



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LAS BATERÍAS
EN UNA INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
APLICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Br. Luis A. Méndez F.

Mérida, Mayo 2022



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LAS BATERÍAS
EN UNA INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
APLICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista

Br. Luis A. Méndez F.
Tutor: PhD. Marisol Dávila.
Asesor: PhD. Juan C. Rojas.

Mérida, Mayo 2022

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LAS BATERÍAS EN UNA
INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA APLICADA
EN EL SECTOR RESIDENCIAL**

Br. Luis A. Méndez F.

www.bdigital.ula.ve

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

Ing. Joel A. Cáliz

Ing. Marco Molina

PhD. Marisol Dávila

DEDICATORIA

A mi madre, Beatriz Fernández, que con amor, paciencia y dedicación llenó de enseñanzas y valores mi vida. Espero que desde el cielo estés muy orgullosa de mí.

¡Este logro es tuyo!

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser las personas más importantes en mi vida, por educarme con amor y respeto y apoyarme en cada paso. A mi madre Beatriz, quien dedicó su vida a mi bienestar y forjó el hombre que soy. A mi padre Simón, por ser ejemplo de perseverancia y enseñarme a continuar a pesar de las adversidades.

A mi hermana Ariadna, que con su carácter ha logrado influenciar positivamente mi vida.

A mi novia Emperatriz, por alentarme a culminar mi carrera, brindarme su apoyo y estar presente en todo momento.

A mis tutores Marisol Dávila y Juan Rojas por sus aportes al trabajo de grado. Gracias por brindarme sus conocimientos con paciencia y comprensión.

A la Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica, por ser mi casa de estudio por tantos años, y darme las herramientas necesarias para ser un excelente profesional.

Luis A. Méndez F. Estudio de viabilidad financiera de las baterías en una instalación de energía solar fotovoltaica aplicada en el sector residencial. Universidad de Los Andes. Tutor(es): PhD. Marisol Dávila y Asesor: PhD. Juan C. Rojas. Mayo 2022.

RESUMEN

En esta investigación se llevó a cabo un instrumento de campo aplicado a establecimientos comerciales y usuarios de sistemas solares fotovoltaicos, el cual permitió recolectar información certera de las baterías más comercializadas y empleadas en Venezuela para sistemas residenciales, así como de los tipos y sus características. Dicho instrumento permitió escoger las baterías que posteriormente se estudiaron. Además, se planteó un caso de estudio, a partir del cual se diseñó una herramienta computacional de interfaz gráfica desarrollada en Excel® para dar resolución al mismo. La herramienta llamada PVSolars, permite el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico híbrido sin vertido a la red a nivel residencial y de pequeños comercios y a su vez elabora un análisis seleccionando el mejor banco de baterías para cada caso. Aplicar un análisis económico al banco de baterías no es suficiente para conocer la mejor opción; es por ello que PVSolars, también toma en cuenta características como vida útil y amperios/hora de cada batería, para así determinar mediante indicadores financieros el banco de baterías ideal.

Descriptor: Instalación fotovoltaica, modelo matemático en Excel®, banco de baterías, indicador financiero.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1

Capítulo pp.

1. ¿POR QUÉ ANALIZAR LAS BATERÍAS PARA SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA?3

1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 METODOLOGÍA.....	8
1.6 ALCANCE.....	8
1.7 LIMITACIONES.....	9

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LAS BATERÍAS QUE ALIMENTAN A UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA10

2.1 BASES TEÓRICAS.....	10
2.1.1 Energía solar fotovoltaica.....	10
2.1.2 Sistemas fotovoltaicos y su clasificación.....	11
2.1.3 Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo.....	12
2.1.3.1 Célula Solar.....	12
2.1.3.2 Panel Solar.....	13
2.1.3.3 El regulador.....	14
2.1.3.4 Baterías o acumuladores.....	15
2.1.3.5 El inversor.....	16
2.1.4 Sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas autónomas.....	17

2.1.4.1	Baterías solares.....	17
2.1.4.2	Partes constructivas de una batería.....	18
2.1.4.3	Tipos de baterías.....	20
2.1.4.4	Baterías de plomo-ácido (Pb-a).....	21
2.1.4.4.1	Tipos de baterías de plomo-ácido:.....	22
2.1.4.5	Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd).....	24
2.1.4.6	Baterías de litio.....	24
2.1.4.7	Baterías de ciclo profundo.....	25
2.1.4.8	Especificaciones eléctricas de las baterías.....	25
2.1.5	Modelo teórico de las baterías en sistemas fotovoltaicos.....	32

3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS BATERÍAS EN ESTUDIO.....34

3.1	CUESTIONARIO PARA ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES	34
3.1.1	Resultados.....	35
3.2	CUESTIONARIO PARA USUARIOS DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A NIVEL RESIDENCIAL Y SISTEMAS DE INVERSOR-CARGADOR	44
3.2.1	Resultados.....	44

4. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE LAS BATERÍAS SELECCIONADAS.....57

4.1	DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA HÍBRIDA	57
4.2	CASO DE ESTUDIO	58
4.2.1	Características geográficas y climatológicas de la localidad.....	59
4.2.2	Estimación de la demanda	60
4.3	DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS QUE SE DESEAN RESPALDAR CON EL BANCO DE BATERÍAS (CARGAS DE RESPALDO)	63
4.4	DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE RADIACIÓN SOLAR DEL SITIO (HSP)	64
4.5	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA SOLAR FOTOVOLTAICA REQUERIDA	64
4.6	DETERMINACIÓN DEL INVERSOR Y NÚMEROS DE MÓDULOS A UTILIZAR.....	65
4.6.1	Inversor híbrido (inversor-cargador) a utilizar	65
4.6.2	Números de módulos fotovoltaicos	67
4.6.2.1	Selección del panel fotovoltaico.....	67
4.6.2.2	Arreglo de los módulos.....	68
4.6.2.3	Cálculo de voltaje y corriente total del sistema.....	69
4.6.2.4	Potencia pico del arreglo fotovoltaico	69
4.7	DETERMINACIÓN Y SELECCIÓN DEL BANCO DE BATERÍAS	70
4.7.1	Costos de las baterías de los establecimientos comerciales	70
4.7.2	Energía real necesaria (Wh/día)	71
4.7.3	Capacidad nominal del banco de batería (Ah):	71
4.7.4	Baterías en serie y en paralelo	72

