadora, router, T.V., celular y horno, la combinación de salida indica que solo se puede encender horno, licuadora y celular, entonces la interfaz de usuario se ejecuta de forma correcta, pues como ya se mencionó en el apartado de líneas de código y elaboración de tabla de verdad para encendido de cargas, se pueden encender cinco cargas solo cuando el SOC supera el rango de 75.6-100%.

Aparte de lo descrito en el anterior párrafo, se observa que priorización entre cada carga se está ejecutando de manera correcta, pues licuadora, horno y celular tienen nivel de mayor prioridad que los otros elementos que se solicitaron encender.



Figura 39 Segunda combinación, donde se observa el correcto funcionamiento de todos los elementos de la interfaz de usuario (elaboración propia Matlab 2022 academic)

En resumen, la interfaz de usuario funciona de manera correcta, con respecto a todo lo que se trabajó en anteriores capítulos, al tener finalizado este aspecto, en los siguientes párrafos se narra un caso demostrativo en donde se establece una serie de sucesos enfocados en el caos de estudio que tiene como base el presente trabajo.

4.4.3 Análisis de comparativa de resultados que arroja el software

En los siguientes párrafos se narra el caso práctico enfocado al sistema que se tomó como base para el dimensionamiento. La figura 40 muestra un primer caso con un voltaje de 13.9, un nivel alto, en comparación al máximo voltaje que maneja la batería (14 V), se quiere encender router, horno, celular y televisión, como el SOC es elevado debido al voltaje la combinación de salida debe permitir que todas las cargas se pueden encender, esto se puede observar en la combinación de salida.

Se puede ver en la casilla de “Voltaje”, incluso el SOC es elevado, supera el 86%, pese a que se pueden encender cuatro de las seis cargas.



Figura 40 Caso práctico enfocado al sistema que se tomó como base para el dimensionamiento, primera situación, voltaje alto encendido solicitud de encendido cuatro de seis cargas (elaboración propia Matlab 2022 academic)

Ahora se supone que después de un tiempo indeterminado el usuario desea encender cinco cargas, una más que en la situación anterior, pero con un valor de voltaje menor, 12.4 V la figura 41 muestra que se puede encender licuadora, horno y celular, es decir que router y televisión tienen un valor inferior de priorización en comparación a las demás cargas que se solicitan encender, en consecuencia, no se pueden encender.



Figura 41 Encendido de cargas, segundo caso disminución de voltaje e incremento de solicitud de encendido de cargas, cinco de seis cargas (elaboración propia Matlab 2022 academic)

En cuanto al “estado de carga”, este tiene un valor de 62.16%, eso indica que el SOC restante no está en los límites para no continuar introduciendo un valor de voltaje, para solicitar encender otros electrodomésticos.

En tercer caso plasma la situación en que el voltaje es bajo, aproximándose al 11.6 V, en esta situación los anteriores apartados nos indican que el número máximo que se puede encender en dos electrodomésticos y además no se puede solicitar poner un voltaje más pequeño a este, pues si se introduce un valor menor a este el programa solicita otro valor, pues tiene la condición que refrigerador e iluminación interna requieren de un SOC por arriba del 25% para estar encendidos.

En la figura 42 se identifica la combinación de salida donde se disminuye el voltaje y los electrodomésticos que se desean encender son tres interna, licuadora y horno, como se conjeturo en el anterior párrafo, solo se puede encender dos de los tres solicitados, iluminación interna y horno, esto sucede porque el voltaje es muy bajo, como se estableció en el apartado de líneas de código pese a que licuadora y horno se encuentran en el mismo nivel de priorización el horno tiene un nivel más alto de subpriorización que licuadora.



Figura 42 Encendido de cargas, tercer caso disminución de voltaje y disminución de solicitud de encendido de cargas, tres de seis cargas (elaboración propia Matlab 2022 academic)

El “estado de carga” es de 28.77, un valor aproximado al límite que se maneja, en esta situación si después se ingresa un voltaje más pequeño el software solicitará otro, pues es muy pequeño y probablemente el SOC sea inferior a 25%, caso en el cual el software está condicionado para no comenzar a ejecutarse.

Como se puede observar en los tres casos que se presentaron, el software actúa de manera correcta, en el primero con un valor alto de voltaje y una solicitud de encender pocos elementos, no existe la necesidad que el bloque de código de condiciones de encendido entre en funcionamiento, pues las cargas son pocas y el SOC elevado, por este motivo la combinación indica un posible encendido de todos los electrodomésticos solicitados.

A diferencia del tercer caso, el voltaje es pequeño y se desean encender la mitad de las cargas, aquí es necesario que el bloque de condiciones de encendido comience a ejecutarse, pues se tiene poco SOC y no es suficiente para encender todo lo solicitado. Entonces la combinación de salida permite encender solo dos de las cuatro cargas solicitadas, es decir las de mayor prioridad de uso.

En el caso dos se quiere encender cinco de los seis electrodomésticos, con un voltaje que se encuentra en la media del rango de funcionamiento de la batería. En esta situación de nueva cuenta el programa necesita que comience a funcionar el bloque de condiciones de encendido, pues todas estas cargas no se pueden encender con el SOC que se tiene, por este motivo en la combinación de salida aparece con el indicador de encendido tres de las cinco cargas.

En cuanto a los valores de SOC, en el primer caso debido al voltaje de 13.9 V, es alto 86.38%, en comparación al tercer caso donde es 28.77% pues el voltaje es mucho menor 11.7. En el segundo caso el voltaje está en la media de los dos anteriores valores, con un SOC de 62.16%.

Como es de esperar los tres casos que se presentaron tuvieron variaciones de acuerdo con las condiciones de cada uno, y cada variación fue congruente con la hipótesis planteada, es decir que el software se ejecuta de manera adecuada en consecuencia la hipótesis se comprobó.

5. Conclusiones

Como objetivo general se planteó el desarrollar un sistema inteligente de administración de energía para una casa habitación aislada de la red eléctrica, contemplando que en el periodo nocturno se deben satisfacer necesidades energéticas por medio de un paquete de baterías sub-dimensionado que se carga por medio de un sistema fotovoltaico durante el día.

Para lograr esto, después de analizar los métodos más comunes para calcular el estado de carga de una batería (SOC), se utilizó el método mediante voltaje y velocidad, el cual permitió replicar las curvas extraídas del fabricante de forma satisfactoria.

Después se dimensionaron las cargas del sistema con ayuda de la elaboración de una serie de tablas de verdad, se obtuvo el número de cargas y la priorización de cada electrodoméstico, además de su demanda total en un periodo de cinco horas. Gracias a esto se pudo cumplir con el objetivo de determinar qué cargas se energizan en una casa habitación para satisfacer necesidades básicas de una familia.

En base a la metodología se continuó con el desarrollo del modelo matemático de la batería, en esta etapa se consiguió estimar el estado de carga (SOC) para cualquier velocidad y voltaje.

En base a esto se desarrolló un algoritmo en Matlab que dio prioridad de encendido a cada carga con un nivel de priorización y SOC de batería.

En las líneas de código del algoritmo se introdujo el modelo matemático de la batería y la serie de tablas de verdad, ya que se logra administrar la energía en base a estos dos elementos. Al tener todas las líneas de código se realizaron un par de pruebas para comprobar su correcto funcionamiento.

La primera prueba se enfocó en introducir un voltaje alto (14 V) y se desea encender todas las cargas, ya que se tiene un elevado estado de SOC (85-100), en teoría el programa debe de permitir encender el número máximo de cargas (cinco), pues se tiene suficiente energía para abastecer la demanda de cinco electrodomésticos, cuando se corre la simulación del programa se observó que en efecto se pueden encender todas las cargas a excepción de T.V. pues esta tiene el nivel más bajo de priorización.

Caso contrario sucede cuando el valor de voltaje es bajo (12 V) y se solicita encender todos los electrodomésticos, en un caso como este se conjetura que solo se van a poder encender los dos elementos con mayor nivel de priorización, pues el voltaje que se detecto es muy pequeño, en consecuencia el SOC (25-30%) también lo es, por este motivo solo los de mayor priorización se encenderán, y en efecto sucede que solo se pueden encender los dos electrodomésticos con mayor nivel de priorización es decir foco en habitación y horno.

Al realizar las pruebas, primero con la ventana de resultados en el entorno de script, en Matlab se comprobó su correcto funcionamiento.

Como última etapa del proceso del desarrollo del programa se diseñó una interfaz de usuario, la mayor diferencia entre ésta y el algoritmo recae en que la interfaz cuenta con elementos visuales, como por ejemplo: focos que señalan el estado de cada carga, verde encendido, rojo apagado y muestra de manera visual el porcentaje de carga de la batería.

En la interfaz de usuario también se hizo un ejemplo práctico, al estar desarrollada a partir del algoritmo del que ya se comprobó su correcto funcionamiento se corroboró de manera satisfactoria que es un entorno amigable y de fácil manejo para el usuario. Por estas razones se puede exponer que en ambas pruebas se comprobó que el objetivo general se cumplió de manera satisfactoria, es decir, que se pudo desarrollar un sistema inteligente de administración energética, enfocado en uso de comunidades marginales en un periodo nocturno.

En cuanto a futuros trabajos que se pueden realizar, en esta primera versión del programa, por motivos característicos de proyecto no se tuvo acceso de manera física a una batería, por esta razón el voltaje no se monitoreo directamente de ésta, si es posible desarrollar una futura versión del programa, la mejora destacable es que el monitoreo de voltaje sea de manera directa y constante en la batería.

También es importante mencionar que se pueden agregar quitar, e incluso sustituir cargas al sistema, esta decisión depende enteramente del caso en particular, esto se puede hacer mediante modificaciones al programa, trabajo que recae enteramente en manos del programador.

En esta primera versión se utilizó Matlab, pero es totalmente posible trasladar el código a otro software de programación.

Gracias a los anteriores párrafos se puede señalar que el programa desarrollado es una herramienta capaz de ayudar a administrar un recurso energético limitado, por esta razón es fundamental el desarrollo de trabajos como este, pues pueden ser de gran ayuda para solucionar problemáticas de esta índole.