4.7.5. Cantidad total de baterías	73
4.7.6 Costo total de inversión (US\$)	73
4.7.7 Costo por N° de ciclos (US\$/N° de ciclos)	73
4.7.8 Costo por capacidad nominal (US\$/Ah).....	73
4.7.9. Resultados del banco de baterías	74
4.7.9.1. Selección del mejor banco de baterías en base a costo de inversión, costo unitario por número de ciclos y costo unitario por capacidad nominal.....	74
4.7.9.2. Selección del mejor banco de baterías en base al método del costo anual uniforme equivalente	75
4.8. ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA PVSOLARS.....	76
4.9. MODELADO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA PLANTEADA EN EL CASO DE ESTUDIO.....	82
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS	87
Apéndice	pp.
1. INSTRUMENTO DE CAMPO APLICADO A LOS ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES.....	90
2. INSTRUMENTO DE CAMPO APLICADO A USUARIOS DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A NIVEL RESIDENCIAL.....	92
3. INFORME GENERADO POR LA HERRAMIENTA PVSOLARS	95
Anexo	pp.
1. TABLA DE FACTOR DE DEMANDA PARA SECADORAS Y CALENTADORES	96
2. TABLA DE FACTOR DE DEMANDA PARA ALUMBRADO	96
3. FICHA TÉCNICA INVERSOR GROWATT MODELO SPF 3000TL LVM-48P	97
4. CARACTERÍSTICAS DEL PANEL ATON DE ZXP6-HLD144-345/P.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.....	pp.
2.1 Estructura de la célula solar.....	13
2.2 Estructura de un panel solar.....	14
2.3 Funcionamiento de las baterías en instalaciones fotovoltaicas.	17
2.4 Esquema básico de una batería de pb-a.	20
2.5 Reacción electroquímica de oxidación-reducción.....	21
4.1 Curva de carga.....	60
4.2 Ventana de introducción.....	77
4.3 Ventana de recopilación de información.....	77
4.4 Ventana de consumo total de energía.	78
4.5 Ventana de cargas que se desean respaldar con las baterías.....	78
4.6 Ventana de irradiación solar del emplazamiento.....	79
4.7 Ventana de potencia solar fotovoltaica pico.....	79
4.8 Ventana de selección del inversor.	80
4.9 Ventana de selección de los módulos spv.	80
4.10 Ventana de banco de baterías.	81
4.11 Ventana de método CAUE.	81
4.12 Vista del cuarto de baterías.....	82
4.13 Instalación solar fotovoltaica del caso de estudio	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
3.1 Costo de la batería según establecimientos comerciales	40
3.2 Tipo de instalación de suministro de energía	45
3.3 Potencia nominal del sistema de suministro de energía	46
3.4 Número de baterías utilizadas en el sistema.....	47
3.5 Marca de la batería utilizada en el sistema.....	48
3.6 Tipo de batería.....	49
3.7 Voltaje nominal de la batería.....	50
3.8 Capacidad de la batería.....	51
3.9 Ciclos de la batería	52
3.10 Duración de la batería.....	53
3.11 Costo de la batería según usuarios.....	54
3.12 Tiempo de garantía de la batería.....	55
4.1 Datos del caso de estudio	59
4.2 Características geográficas y meteorológicas.....	60
4.3 Cargas conectadas iluminación, tug y cargas especiales.....	61
4.4 Determinación de la demanda máxima	62
4.5 Cálculo del consumo total diario de energía	63
4.6 Determinación de cargas a respaldar	63
4.7 Características del inversor seleccionado.....	65
4.8 Características tensión y corriente de los módulos.....	68
4.9 Costos de las baterías según establecimientos comerciales.....	70
4.10 Voltajes de baterías.....	71
4.11 Factor de corrección de temperatura.	72

4.12 Resultados de las baterías según características	74
4.13 Resultados de las baterías seleccionadas	74
4.14 Resultados de las baterías seleccionadas	76

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico.....	pp.
3.1 Marcas de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.....	36
3.2 Tipo de baterías más vendidas en establecimientos comerciales.	37
3.3 Voltajes nominales de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.....	37
3.4 Capacidad de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.	38
3.5 Ciclos de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.	39
3.6 Vida útil de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.	39
3.7 Temperatura de funcionamiento de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.	40
3.8 Garantía de las baterías otorgada en establecimientos comerciales.	42
3.9 Fallas reportadas por los usuarios a establecimientos comerciales.	43
3.10 Tipo de instalación de suministro de energía.	45
3.11 Potencia nominal del sistema de suministro de energía.	46
3.12 Número de baterías utilizadas en el sistema.	47
3.13 Marca de la batería utilizada en el sistema.	48
3.14 Tipo de batería que posee el usuario.	49
3.15 Voltaje nominal de la batería que posee el usuario.	50
3.16 Capacidad de la batería que posee el usuario.	51
3.17 Ciclos de la batería que posee el usuario.	52
3.18 Duración de la batería según usuarios.	53
3.19 Costo de la batería según usuarios.....	54
3.20 Tiempo de garantía de la batería recibida por el usuario.....	55
3 21 Fallas presentadas en la batería.	56
4.1 Promedio hora solar pico.....	64

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es la forma de energía más versátil y que mejor se adapta a las necesidades humanas. En la actualidad, la electricidad es parte fundamental de la vida. Sin embargo, la generación de la misma, es un proceso costoso que tiene un gran impacto ambiental, agotando de este modo los recursos naturales. Es por ello que la tendencia desde hace algunos años, es buscar alternativas para obtener el recurso de una manera más amigable para el medio ambiente.

El sol suministra la energía necesaria para habitar en el planeta. Al ser un recurso continuo de costo nulo, se posiciona como una solución al problema energético. El inconveniente que se presenta con la energía solar, es su baja eficiencia, por lo que es necesario concentrarla para que pueda ser aprovechada.

Los sistemas solares fotovoltaicos son el conjunto de componentes capaces de transformar la energía solar en energía eléctrica apta para ser utilizada. En el caso residencial, este tipo de energía renovable es la que mejor se adapta, pues las instalaciones fotovoltaicas se dimensionan para cubrir las necesidades requeridas.

Las baterías son el componente encargado de almacenar la energía en los sistemas solares fotovoltaicos. A pesar de ser un elemento indispensable en la instalación, es de los que requiere mayor inversión y a su vez el que más suele presentar fallas. La selección del banco de baterías, no siempre se realiza de manera adecuada. En muchos casos solo se toma en consideración el factor económico, sin considerar el tipo, vida útil o características de las mismas.

Al momento de dimensionar una instalación solar fotovoltaica, el escoger el banco de baterías más idóneo, determina el funcionamiento óptimo del sistema y garantiza al usuario que las cargas requeridas sean respaldadas en el momento necesitado.

Actualmente, en el mercado de sistemas solares fotovoltaicos, no existen softwares que determinen el mejor banco de baterías según la relación costo-beneficio. Es por ello, que se propone desarrollar una herramienta computacional en Excel® que permita conocer la mejor batería para sistemas residenciales mediante indicadores financieros.

En esta investigación se desarrollaron cuatro capítulos como se muestra a continuación:

Capítulo 1: ¿por qué analizar las baterías para sistemas de energía solar fotovoltaica?, se muestran los motivos para llevar a cabo este trabajo, así como los antecedentes de previas investigaciones con el fin de tener una base bibliográfica que guarda la mayor relación. Además, se plantean los objetivos a lograr, la metodología aplicada, las limitaciones de la investigación y el alcance que tendrá al finalizar.

Capítulo 2: fundamentos teóricos sobre las baterías que alimentan a un sistema de energía solar fotovoltaica, donde se desarrolla de manera concisa los conceptos básicos de un sistema solar fotovoltaico y los elementos que lo conforman, haciendo énfasis en las baterías, sus tipos y su funcionamiento.

Capítulo 3: análisis comparativo de las baterías en estudio, se presenta el instrumento de campo diseñado para usuarios de sistemas solares fotovoltaicos y establecimientos comerciales que suministran este tipo de energía. Así como los resultados obtenidos luego de la aplicación de dicho instrumento.

Capítulo 4: simulaciones y análisis de las baterías seleccionadas, se presentan las ecuaciones y los pasos establecidos para seleccionar el mejor banco de baterías. De igual manera, se da resolución al caso de estudio planteado en esta investigación y se muestra la herramienta computacional desarrollada exponiendo su interfaz gráfica.