Glosario de términos

Energía: La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo: trabajo mecánico, emisión de luz, generación de calor, etc. (Julieta C. Schallenberg Rodríguez, 2008).

Corriente eléctrica: definida por la cantidad de flujo de cargas por unidad de tiempo, en amperios, A. También se puede expresar en función de la capacidad de carga, de forma que si una batería tiene una capacidad de carga en amperios-hora, como pueden ser 5 Ah, una corriente de una intensidad concreta expresada como 1 C indicará el nivel de corriente que consiga carga la batería en una hora, en este caso 5 amperios (Vidal, 2016).

Potencia eléctrica: La potencia eléctrica es la proporción de corriente eléctrica que se transfiere en un circuito eléctrico por unidad de tiempo. Es decir, la cantidad de energía eléctrica que genera o disipa un elemento durante un periodo de tiempo (Planas, 2021).

Resistencia: Es la resistencia que opone un material ante el flujo de corriente.

Diferencia de potencial (voltaje): Mide la energía que obtendrá una carga si se mueve entre dos puntos del espacio (Galgary)

Corriente máxima de carga o descarga: Corriente máxima a la que se puede cargar o descargar la batería. Recomendada por el fabricante (Vidal, 2016)

Coulomb: Es la unidad del sistema internacional para la medida de la magnitud física “Cantidad de electricidad” (carga eléctrica). Es frecuente usar múltiplos y submúltiplos de esta magnitud para definir la corriente de carga / descarga de una batería. Un Coulomb es la cantidad de carga transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad (A. Muh. Rifqa Al Hadi, 2019).

Energías renovables: son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas (Messenger, 2005).

Radiación solar: Es la energía emitida por el sol en forma de radiación electromagnética que llega a la atmósfera W/m^2 (Navarra, 2019).

Irradiancia: es la densidad de potencia incidente por unidad de superficie, medida en W/m^2 , su valor máximo en la tierra es aproximadamente del orden de $1000 W/m^2$ (Abella, 2020)

Irradiación: energía incidente por unidad de superficies en un determinado periodo de tiempo y se mide en kWh/m^2 (Abella, 2020)

Célula fotovoltaica: compuesta por unos materiales denominados semiconductores, al incidir la luz solar surge el efecto fotovoltaico, que se produce y en consecuencia a esto genera un flujo de electrones en el interior del material que puede ser aprovechado para obtener energía eléctrica (Julieta C. Schallenberg Rodríguez, 2008).

Panel fotovoltaico: también denominado módulo fotovoltaico, está constituido por varias células fotovoltaicas conectadas entre sí y alojadas en un mismo marco (Messenger, 2005)

Batería: un acumulador de energía puede ser definido como reservorio capaz de entregar energía eléctrica a un circuito exterior a expensas de la energía química contenida en las sustancias internas que lo conforman, si el acumulador admite el proceso inverso, es decir, es capaz de acumular energía química en las sustancias que contiene a costas de la energía eléctrica suministrada desde el exterior se dice entonces que el acumulador es reversible (Sillero, 2018).

Celda de una batería: Es el menor elemento que forma una batería y puede ser asociada en serie o en paralelo con otras celdas con el objetivo de conseguir los valores de corriente y de tensión deseados (Vidal, 2016).

Estado de carga / State Of Charge (SOC) %: Es la expresión que indica el estado de carga de la batería de manera porcentual. El estado de carga es el 100% cuando la batería tiene almacenada la máxima energía posible. Este parámetro es el más importante de cara al proyecto, puesto que más adelante se presentarán y estudiarán métodos para su cálculo (Bertran, 2017).

Capacidad Ampere-Hora (AHC, por sus siglas en inglés): Es la carga total que se le puede demandar a una batería completamente cargada bajo condiciones de carga definidas (Vidal, 2016).

Capacidad de carga: es la capacidad que es capaz de almacenar la batería. Depende de la cantidad de material reactivo que contenga la celda. Representa la cantidad de electricidad que entrará en juego en la reacción REDOX. Se mide en la corriente en amperios que puede suministrar la batería en una hora en el proceso de descarga, expresados mediante la unidad amperio-hora, Ah.

Capacidad nominal: Es la capacidad que puede entregar una batería desde plena carga hasta alcanzar una tensión en descarga determinada. Se mide a una temperatura ambiente fijada y utilizando una razón de descarga específica (Velasco, 2018).

Profundidad de descarga / Depth Of Discharge (DOD) %: Es la relación entre la capacidad en amperios-hora (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Es un parámetro alternativo al SOC para saber el estado de carga de una batería. Cuando el SOC disminuye, el DOD aumenta (Bertran, 2017).

Estado de salud (SOH, por sus siglas en inglés): Se puede definir en términos de degradación de la capacidad, es decir, la relación de la capacidad actual y la capacidad de la batería cuando era nueva (Sillero, 2018).

Tensión de vacío o tensión de circuito abierto (open circuit voltaje OCV): Es la tensión que una batería tiene entre sus terminales cuando no hay ningún elemento conectado a ellos. Su valor queda determinado por las características intrínsecas de la batería (Velasco, 2018).

Tensión en circuito cerrado: Es la tensión que aparece en los terminales de una batería cuando esta está conectada a una carga. La tensión en circuito cerrado de una batería disminuye al conectarla a una carga dependiendo de la corriente que le ceda.

Autodescarga: Pérdida de capacidad de una batería, cuando se mantiene en circuito abierto. Generalmente, la autodescarga se expresa en términos de porcentaje de pérdida de capacidad respecto a la capacidad nominal en un periodo de tiempo de un mes (Velasco, 2018).

Energía específica: cantidad de energía que puede suministra un elemento en relación con su masa. Depende del voltaje y capacidad estándares.

Densidad de energía: cantidad de e energía que puede suministra un elemento en relación con su volumen. Depende del voltaje y capacidad estándares. Es una de las mayores ventajas de las baterías de litio.

Diagrama de flujo: es una manera de representar gráficamente un algoritmo o un proceso de alguna naturaleza, a través de una serie de pasos estructurados y vinculados que permiten su revisión como un todo (Conceptos, 2019).

Tabla de verdad: es una estrategia de la lógica simple que permite establecer la validez de varias propuestas en cuanto a cualquier situación, es decir, permite determinar las condiciones necesarias para que sea verdadero un enunciado propuesto.

Índice de figuras

FIGURA 1 CONSUMO BRUTO A NIVEL NACIONAL, DIVIDIDO EN DIEZ ZONAS, EN LA PARTE DERECHA SE OBSERVA EL MAPA DONDE SE ENCUENTRAN LOS ESTADOS QUE CONFORMAN CADA ZONA, (SENER, 2021).....	5
FIGURA 2 GRAFICO DE CAPACIDAD INSTALADA EN PARTE IZQUIERDA, DONDE SE APRECIAN LOS RESPECTIVOS PORCENTAJES DE APORTACIÓN, EN LA PARTE DERECHA, SE ENCUENTRA LA GENERACIÓN, DE IGUAL MANERA EL PORCENTAJE DE APORTACIÓN (SENER, 2021).	6
FIGURA 3 CAPACIDAD INSTALADA ACUMULADA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA	7
FIGURA 4 ESQUEMA DE UN SFA (ENGI, S.F.)	9
FIGURA 5 ESTRUCTURA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA (KAREN RODRÍGUEZ ROSALES, 2020)	11
FIGURA 6 CURVA CARACTERÍSTICA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA (FERICHOLA, 2022)	13
FIGURA 7 ESQUEMA BÁSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA (PAREJO, 2021).....	17
FIGURA 8 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA RECARGABLE, EXTRAÍDO DE HTTPS://CULTURACIENTIFICA.COM/2020/02/20/ SÍ-FUNCIONAN-LAS-BATERIAS-DE-LITIO/	18
FIGURA 9 ESQUEMA PROCESO DE CARGA O DESCARGA DEL FOSFATO DE HIERRO LITIO EXTRAÍDO DE HTTPS://WWW.BATERIASDELITIO.NET/?P=104	22
FIGURA 10 CURVAS DE VOLTAJE VS CAPACIDAD RELATIVA, A DIFERENTES VELOCIDADES DE DESCARGA DE UNA BATERÍA DE LIFEPO ₄ (INTERVENTO, 2019)	23
FIGURA 11 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA BATERÍA MODELO THEVENIN CON PARTE TRANSITORIA (A. MUH. RIFQA AL HADI, 2019).....	26
FIGURA 12 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA BATERÍA (MODELO THEVENIN CON PARTE TRANSITORIA) (TAUFIQ ALIF KURNIAWAN, 2020)	27
FIGURA 13 GRÁFICO DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA EN COMPARACIÓN CON SOC EN UN RANGO DE 30 °C (DAVOUD MAHBOUBI, 2021).....	27
FIGURA 14 EJEMPLO DE UN ESTUDIO DE CASO DONDE SE UTILIZÓ EL MÉTODO DE LA DENSIDAD RELATIVA (YING-SHING SHIAO, 2008)	29