Para finalizar, se exponen las conclusiones obtenidas en esta investigación, dando cumplimiento a los objetivos planteados previamente, así como las recomendaciones que se sugieren a establecimientos y futuras investigaciones, brindando la oportunidad de ampliar y mejorar la novedosa herramienta diseñada.

CAPÍTULO 1

¿POR QUÉ ANALIZAR LAS BATERÍAS PARA SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA?

El presente capítulo describe de manera concisa las razones para llevar a cabo esta investigación, desarrollando los antecedentes, planteando los objetivos a lograr, la metodología empleada, el alcance y las limitaciones del mismo.

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente, la energía solar fotovoltaica desarrolla un papel importante en la sociedad, es por ello que a nivel mundial se han realizado múltiples investigaciones al respecto, en este sentido, Collado E. (2009), en España, realizó el trabajo doctoral titulado “Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos”. El objetivo fue evaluar los límites a mediano y largo plazo, de la competitividad económica de la energía solar fotovoltaica en España, estudiando el nivel de evolución que tiene que tener esta forma de producción de energía, hasta lograr ser competitiva con el resto de las energías tradicionales, y otras emergentes en crecimiento [1].

Para llevar a cabo el estudio, desarrolló una metodología basada en escenarios fotovoltaicos que facilitaran su cálculo en función de diferentes hipótesis realizadas. Al finalizar esta investigación, planteó la posibilidad de que, con la evolución de la industria fotovoltaica española, la tarifa fotovoltaica coincida con el costo de la electricidad del segmento residencial [1]

Pavón, G. (2018), en Ecuador publicó “Cálculo del rendimiento de baterías en sistemas fotovoltaicos usando criterios de eficiencia energética”. El objetivo fue determinar cuál de los

escenarios es el más favorable para el rendimiento óptimo de la batería, sin que pierda sus propiedades originales de fabricación y al mismo tiempo proporcionando un excelente rendimiento [2].

En dicha investigación se realizaron varias experimentaciones para determinar el desempeño de una batería en distintos escenarios propuestos. El estudio buscó obtener las condiciones ideales en las cuales la batería de un sistema fotovoltaico autónomo debe funcionar. Los resultados del rendimiento de la batería se evaluaron en porcentajes de potencia activa entregada para abastecer la demanda, logrando demostrar el escenario más favorable para el funcionamiento de la batería en cuanto a periodos de carga se refiere [2].

Zakeri B. y Syri S. (2014), en Finlandia, publicaron “*Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*”. En dicho estudio se realizó un análisis de los costos del ciclo de vida de los sistemas de almacenamiento de electricidad en la escala de servicios públicos, proporcionando una base de datos actualizada de costos [3].

Las tecnologías de almacenamiento de energía examinadas incluyeron: almacenamiento de energía hidroeléctrica bombeada, almacenamiento de energía de aire comprimido, baterías electroquímicas, baterías de flujo, superconductores magnéticos, supercondensadores y almacenamiento de energía de hidrógeno. Los resultados ilustraron la economía de los diferentes sistemas de almacenamiento para las tres aplicaciones principales: almacenamiento de energía, servicios de apoyo y regulación de frecuencias [3].

En Venezuela se han realizado algunos estudios, como el presentado por Lorenzo G. Campos R. (2008), en Mérida, titulado “Diseño y operación de un sistema fotovoltaico para una vivienda unifamiliar”. El objetivo de este proyecto fue diseñar un sistema fotovoltaico para una vivienda unifamiliar [4].

Para obtener los resultados de esta investigación, se procedió a estudiar cada uno de los componentes que estructuran el sistema, luego se recolectó los respectivos datos de acuerdo a la zona y posteriormente se calculó las necesidades del sistema de energía para la vivienda, logrando de esta manera dimensionar el sistema fotovoltaico [4].

Por otra parte, Delgado S. (2010), en Zulia, publicó “Diseño de un sistema de alimentación eléctrica para las cargas críticas de una vivienda multifamiliar basado en energía solar”. Donde

buscó independizar de manera total o parcial las cargas de una vivienda multifamiliar de tipo vertical, mediante un sistema de alimentación eléctrico basado en energía solar [5].

Así mismo, determinó las cargas eléctricas que representan las cargas críticas de una vivienda multifamiliar de tipo vertical, estableció los criterios de diseño para el sistema de alimentación basado en energía solar, identificó los elementos que constituyen un sistema de alimentación eléctrico basado en energía solar y finalmente, seleccionó los equipos que constituyen dicho sistema. Al finalizar esta investigación, se logró diseñar un sistema de alimentación eléctrica basado en energía solar para un edificio, el cual alimenta las cargas de iluminación, ascensor e hidroneumático; dando de esta forma un diseño que es técnicamente factible y que de ser instalado producirá un ahorro importante de la energía consumida por el sistema de distribución local [5].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la energía eléctrica es una parte esencial para el desarrollo de la vida. Todas las áreas que conforman nuestra sociedad requieren de la misma para que las actividades de los diversos sectores puedan llevarse a cabo de manera satisfactoria [6].

Desde la primera revolución industrial, ocurrida a finales del siglo XVIII, se observa como los tipos de energías utilizados han ido evolucionando, pasando del carbón (que permitía el uso de máquinas a vapor) hasta el uso del petróleo y del gas (que impulsan los motores de combustión interna). La producción de energía eléctrica ha estado liderada desde el siglo XX hasta el día de hoy, por el petróleo y el gas (energías no renovables), dejando a las energías alternativas en un segundo plano [7].

En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), planteó como objetivo el incremento de la proporción de energías renovables en la matriz energética mundial [6]. A pesar de ello, dicha transición está muy lejos de cumplirse, existiendo una alta probabilidad de que los combustibles fósiles continúen predominando la matriz energética mundial durante décadas [8].

En Venezuela, la energía eléctrica que llega a los hogares e industrias se genera en su mayoría a través de plantas hidroeléctricas y termoeléctricas; según datos de la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC) más del 62% del potencial eléctrico se produce por centrales

hidroeléctricas, mientras que otro 35% proviene de plantas termoeléctricas y casi un 3% corresponde al sistema de generación distribuida [9].

De ese 3% de generación distribuida, se encuentra la energía solar fotovoltaica, que, a pesar de no ser muy utilizada, en los últimos años ha estado ganando terreno debido a los problemas eléctricos y la falta de combustible que sufre el país.

Actualmente en Venezuela, la energía solar fotovoltaica está siendo utilizada mayormente a nivel residencial. Según lo requerido por la unidad habitacional, se puede obtener la generación total o parcial de la energía eléctrica demandada, aunque este tipo de instalaciones se están empleando comúnmente como método de respaldo ante las interrupciones presentadas en el servicio eléctrico nacional [10].

En un sistema solar fotovoltaico, las baterías son elementos importantes en la conformación del mismo. Al tener la capacidad de almacenar la energía eléctrica para ser liberada posteriormente según las necesidades solicitadas, aumentan el rendimiento de la instalación representando un mayor aprovechamiento de sus beneficios. Sin embargo, las baterías representan en muchas ocasiones la debilidad de los sistemas, ya que son el componente que suele presentar más fallas y el que demanda parte importante de la inversión total del sistema solar fotovoltaico [11]. Por este motivo y todo lo mencionado anteriormente, es que se plantea la siguiente interrogante:

¿Cuáles son las baterías de mejor relación beneficio-costos para el almacenamiento de electricidad en los sistemas de energía solar fotovoltaica aplicado en el sector residencial de Venezuela?