FIGURA 15 IMAGEN DE LOS CINCO TIPOS DE RELACIONES PROPORCIONALES, QUE PUEDEN EXISTIR EN UNA TABLA DE VERDAD (BARCELO, 2016)	30
FIGURA 16 ESPECIFICACIONES DE LA BATERÍA SELECCIONADA (CLEVA POWER.COM)	35
FIGURA 17 COMPARATIVA ENTRE CURVA SIGMOIDAL, PARTE IZQUIERDA COLOR NEGRO Y CURVA ELABORADA CON BASE DE DATOS PARTE DERECHA EN COLOR MORADO (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	39
FIGURA 18 CAPTURA DE PANTALLA DE ENTORNO DE ORIGIN 2023 Y MODELO MATEMÁTICO DE LAS CURVAS QUE RELACIONAN EL VOLTAJE Y SOC DE LA BATERÍA (ELABORACIÓN PROPIA EN ORIGIN 2023)	40
FIGURA 19 VOLTAJE VS VELOCIDAD DE DESCARGA (ELABORACIÓN PROPIA EN ORIGIN 2023)	41
FIGURA 20 CURVA DE PARÁMETRO H1 Y VALORES DE ECUACIÓN GENERADA EN ORIGIN 2023 (ELABORACIÓN PROPIA EN ORIGIN 2023)	42
FIGURA 21 PRIMER PROCESO DE DIAGRAMA DE FLUJO (ELABORACIÓN PROPIA EN CANVA.COM)	45
FIGURA 22 PARTE IZQUIERDA SEGUNDO PROCESO DEL DIAGRAMA DE FLUJO, PARTE DERECHA PROCESO DE SELECCIÓN PARA COMENZAR DE NUEVO EL CICLO (ELABORACIÓN PROPIA EN CANVA.COM)	46
FIGURA 23 PARTE IZQUIERDA REPETICIÓN DEL CICLO PARA PODER ENCENDER OTRO ELECTRODOMÉSTICO, PARTE DERECHA ÚLTIMO PROCESO DEL CICLO (ELABORACIÓN PROPIA EN CANVA.COM)	47
FIGURA 24 COMPARATIVA DE GRAFICA VOLTAJE VS TIEMPO DE DESCARGA, DE LADO IZQUIERDO LA DE ELABORACIÓN PROPIA Y DE LADO DERECHO LA PROPORCIONADA POR EL FABRICANTE (CLEVA POWER.COM)	50
FIGURA 25 EJEMPLO DE SUSTITUCIÓN PARA ENCONTRAR LA RELACIÓN ENTRE EL PORCENTAJE DE CARGA Y VOLTAJE CON U TIEMPO DE 20 MINUTOS (ELABORACIÓN PROPIA EN ORIGIN 2023).....	53
FIGURA 26 EJEMPLO DE LA IMPORTANCIA DE LA TASA DE DESCARGA EN UNA BATERÍA LAS CURVAS DE VOLTAJE (ELABORACIÓN PROPIA EXCEL).....	54
FIGURA 27 GRAFICA DE PARÁMETROS A1, A2, P, LOGX01, LOGX02, H1 Y H2 (ELABORACIÓN PROPIA ORIGIN 2023).....	55
FIGURA 28 EJEMPLO DE SEGUNDA APROXIMACIÓN CON EL PARÁMETRO H1 Y UN ACERCAMIENTO A SU MODELO MATEMÁTICO (ELABORACIÓN PROPIA ORIGIN 2023)	56
FIGURA 29 CURVAS DE VOLTAJE VS ESTADO DE CARGA, GENERADAS A PARTIR DE LA SEGUNDA APROXIMACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL).....	60

FIGURA 30 EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE SOC CON UN MISMO VOLTAJE EN DIFERENTES CURVAS (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	61
FIGURA 31 FRAGMENTO DEL CÓDIGO, DONDE APARECE EL INICIO DEL PROGRAMA AL PEDIR EL VOLTAJE DE LA BATERÍA, Y LA LÍNEA DE CÓDIGO CON EL MODELO MATEMÁTICO (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	68
FIGURA 32 FRAGMENTO DEL CÓDIGO, DONDE APARECE LAS CONDICIONES PARA ENCENDER UN ELECTRODOMÉSTICO Y LAS IMPRESIONES DE PANTALLA DEPENDIENDO LA COMBINACIÓN DE VARIABLES DE SALIDA (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	69
FIGURA 33 APARECE UN EJEMPLO DONDE SE VE LA PRIORIZACIÓN DE CARGAS EN FUNCIÓN AL ESTADO DE CARGA SOC Y AL USO DE ELECTRODOMÉSTICO (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	70
FIGURA 34 FUNCIONAMIENTO DE CÓDIGO, CON UN CASO DEMOSTRATIVO (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	72
FIGURA 35 CONTINUACIÓN FUNCIONAMIENTO DE CÓDIGO, CON UN CASO DEMOSTRATIVO (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC).....	73
FIGURA 36 ESTRUCTURA DE INTERFAZ DE USUARIO, DONDE SE VEN TODOS LOS ELEMENTOS QUE LA COMPONEN (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	75
FIGURA 37 ESTRUCTURA DE INTERFAZ DE USUARIO, DONDE SE VEN LA COMBINACIÓN DE ENTRADA, SIN QUE SE OPRIMA EL BOTÓN DE ENCENDER (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC).....	76
FIGURA 38 INTERFAZ DE USUARIO, DONDE SE VE EL RESULTADO DE OPRIMIR EL BOTÓN “ENCENDER”, AHORA LOS INDICADORES DE ENCENDIDO SE ENCUENTRAN ACTIVOS (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	76
FIGURA 39 SEGUNDA COMBINACIÓN, DONDE SE OBSERVA EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DE TODOS LOS ELEMENTOS DE LA INTERFAZ DE USUARIO (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC).....	77
FIGURA 40 CASO PRÁCTICO ENFOCADO AL SISTEMA QUE SE TOMÓ COMO BASE PARA EL DIMENSIONAMIENTO, PRIMERA SITUACIÓN, VOLTAJE ALTO ENCENDIDO SOLICITUD DE ENCENDIDO CUATRO DE SEIS CARGAS (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC).....	78
FIGURA 41 ENCENDIDO DE CARGAS, SEGUNDO CASO DISMINUCIÓN DE VOLTAJE E INCREMENTO DE SOLICITUD DE ENCENDIDO DE CARGAS, CINCO DE SEIS CARGAS (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	78
FIGURA 42 ENCENDIDO DE CARGAS, TERCER CASO DISMINUCIÓN DE VOLTAJE Y DISMINUCIÓN DE SOLICITUD DE ENCENDIDO DE CARGAS, TRES DE SEIS CARGAS (ELABORACIÓN PROPIA MATLAB 2022 ACADEMIC)	79

Índice de tablas

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DE ACUMULADOR NÍQUEL-CADMIO (LLERANDI, 2021	19
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE ACUMULADOR NÍQUEL METAL HIDRURO (LLERANDI, 2021).....	19
TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DE ACUMULADOR PLOMO ÁCIDO (VIDAL, 2016).....	20
TABLA 4 CARACTERÍSTICAS DE ACUMULADOR ALCALINA RECARGABLE (MELLANO, 2013)	20
TABLA 5 CARACTERÍSTICAS DE ACUMULADOR LITIO-IÓN (LITIO B. I.-M., 2021).....	21
TABLA 6 ESPECIFICACIONES DE LA BATERÍA SELECCIONADA TOMADA DE HTTPS://WWW.CLEVABATTERY.COM/LITHIUM-ION-BATTERY/DEEP-CYCLE-LITHIUM- BATTERY/LITHIUM-12V-DEEP-CYCLE-BATTERY.HTML	34
TABLA 7 BASE DE DATOS REALIZADA A PARTIR DE LAS CURVAS DE VOLTAJE VS TIEMPO DE DESCARGA, A UNA TEMPERATURA ESTÁNDAR DE 25°C (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	37
TABLA 8 CAPTURA DE PANTALLA DE TABLA DE VERDAD DONDE SE PUEDEN OBSERVAR SUS DIMENSIONES Y LOS VALORES DE ENCENDIDO Y APAGADO (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	43
TABLA 9 CARGAS EN UN PERIODO DE 5 HORAS (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL).....	49
TABLA 10 FRAGMENTO DE BASE DE DATOS DE VOLTAJE (V) Y ESTADO DE CARGA SOC (%) (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL).....	52
TABLA 11 RECOPIACIÓN DE ECUACIONES RESULTANTES DE MODELO MATEMÁTICO DE LOS PARÁMETROS A1, A2, P, LOGX01, LOGX02, H1 Y H2 (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL).....	57
TABLA 12 RESULTADOS DE LA SUSTITUCIÓN DE VALORES EN CADA ECUACIÓN RESULTANTE DE LA SEGUNDA APROXIMACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA EXCEL)	58
TABLA 13 TABLA DE TODOS LOS VALORES DE SOC CON LAS CINCO VELOCIDADES DE DESCARGA, COMPARADOS CON EL VOLTAJE (ELABORACIÓN PROPIA EXCEL)	59
TABLA 14 TABLA DE PRIORIZACIÓN DE LOS OCHO ELECTRODOMÉSTICOS, SIENDO UNO EL NIVEL DE MAYOR PRIORIDAD Y CINCO EL DE MENOR PRIORIDAD (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	62
TABLA 15 FRAGMENTO DE BASE DE DATOS CARGA DE 25-50%, DONDE SE OBSERVA UN EJEMPLO DEL ENCENDIDO Y APAGADO EN FUNCIÓN DE PRIORIZACIÓN Y SOC (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL)	64

TABLA 16 FRAGMENTO BASE DE DATOS CARGA DE 50.1-70%, DONDE SE OBSERVA UN EJEMPLO DEL ENCENDIDO Y APAGADO EN FUNCIÓN DE PRIORIZACIÓN Y SOC (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL) 65

TABLA 17 FRAGMENTO BASE DE DATOS CARGA DE 76.1-100%, DONDE SE OBSERVA UN EJEMPLO DEL ENCENDIDO Y APAGADO EN FUNCIÓN DE PRIORIZACIÓN Y SOC (ELABORACIÓN PROPIA EN EXCEL) 65