1.3 JUSTIFICACIÓN

La energía solar fotovoltaica actualmente representa la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel mundial. Gracias a los avances tecnológicos, la eficiencia de los paneles o celdas solares ha aumentado significativamente, lo que ha permitido que el costo medio de generación eléctrica sea competitivo con las fuentes de energía tradicional, por lo cual hoy en día a nivel mundial esta fuente energética cada vez se acerca más a la población en general en múltiples aplicaciones [12].

En sistemas de energía solar fotovoltaicas el almacenamiento de electricidad es fundamental, ya que la disponibilidad de energía eléctrica muchas veces no coincide con el tiempo. Es por ello que se debe utilizar un dispositivo almacenador de energía, siendo las baterías las más utilizadas en este tipo de sistemas [12].

Las baterías, son el principal protagonista en los sistemas fotovoltaicos autónomos, situándolas en el centro de todo el sistema; pues es la responsable de fijar el punto de trabajo y alimentar a las cargas cuando la irradiación solar disminuye. Es por esto que los resultados expuestos en esta investigación sirven de base para la selección de uno de los elementos primordiales en sistemas fotovoltaicos como lo son las baterías [12].

Finalmente, aunque en Venezuela es poco frecuente la implementación de energía solar a nivel de empresas o particulares, en los últimos años y debido a las diferentes crisis energéticas vividas en el país, se ha vuelto más común la implementación de sistemas fotovoltaicos como alternativa para afrontar dichas crisis y los problemas que han generado; por consiguiente la realización de este proyecto y los resultados del mismo pueden servir de guía para el desarrollo y ejecución de sistemas fotovoltaicos en el país, sobre todo lo relacionado con el almacenamiento de electricidad [7].

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Determinar cuáles son las baterías de mejor relación beneficio-costos para el almacenamiento de electricidad en los sistemas de energía solar fotovoltaica aplicado en el sector residencial de Venezuela.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Estudiar las diferentes marcas, modelos y tipos de baterías comercializadas en Venezuela.
- ii. Desarrollar una herramienta computacional para el análisis de las baterías en estudio.
- iii. Seleccionar mediante indicadores financieros el mejor banco de baterías para sistemas residenciales.

1.5 METODOLOGÍA

Esta es una investigación de diseño documental y de campo. Ya que se basa en la búsqueda, recuperación, análisis, críticas e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores, así como de la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, sin manipular o controlar ninguna variable [13].

El nivel de la investigación es de tipo descriptiva, ya que se busca realizar un estudio comparativo de las baterías existentes y de amplio uso en Venezuela para el almacenamiento de energía eléctrica a nivel residencial.

De acuerdo al propósito, ésta es una investigación de tipo aplicada, que relaciona una actividad tecnológica para precisar cuáles son las baterías que mejor beneficio-costo podrían tener para el almacenamiento de electricidad en Venezuela.

Este trabajo se desarrollará con la revisión bibliográfica (artículos técnicos, informes, catálogos y otros) acerca de los diferentes tipos de baterías (estado del arte). Seguidamente, se seleccionarán mediante un instrumento de campo las baterías a estudiar.

Finalmente, se determinará mediante un modelo matemático en Excel®, cuáles son las baterías de mejor relación beneficio-costo para el almacenamiento de electricidad en los sistemas de energía solar fotovoltaica aplicado en el sector residencial de Venezuela.

1.6 ALCANCE

El siguiente trabajo trata el estudio de las baterías utilizadas para el almacenamiento de electricidad en los sistemas de energía solar fotovoltaica a nivel residencial; las diferentes marcas, modelos y tipos usados en Venezuela.

Llevada a cabo la investigación, se obtendrá una guía o referencia sobre la mejor batería según la relación costo-beneficio a nivel residencial. Lo cual permitirá a futuras investigaciones y proyectos tener un precedente en el sistema de almacenamiento de energía, contribuyendo al crecimiento del uso de la energía solar fotovoltaica en el país.

1.7 LIMITACIONES

Como se ha mencionado anteriormente, la energía solar fotovoltaica hoy día es una de las energías alternativas más utilizadas a nivel mundial, su uso va desde la alimentación de antenas de telecomunicaciones, hasta grandes campos solares que suministran energía a comunidades enteras. Esta investigación se limitó al estudio de las baterías utilizadas en los sistemas de energía solar fotovoltaica en Venezuela.

De esta forma, se enfocará todo el trabajo en determinar, a través de comparaciones y simulaciones, cuáles son las mejores baterías según su relación beneficio-costos para el almacenamiento de energía solar fotovoltaica en el sector residencial, dejando a las baterías usadas a nivel industrial, como una sugerencia de investigación para futuros trabajos.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LAS BATERÍAS QUE ALIMENTAN A UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Este capítulo desarrolla los conceptos básicos que constituyen un sistema fotovoltaico, la función que cumplen las baterías y como están compuestos estos sistemas de almacenamiento de energía. De igual manera los tipos de baterías y sus especificaciones eléctricas. Por otra parte, se exponen los antecedentes de la investigación, con el fin de tener una base a nivel teórico que guarde relación con este trabajo.

2.1 BASES TEÓRICAS

2.1.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación del sol en electricidad. Dicha conversión es realizada por células fotoeléctricas, unidad básica en la que se produce el efecto fotovoltaico [14].

El efecto fotovoltaico, también llamado efecto fotoeléctrico, consiste en la emisión de electrones por parte de un material al incidir sobre él una luz visible. En el caso de la energía solar fotovoltaica, el sol emite energía lumínica que es transmitida a través de partículas de luz llamadas fotones, las cuales chocan contra las células fotoeléctricas, causando un desplazamiento por parte de los electrones y generando una corriente eléctrica [15] [16].

Las células fotoeléctricas por lo general son láminas de silicio cristalino de un espesor aproximado de 0,3 mm. Generalmente, la parte superior tiene un carácter negativo y el resto positivo, creando de esta forma una unión P-N [16]. El semiconductor P, posee un enlace

trivalente, es decir, con tres electrones en la capa de valencia, para aumentar el número de cargas libres (en este caso positivas). El semiconductor N, posee un enlace pentavalente, es decir, con cinco electrones en la capa de valencia, para aumentar el número de cargas libres (en este caso negativas). De esta manera, los electrones del semiconductor N se desplazan hacia el semiconductor P al ser impactados por la energía de los fotones, generando así el desplazamiento de los electrones, lo que se traduce en la generación de una corriente eléctrica [15].

2.1.2 Sistemas fotovoltaicos y su clasificación

Los sistemas fotovoltaicos están definidos como el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que cumplen con el objetivo de captar y transformar la energía solar en energía eléctrica apta para ser utilizada [6].

Ahora bien, las cantidades de potencia y energía que se pueden obtener de un sistema fotovoltaico dependerán de diferentes factores como son: disponibilidad del recurso solar, la capacidad de generación y el almacenamiento de los equipos instalados [15].