Referencias

- A. Muh, Rifqa Al Hadi, C. E. (2019). Estimating the state of charge on lead acid battery using the open . *Journal of Physics: Conference Series*, 2-5.
- Abella, M. A. (2020). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*. Madrid: Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas.
- Academic. (8 de Octubre de 2019). *Academia.com*. Obtenido de <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/1444334>
- Aguila, A. S. (6 de Enero de 2021). *energiyahoy.com*. Obtenido de <https://energiyahoy.com/2021/01/06/energia-electrica-es-trampolin-de-oportunidades/>
- Ahmed, R. (2014). *MODELING AND STATE OF CHARGE ESTIMATION OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES*. Canada, Hamilton Ontario: McMaster University .
- Aranda, V. T. (s.f.). Historia y evolución de los lenguajes de programación. *Autores científicos y académicos*, 85-95.
- Astrology. (2020). *Astrologypage*. Obtenido de <https://es.theastrologypage.com/contacts>
- Azueta, L. C. (2021). *Uniovi*. Obtenido de <http://di002.edv.uniovi.es/labra/FTP7LPROP.pdf>
- Barcelo, A. (2016). *Media files*. Obtenido de <https://www.te.gob.mx/eje/media/files/6224e6dcfd0fd.pdf>
- BBVA, C. (11 de Octubre de 2022). *bbva.com*. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>
- Bello, D. G. (20 de Febrero de 2020). *Culturacientifica.com*. Obtenido de <https://culturacientifica.com/2020/02/20/asi-funcionan-las-baterias-de-litio/>
- Bertran, J. M. (Abril de 2017). Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas. Barcelona, Barcelona.
- Blank, I. L. (2014). Battery Maintenance. EU.
- Cavasassi, J. L. (2020). *Cavadevices*. Obtenido de <https://cavadevices.com/archivos/FOLLETOS/calculo%20de%20bateria.pdf>
- Cervantes, P. T. (27 de Diciembre de 2021). *forbes.com.mx*. Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/energia-solar-avanza-hogares-pese-desden-gobierno/>
- Cesar Leonardo González Pinzón, C. P. (2013). *Selección de un sistema solar fotovoltaico para un vehículo eléctrico*. Ciudad Juárez: CULCYT.
- Conceptos. (2019). *Conceptos*. Obtenido de <https://concepto.de/diagrama-de-flujo/>
- Cota, I. (21 de Enero de 2023). *elpais.com*. Obtenido de <https://elpais.com/mexico/2023-01-22/mexico-desaparece-del-mapa-energetico-mundial-del-futuro.html>

- Davoud Mahboubi, I. J. (2021). State of charge estimation for lithium-ion batteries based on square root sirma point Kalman filter considering temperature variations. *IET Electrical Systems in Transportation*, 5-10.
- Ensys, S. d. (Agosto de 2019). *Ensys.mx*. Obtenido de <https://www.ensys.mx/energia-solar/sistemas-fotovoltaicos.php>
- Espitia, C. H. (Septiembre de 2019). *Colombia competitiva*. Obtenido de Colombia competitiva: <https://clustersantander.com/media/809653b1167deb1efa53f1cb4f2077b82e40b814.pdf>
- ETSETB. (2015). *upcommons.upc.edu*. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/192916/tema_1_fundamentos_de_matlab-5148.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Origen%3A%20MATLAB%20fue%20originalmente%20escrito,\(de%20Eigenvalue%20Subroutines%20PACKage\)](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/192916/tema_1_fundamentos_de_matlab-5148.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Origen%3A%20MATLAB%20fue%20originalmente%20escrito,(de%20Eigenvalue%20Subroutines%20PACKage)).
- factorenergía. (Mayo de 2018). *factorenergía.com*. Obtenido de <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo/energia-solar/>
- Ferichola, J. F. (Enero de 2022). CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON DISPOSITIVO PORTÁTIL.
- Fernández, C. M. (Febrero de 2015). Análisis y modelado del comportamiento de baterías para vehículos eléctricos. Madrid, Leganés.
- fotovoltaica, E. (2021). Componentes de una instalación fotovoltaica.
- Galgary. (s.f.). *Enciclopedia de energía*. Obtenido de https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Voltaje
- INEGI. (2018). *ENCEVI*. México: INEGI.
- INEGI. (2018). Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares. *Comunicado de prensa Número 541/18*, 3-19.
- INEGI, S. (2019). *a Encuesta Nacional de Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI 2018)*. México: CONUEE.
- intervento, T. (2019). *TRITEC*. Obtenido de <https://tritec-intervento.cl/que-es-el-ritmo-de-descarga-de-una-bateria/>
- Jorge Aguilera, L. H. (Julio de 2018). *www.academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/27963057/Dimensionado_de_sistemas_fotovoltaicos_aut%C3%B3nomos
- Jorge I. Pérez Valderrama, Y. M. (2016). *SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA PARA BATERÍAS DE ION-LITIO*. Bocatá: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Julieta C. Schallenberg Rodríguez, G. P. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

- Karen Rodríguez Rosales, F. J. (Julio de 2020). Energía solar fotovoltaica . Queretaro.
- Lamigueiro, O. P. (2020). Energía solar fotovoltaica. España: Creative commons.
- Library. (2022). *Copyright 1Library.Co*. Obtenido de <https://1library.co/article/m%C3%A9todo-del-mes-peor-o-mes-m%C3%A1s-desfavorable.zw5oolvz>
- litio, B. d. (29 de Noviembre de 2018). *bateriasdelitio.net*. Obtenido de <https://www.bateriasdelitio.net/?p=104>
- litio, B. i.-m. (2021). *José Gallego Navarro*. Cartagena.
- Llerandi, J. d. (2021). Diagnóstico continuo del estado de una batería mediante la medición en línea de su resistencia interna. Madrid, Madrid.
- Marriele Mango, S. M. (2020). *Comprendiendo Solar+Almacenamiento*. México: Clean energy group.
- MathWorks. (2021). *la.MathWorks.com*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Matúš Danko, J. A. (2019). Overview of batteries State of Charge estimation methods. *ScienceDirect*, 3-4.
- Mellano, C. D. (2013). *Estimación del estado de carga de un banco de baterías basado en modelación difusa y filtro extendido de Kalman*. SANTIAGO, CHILE: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Messenger, R. A. (2005). Photovoltaic systems engineering. New York : This edition published in the Taylor & Francis e-Library.
- Microtexindia. (s.f.). *Microtexindia.com*. Obtenido de <https://microtexindia.com/es/que-es-el-tipo-de-bateria/>
- Morán, C. L. (2008). *ESTUDIO SOBRE DIAGNÓSTICO PREDICTIVO DEL ESTADO OPERATIVO DE BANCOS DE BATERÍAS PARA SISTEMAS DE TELEFONÍA CELULAR MEDIANTE EL CONTROL DE PARÁMETROS INTERNOS DE V&R*. Guatemala : Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Motorpasion. (Marzo de 2019). *Motorpasion.com*. Obtenido de <https://www.motorpasion.com/revision/que-baterias-lfp-ventajas-inconvenientes-aplicaciones-automocion>
- Murnane, M. (2017). A Closer Look at State of Charge (SOC) and state of health (SOH) estimation techniques for batteries. *Analog Devices a head of what's possible* , 2-3.
- Nava, D. (2021). *Vivir sin luz eléctrica*. Obtenido de <https://expansion.mx/empresas/2021/12/16/vivir-sin-luz-electrica-la-otra-pobreza-que-afecta-a-1-millon-de-mexicanos#:~:text=Un%201%25%20puede%20parecer%20poco,individuos%E2%80%9420%20tienen%20luz%20el%C3%A9ctrica.>

- Navarra. (Septiembre de 2019). *meteo.navarra.es*. Obtenido de http://meteo.navarra.es/definiciones/radiacion_solar.cfm
- Osteicoechea, A. (Diciembre de 2022). *Conceptos definición*. Obtenido de <https://conceptodefinicion.de/tabla-de-verdad/>
- Parejo, G. (2021). *3EN1GROUP*. Obtenido de <https://3en1group.es/energia/diferencia-entre-pila-y-bateria/>
- Planas, O. (27 de Septiembre de 2021). *Energía solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/electricidad/corriente-electrica/potencia-electrica>
- Planet. (Mayo de 2018). *es.planet.com*. Obtenido de <https://es.planetcalc.com/2283/>
- PROFECO. (2021). Precios de hornos, licuadores, planchas, pantallas y refrigeradores. *PROFECO*, 9-13.
- Quintero, N. (2018). Modelos de gerencia: la curva sigmoidea. *keiser*, 1-2.
- Rodríguez, D. Á. (2017). *MODELO PARA LA BATERÍA DE ION DE LITIO DE UN*. Valladolid: cidaut.
- Rubén Calvo, N. Á. (2021). Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe. *CEPAL*, 19-25.
- Schteingart, D. y. (2021). Del litio a la batería: análisis de posicionamiento argentino. *Consejo para el cambio estructural CCE*, 18-29.
- SENER. (2021). *PROGRAMA DE DESARROLLO DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (2021-2035)*. México.
- Sergio Aguilar, A. F. (2012). La Curva en S como Herramienta para la Medición de los Ciclos de Vida de Productos. *Journal of technology management & innovation*, 2-4.
- Sillero, A. A. (2018). *ESTIMACION DE LOS ESTADOS DE CARGA Y SALUD*. Celaya, GTO: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA .
- SOLARAMA. (Noviembre de 2019). *solarama .mx*. Obtenido de <https://solarama.mx/blog/crecimiento-de-los-sistemas-fotovoltaicos-en-mexico-en-los-ultimos-anos/>
- Solutions, K. E. (2016). *KPN Energy Solutions.com*. Obtenido de <https://kpnenergy.com/sistemas-fotovoltaicos-tipos/>
- Taufiq Alif Kurniawan, A. N. (2020). Real time monitoring state-of-charge battery using internal . *Journal of Physics: Conference Series-4th International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology*, 4-6.
- Terrón, S. R. (Sevilla de Junio de 2018). FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS FOLVOLTAICAS DE PEROVSKITA DE NUEVA COMPOSICIÓN.

Velasco, A. C. (2018). *Desarrollo y validación de un modelo de batería de ion-litio. Aplicación al estudio de su envejecimiento ligado al tipo de recarga*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.

Vidal, G. A. (Enero de 2016). Control del consumo de energía para compuerta del microcanal. Concepción.

Vitronergy. (2019). *Vitronergy.com*. Obtenido de <https://www.vitronenergy.com/media/pg/SmartShunt/es/battery-capacity-and-peukert-exponent.html>

Ying-Shing Shiao, D.-T. S. (2008). Electrochemistry Theorem Based State-of-Charge Estimation . *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, 2-3.

Yuasa. (s.f.). *Yuasa.es*. Obtenido de <https://www.yuasa.es/informacion/motociclismo-y-deportes-de-motor/caracteristicas-de-carga-y-descarga-de-la-bateria/>