Se puede clasificar o dividir a los sistemas fotovoltaicos en tres:

- **Sistemas conectados a la red:** Este tipo de sistema se mantiene permanentemente conectado a la red eléctrica nacional debido a que no se utilizan sistemas de acumulación de energía, por lo tanto, en horas de irradiación solar escasas o nulas donde los generadores fotovoltaicos no producen energía suficiente para cubrir la demanda de electricidad, es la red quien proporciona la energía necesaria para satisfacer la demanda; y viceversa, en las horas donde la irradiación solar produce más energía eléctrica de la que se gasta, este exceso se transfiere a la red. La ventaja que supone el uso de estos sistemas es la eliminación de los acumuladores, ya que son la parte más cara y compleja de una instalación [17].
- **Sistemas autónomos o sistemas aislados:** Son utilizados especialmente para satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica de aquellos lugares donde no existe red eléctrica comercial o esta es de difícil acceso. A diferencia de los sistemas conectados a la red (descritos anteriormente), estos tipos de sistemas cuentan con

acumuladores (baterías), con el fin de satisfacer la demanda tanto del día como de la noche, esto implica que el campo fotovoltaico ha de estar diseñado de tal forma que permita durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y la recarga de las baterías de acumulación [17].

- **Sistemas híbridos:** Estos sistemas trabajan en combinación con otras fuentes de energías, por lo general energía eólica o grupos electrógenos (máquinas que mueven un generador eléctrico a través de motores de combustión interna), para satisfacer la demanda; ya que a veces no es suficiente con los módulos fotovoltaicos, por lo que se utiliza tecnología auxiliar donde se aprovechan recursos energéticos localizados cerca de la instalación para una mayor fiabilidad en el suministro de energía [17].

2.1.3 Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo

Los elementos básicos que componen un sistema fotovoltaico son:

2.1.3.1 Célula Solar:

Las células solares, también llamadas celdas solares o células fotoeléctricas, son dispositivos electrónicos que convierten la luz solar directamente en electricidad. Están formadas por dos capas de semiconductores con dopados diferentes, la capa sobre la que incide la luz es de tipo N (negativa) dopada generalmente con fósforo y la capa inferior es de tipo P (positiva) dopada de boro. Al ponerse en contacto las dos capas se forma la unión NP, capaz de producir una barrera de potencial que hace posible el efecto fotovoltaico [17].

Hoy en día existe una amplia gama de tecnologías de células fotovoltaicas en el mercado, de diferentes tamaños y diferentes tipos de materiales, aunque el silicio (Si) sigue siendo el material predilecto para la construcción de las mismas [17]. Entre las celdas fotovoltaicas que se consiguen en el mercado cuyo principal material de producción es el sílice (óxido de silicio) podemos encontrar:

- Células solares amorfas
- Células solares de silicio monocristalino
- Células solares de silicio policristalino

- Células de arseniuro de galio
- Células bifaciales

En la siguiente imagen (figura 2.1) se puede observar la estructura típica de una célula solar con sus debidos componentes:

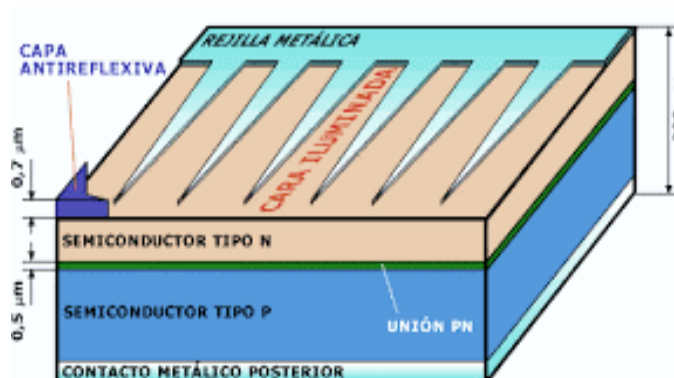


Figura 2.1 Estructura de la célula solar. [18]

2.1.3.2 Panel Solar:

El panel solar, constituye la fuente de energía principal de toda la instalación fotovoltaica. Está constituido por un conjunto de módulos fotovoltaicos conectados eléctricamente entre sí, en serie y/o paralelo, de forma que la tensión y corriente suministrada por el panel incrementa hasta el valor deseado [6] [17].

Entre las principales características que todo panel debe tener, se encuentran el encapsulado, encargado de proteger al panel de la intemperie, la humedad, la abrasión y los rayos UV, además de proteger las celdas y conexiones ante posibles vibraciones. Por otra parte, se tiene el marco del panel, el cual permitirá que la instalación se ubique sobre un determinado soporte, proporcionando así, una rigidez estructural adecuada. Adicional, se tiene el cableado y los bornes de conexión, los cuales son protegidos de la intemperie por medio de cajas estancas y haciendo uso de instalaciones eléctricas habituales. Por último, cuentan con un diodo de protección encargado de proteger sobre-cargas u otras alteraciones de las condiciones de funcionamiento del panel [17].

Un punto que es de suma importancia al momento de dimensionar una instalación fotovoltaica, es la tensión de trabajo en los paneles solares. La tensión de trabajo en los paneles debe ser superior a la fijada por las baterías, para que el proceso de carga de las mismas y el funcionamiento del regulador sean correctos [19].

Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las celdas, el cual es fundamentalmente de silicio cristalino (monocristalino y policristalino) y de silicio amorfo [15]. En la figura 2.2 se muestra la estructura general de un panel solar.



Figura 2. 2 Estructura de un panel solar [18].

2.1.3.3 El regulador:

Este es un dispositivo electrónico que se encarga de regular la tensión y corriente de carga y descarga de las baterías, a fin de que estas no sufran daños por efecto de sobrecargas o de descargas excesivas; siempre buscando alargar la vida útil de los acumuladores (baterías o banco de baterías) [20].

El regulador mantiene un monitoreo constante de la tensión de la batería, de manera que cuando la tensión llega al valor máximo de carga, el regulador interrumpe el proceso; de igual manera cuando las baterías están en uso, es decir, están proporcionando energía al sistema y llegan por debajo de su valor mínimo (voltaje de corte), el regulador de carga actúa como un conmutador de corriente y anula la alimentación para no permitir la descarga profunda de la batería [17].

Además de lo mencionado anteriormente, los reguladores optimizan la energía proveniente de los paneles solares de manera que el panel solar funcione a un nivel óptimo de trabajo, siempre dependiendo de la irradiación que se tenga en ese momento [17].

Finalmente, para seleccionar un regulador se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- Caída del voltaje a corriente nominal.
- Temperatura de operación.
- Rango del sensor de temperatura de la batería.
- Voltaje nominal del sistema (12 V, 24 V o 48 V).
- Dimensionar para la corriente de carga máxima.

2.1.3.4 Baterías o acumuladores:

En los sistemas fotovoltaicos las baterías o acumuladores se utilizan principalmente como sistema de almacenamiento energético. Debido al desplazamiento temporal que existe, las baterías acumularán la energía cuando esté disponible (periodos de generación) y la entregarán en el momento más conveniente (periodos de consumo, que pueden ser durante la noche o en momentos aleatorios como, por ejemplo, cuando hay alta nubosidad), alcanzando un sistema más eficiente con mejores beneficios para los consumidores [14].

Las baterías son dispositivos compuestos por celdas electroquímicas capaces de convertir la energía química en su interior en energía eléctrica. Existen diferentes clases de baterías. Según el uso que se le vaya a dar, se pueden clasificar en: baterías estacionarias, baterías de ciclo profundo y baterías de arranque. En las aplicaciones fotovoltaicas las baterías más utilizadas son las de ciclo profundo, ya que están diseñadas para descargas muy lentas sin sufrir daño alguno [17].

Se puede decir, que además de almacenar energía, las baterías dentro de los sistemas fotovoltaicos autónomos cumplen otras dos funciones importantes, como lo son: proporcionar una potencia instantánea elevada y fijar la tensión de trabajo de la instalación [15].

Lo explicado anteriormente es una pequeña introducción a las baterías en sistemas fotovoltaicos. Este punto será desarrollado con mayor profundidad posteriormente, ya que forma parte del objetivo de esta investigación.

2.1.3.5 El inversor:

Cuando el sistema fotovoltaico va a alimentar equipos que trabajan con corriente alterna se debe incorporar un inversor, el cual se encarga de convertir la corriente continua en alterna (DC-AC), por medio de la acción de conmutación de distintos semiconductores de potencia que actúan como interruptores [20].

Las características que se desean en un inversor DC-AC son las siguientes [15]:

- Alta eficiencia.
- Bajo consumo en vacío.
- Alta fiabilidad.
- Protección contra corto circuito.
- Seguridad.
- Buena regulación de la tensión y frecuencia de salida.

El inversor es un elemento imprescindible en instalaciones solares conectadas a la red y está presente en la mayoría de instalaciones autónomas, sobre todo en aquellas destinadas a la electrificación de vivienda [15]. Existen tres tipos de inversores de acuerdo a la forma de onda: de onda cuadrada (actualmente en desuso), de onda modificada, también llamada senoidal modificada y de onda senoidal pura (muy parecida a la onda de la red eléctrica) [14].

Los inversores de onda modificada utilizan la modulación PWM para regular el valor eficaz de la onda de tensión, mientras que los inversores de onda senoidal pura utilizan la técnica conocida como modulación por anchura de pulso sinusoidal (SPWM), en la que la conmutación de los interruptores se realiza a una frecuencia elevada en cada semiperíodo, lo que da lugar a una forma de onda en la que los armónicos superiores aparecen en frecuencias muy alejadas del fundamental, lo cual facilita su eliminación mediante un filtrado sencillo (6). Además, los inversores de onda senoidal, tienen una gran ventaja con respecto a los otros tipos y es que no

presentan ningún problema en relación con la THD (distorsión armónica total) o estabilidad de la tensión, lo que los hace la mejor opción para la alimentación de cargas AC [14].

2.1.4 Sistemas de almacenamiento en instalaciones fotovoltaicas autónomas

Como se mencionó anteriormente, el almacenamiento de la energía en sistemas fotovoltaicos autónomos es fundamental, ya que la disponibilidad de luz muchas veces no coincide con el tiempo en que se necesita la energía eléctrica. Aunque existen varias formas de almacenar energía, en los sistemas fotovoltaicos autónomos la más utilizada son las baterías [17].

2.1.4.1 Baterías solares:

Las baterías son dispositivos capaces de transformar la energía química en eléctrica. Las baterías de Plomo-ácido (Pb-a), la más utilizadas en sistemas fotovoltaicos, están formadas por células electroquímicas en las que las reacciones en los electrodos son reversibles y por esta razón pueden ser utilizadas para acumular energía y liberarla posteriormente cuando se conectan a un circuito de carga exterior. Las células electroquímicas están constituidas esencialmente por placas, materia activa y electrolito [14].

El funcionamiento de las baterías o acumuladores en una instalación fotovoltaica es el siguiente [19]:

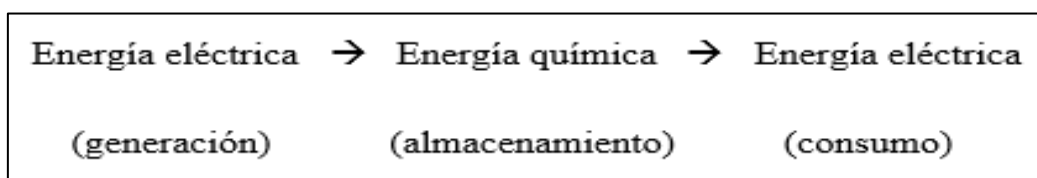


Figura 2.3 Funcionamiento de las baterías en instalaciones fotovoltaicas [2].

Como se muestra en la figura 2.3, las baterías son recargadas desde la electricidad producida por los paneles solares, a través de un regulador de carga, y posteriormente entregan su energía a la salida de la instalación, donde será consumida [19].

Las baterías solares generalmente vienen diseñadas en celdas de 2 V cada una, debiéndose interconectar en serie para suministrar los voltajes que normalmente se usan, tales como: 6 V, 12 V, 24 V y 48 V. Un aspecto a tener en cuenta en las baterías solares es la corriente de carga; esta debe ser controlada ya que, si la carga llega al 100% y se mantiene la misma corriente de

carga, se produce una sobrecarga en la batería. Dicha sobrecarga es una acción totalmente indeseada, porque genera un efecto llamado gasificación por exceso de oxígeno, el cual produce la oxidación de los separadores de la batería, disminuyendo la vida útil de las mismas. Para evitar el fenómeno de sobrecarga en las baterías solares, se utiliza el regulador de carga, el cual fue explicado anteriormente. Por otro lado, debido a los gases que se producen durante el proceso de carga y descarga, las baterías deben ser situadas en ambientes debidamente ventilados [17] [20].

La capacidad necesaria de las baterías en un sistema fotovoltaico se calcula en función a los consumos y al número de días de autonomía del sistema. Por otra parte, es de suma importancia que el dimensionamiento del acumulador con relación al generador fotovoltaico esté bien realizado, ya que, un exceso de capacidad de almacenamiento respecto de la capacidad de generación daría un problema para que la batería pudiera cargarse completamente. Por el contrario, una baja capacidad de la batería da lugar a poca autonomía y se puede correr el riesgo de quedarse sin suministro de energía eléctrica en caso de ausencia de radiación [14].

2.1.4.2 Partes constructivas de una batería:

Las partes constructivas más importantes de una batería son:

- **La célula:** Es el elemento básico electroquímico de la batería, consiste en un conjunto de placas positivas y negativas separadas por aislantes y sumergidas en una solución de electrolitos, todo ello dentro de un contenedor. Se puede decir que la célula es la única unidad y la batería es el grupo de células [14].
- **Material activo:** Son los materiales que forman las placas, tanto positivas como negativas. La cantidad de materia activa es proporcional a la capacidad (Ah) que la batería puede suministrar. En el caso de las baterías de Pb-a, los materiales activos son el PbO_2 (óxido de plomo) en la placa positiva y Pb (plomo) en la negativa [14].
- **Electrolito:** Es un medio conductivo encargado de transportar la carga eléctrica entre las placas de la batería. En las baterías de Pb-a, el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico, esta puede ser en forma líquida, como gel o cristalizado [14].

- **Rejilla:** Se encargan de distribuir la corriente por toda la placa, además de actuar como soporte de la materia activa. En las baterías de Pb-a la rejilla está formada por una aleación de plomo. Dependiendo de la forma de la rejilla se diferencian las baterías tubulares y planas [14].
- **Placas:** Consisten en unas rejillas con material activo denominado electrodo. Generalmente, en cada célula hay un número de placas conectadas en paralelo a un bus situado en la parte superior de las placas, tanto positiva como negativa. La profundidad de ciclado de una batería depende del grosor de las placas. En las baterías solares, se utilizan placas gruesas, ya que permiten descargas profundas sobre largos periodos, manteniendo una buena adhesión de la materia activa a la rejilla (vida larga). Por el contrario, en las baterías de arranque se suelen usar placas muy finas, dando lugar a una gran superficie de reacción para suministros de altas corrientes en poco tiempo, pero haciendo que no sean muy resistentes a descargas profundas y prolongadas [14].
- **Separadores:** Se encargan de separar las placas positivas y negativas evitando el cortocircuito de las mismas y permitiendo el flujo del electrolito y los iones entre ellas. Son elaborados con un material aislante y poroso (goma o plástico). En algunos casos suelen ser envolventes evitando el cortocircuito debido a la posible deposición de materia activa en el fondo del contenedor [14].
- **Elemento:** Es un conjunto de placas (positivas y negativas) y separadores, montados juntos con buses que interconectan las placas positivas y negativas [14].
- **Bornes:** Son las conexiones eléctricas externas (positiva y negativa) [14].
- **Carcasa o contenedor:** Contienen todos los elementos de la batería; normalmente son hechos de plástico o goma dura. Los contenedores transparentes facilitan el control visual del nivel del electrolito [14].

En la figura 2.4, se muestra el esquema básico de una batería de plomo-ácido, donde se pueden ver visualmente las partes explicadas anteriormente:



Figura 2.4 Esquema básico de una batería de Pb-a [2].

2.1.4.3 Tipos de baterías:

Generalmente, las baterías se pueden clasificar en dos tipos, en baterías primarias y baterías secundarias. Las baterías primarias tienen la característica que su reacción electroquímica es irreversible, es decir, después de que la batería se ha descargado no puede volver a cargarse. Mientras que la reacción química en las baterías secundarias es reversible, es decir, después de que la batería se ha descargado puede ser cargada inyectándole corriente continua desde una fuente externa. Por este motivo, las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos son las secundarias [14].

Las baterías secundarias, a su vez, se clasifican en diferentes tipos, entre las que destacan [17]:

Baterías de plomo-ácido (Pb-a).

Baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH)

Baterías de ion de litio (Li-ion).

Baterías de polímero de litio (Li-poly).

Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd).

Baterías de zinc-aire.

De los tipos de baterías secundarias mencionadas, en las aplicaciones fotovoltaicas las más utilizadas son las de Plomo-ácido, debido a que esta es una tecnología ampliamente estudiada y que brinda una relación costo/beneficio mucho mayor a la proporcionada por los otros modelos [17].

Otro tipo de baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos son las de níquel-cadmio. Aunque estas baterías cuentan con una larga vida, su precio es muy elevado con respecto a las baterías de Plomo-ácido por lo que las hace menos factibles [17].

2.1.4.4 Baterías de plomo-ácido (Pb-a):

Las baterías de plomo-ácido se compone de un ánodo o electrodo positivo con PbO_2 (óxido de plomo), un cátodo o electrodo negativo con Pb (plomo) y el electrolito a base de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) diluido en agua. Su funcionamiento es una reacción electroquímica de oxidación-reducción, la cual se muestra a continuación en la figura 2.5 [21]:

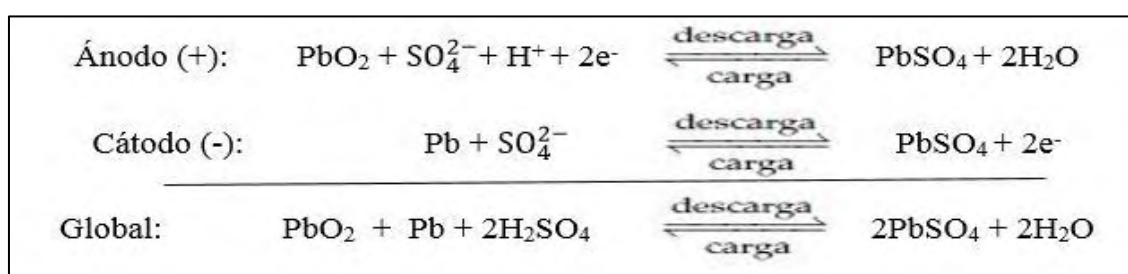


Figura 2.5 Reacción electroquímica de oxidación-reducción [2].

De la reacción electroquímica de oxidación-reducción mostrada anteriormente, Oscar Perpiñan Lamigueiro en su libro “Energía Solar Fotovoltaica”, expresó [21]:

Durante la descarga, ambos electrodos transforman la materia activa en sulfato de plomo y con agua en el ánodo. Este proceso supone consumo de electrolito (disminuye su densidad) y cambios de volumen de los materiales activos (el volumen del PbSO_4 es superior al del PbO_2 y este al del Pb). Dado que las reacciones químicas se producen en la superficie porosa de la materia activa, los cambios de volumen dificultan la homogeneidad del proceso y la adecuada difusión del electrolito entre la materia activa. Más aún, la concatenación de cambios de volumen provoca tensiones mecánicas en las rejillas con la consiguiente fractura del material activo que se desprende y precipita al fondo. Como consecuencia, las descargas repetidas producen pérdida de material activo y degradación de las placas. (p. 95)

Durante la carga, el sulfato de plomo se transforma en óxido de plomo, plomo y ácido. Cuando el proceso de carga está por finalizar, la reacción

química implica la electrolisis del agua, con liberación de oxígeno e hidrógeno (conocido como gaseo). Esta liberación supone la pérdida de agua del electrolito, pero también la homogeneización del electrolito por agitación. Este fenómeno reduce la estratificación del electrolito, situación que se produce cuando la gravedad y la falta de movimiento provocan mayor concentración de electrolito en la zona inferior, pero también contribuye a la corrosión por oxidación de la rejilla positiva, por lo que su utilización debe ser controlada convenientemente. Más aun, debe tener en cuenta la pérdida de agua producida por el gaseo debe ser compensada en el proceso de mantenimiento. (p. 95)

2.1.4.4.1 Tipos de baterías de plomo-ácido:

Las baterías de plomo-ácido vienen en distintos tipos, dependiendo del grado de gasificación y de protección ante rotura del envase [20]. A continuación, se mencionan los principales modelos comerciales:

- Baterías abiertas de plomo-ácido: Este tipo de baterías están construidas con electrodos de plomo y solución electrolítica de ácido sulfúrico diluido en agua. Durante su funcionamiento se libera gas de hidrógeno porque se produce la electrolisis del agua, por esta razón, este tipo de baterías requiere mantenimiento periódico para suplir el agua que se pierde durante su funcionamiento normal. La liberación de gas hidrógeno puede representar un peligro si las baterías se mantienen en compartimientos cerrados, ya que este gas es sumamente inflamable y puede ocasionar explosiones en concentraciones del orden del 2 % al 3% del volumen [4].

Otra característica destacada de estas baterías es su robustez, además de su durabilidad siempre y cuando se les haga mantenimiento regularmente (agregar agua); una batería abierta de plomo-ácido en condiciones óptimas de utilización puede llegar a tener una vida media de (5 a 10) años, aproximadamente 1000 ciclos de carga y descarga durante su vida útil, esto dependerá del modelo y diseño de sus electrodos [22].

Las baterías de ciclo profundo de plomo-ácido son parecidas a las baterías para vehículos, con la diferencia del diseño de sus electrodos, ya que estos cuentan con áreas superficiales más grandes que le permiten una descarga mucho más profunda, típicamente del orden del 50 % sin sufrir daño alguno [4].

- Baterías de ácido selladas (herméticas): También conocidas como baterías estacionarias, este tipo de baterías tienen el mismo funcionamiento que las baterías de plomo-ácido abiertas, con la diferencia, que estas son selladas, es decir, no se les puede agregar agua (no se les realiza mantenimiento); por esta razón su vida útil es mucho más corta, aunque tiene como ventaja la producción de poco oxígeno, por lo que pueden emplearse en sitios cerrados [22].
- Baterías de electrolito inmovilizado: Son un tipo de batería de plomo-ácido, que tienen la característica de tener el electrolito inmovilizado de algún modo. Estas baterías son muy sensibles a los métodos de carga, voltajes de regulación y operación bajo temperaturas extremas. Los dos tipos más comunes de estas baterías son las baterías AGM (*Absorbed Glass Mat*) y las baterías de gel [14]. A continuación, se explicará más a fondo cada una de ellas.

- ✓ Baterías AGM (*Absorbed Glass Mat*): son baterías con el electrolito en forma cristalina formando capas entre las placas. Son completamente selladas por lo que evitan la evaporación del agua, ya que los gases de hidrógeno y oxígeno quedan dentro de las baterías, obligándolos a que una buena porción de ellos se recombine nuevamente para formar agua [14].

La gran diferencia con las baterías normales es que ésta usa una fibra de vidrio que permite descargas mucho más profundas llegando incluso hasta el 80 % sin producir daño a la batería. La vida útil es otro punto a favor que tienen estas baterías, pues cuando funcionan de manera óptima pueden tener entre (8 a 20) años de vida media, siendo mayor que el de las baterías de ácido y baterías de gel [4].

- ✓ Baterías de gel: Son baterías que, en lugar de utilizar una solución electrolítica como material conductor, utilizan un gel especial que cumple la misma función, esto ayuda a que en caso de rotura del envase el ácido sulfúrico no se derrame. La ventaja principal en este tipo de baterías es que permiten descargas muy profundas hasta el 90 % sin que las baterías sufran daño alguno [4].

2.1.4.5 Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)

Las baterías de níquel-cadmio tienen como principales características: larga vida, bajo mantenimiento, no se ven afectadas por sobrecargas excesivas y los voltajes de regulación no son parámetros críticos. Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, su precio es muy superior a las baterías de plomo-ácido, siendo esta su principal desventaja [14].

Típicamente en una célula de una batería de níquel-cadmio, los electrodos positivos (ánodo) están hechos de hidróxido de níquel (NiO(OH)) y los electrodos negativos (cátodo) de cadmio (Cd). Ambos electrodos, se encuentran inmersos en una solución de hidróxido potásico (KOH) [14].

Existen dos principales tipos de baterías de níquel-cadmio: de placas sinterizada y de placas pocked. En las primeras el electrolito está inmovilizado y presentan el llamado “efecto memoria” según el cual una batería que es descargada repetidamente hasta sólo un porcentaje de su capacidad, eventualmente memorizará este ciclado y limitará descargas mayores dando como resultado una pérdida de su capacidad. El segundo tipo requiere adición periódica de agua, pero no presenta el efecto memoria [14].

2.1.4.6 Baterías de litio

La batería de iones de litio es un dispositivo que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo el ánodo [20].

Entre sus características está que es ligera, potente y con ciclos de duración igual que las de níquel-hidruro metálico (NiMH). Las particularidades de esta batería es que posee una buena capacidad de almacenamiento de energía y su resistencia a la descarga es muy alta [20].

2.1.4.7 Baterías de ciclo profundo

Las baterías también se pueden clasificar en baterías de ciclo profundo y baterías de ciclo poco profundo, pero esto no es más que una clasificación general que no siempre es un indicativo real del diseño de la batería [14].

Las baterías de ciclo poco profundo por lo general son baterías de arranque. Están hechas con rejillas de plomo-calcio, no deben ser descargadas diariamente más de un 15 % y nunca se deben descargar más de un 50 % ya que es muy difícil recargarlas después de una descarga de este tipo. Estas baterías se diseñan para proporcionar grandes corrientes en periodos cortos de tiempo por lo que no soportan descargas profundas [14].

Por su parte, las baterías de ciclo profundo pueden soportar grandes descargas durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, no se deben descargar al 100 %, lo recomendado por la mayoría de los fabricantes es una descarga máxima del 80 % de su capacidad nominal. Típicamente las baterías de ciclo profundo pueden suministrar entre (1500 a 1800) ciclos al 80% de su profundidad de descarga, antes de necesitar reemplazo. El número de ciclos puede aumentar entre 3000 y 4000 si la descarga es más moderada, en torno al 25% [14].

2.1.4.8 Especificaciones eléctricas de las baterías

Las principales características eléctricas de las baterías para aplicaciones fotovoltaicas se indicarán a continuación, también debemos agregar, que se desarrollarán aquellas características importantes para este trabajo.

- Ciclado de la batería: el ciclado se refiere al proceso de carga y descarga de una batería. La descarga es el proceso en el que la batería suministra una corriente durante un determinado tiempo (régimen de descarga). Por su parte, en la carga, la batería recibe o acepta una determinada corriente durante un tiempo determinado (régimen de carga). Se considera un ciclo como una descarga seguida de una recarga [14].

La descarga en las baterías, es una característica muy importante, estas pueden ser muy pequeñas o muy profundas. La profundidad de descarga afecta a la vida útil de la batería, el número de ciclos carga/descarga de una batería desciende con la profundidad de

descarga. Normalmente, se dice que una batería ha finalizado su vida útil cuando ha perdido un 20% de su capacidad inicial [14].

- Capacidad nominal: se refiere al poder de la batería para almacenar o suministrar energía eléctrica, comúnmente se expresa en amperios-hora (Ah) [20].

La capacidad se especifica a un determinado régimen de descarga, y dependerá de dos factores: factores de diseño y factores operacionales. Entre los factores de diseño se incluyen la cantidad de material activo, el número, diseño y dimensiones de las placas, y la densidad del electrolito. Por su parte, los factores operacionales incluyen: el régimen de descarga, la profundidad de descarga, la temperatura de operación, los voltajes de corte, el ciclado y la “historia” de la batería [14].

Las bajas temperaturas disminuyen la capacidad disponible de las baterías. A bajas temperaturas, durante la descarga, el electrolito no penetra tan profundamente en el material activo de las placas, lo que produce que los voltajes de corte se alcancen antes. Por el contrario, las altas temperaturas aumentan la capacidad, pero tiene un efecto contraproducente que es la disminución del tiempo de vida. Es por ello, que la mayoría de los fabricantes recomiendan utilizar las baterías entre (20 y 30) °C [14].

Otro de los factores operacionales que tiene un alto impacto sobre la capacidad nominal, es el régimen de descarga. Cuando se descarga una batería lentamente se obtiene una mayor capacidad que cuando se hace a elevados regímenes de corriente, por lo tanto, se ha de especificar el régimen de descarga cuando se da la capacidad. Los regímenes no se especifican en amperios, sino en horas necesarias para plena descarga hasta un determinado voltaje de corte. Los regímenes usuales en aplicaciones fotovoltaicas suelen estar dentro del rango de corrientes que corresponden a descargas de 10 horas I (C10) a 100 horas I (C100). Un ejemplo sería: “si se dice que una batería tiene una capacidad de 180 Ah a un régimen de C10, esto se interpreta como si la batería se descarga completamente en 10 horas a una corriente constante, la cual se calcula dividiendo la capacidad de la batería, entre el régimen de descarga, en este ejemplo se obtendría una corriente de 18 A” [14].

- Estado de carga (SOC): el estado de carga se define como la cantidad de energía disponible en la batería, y se expresa como un porcentaje de la energía almacenada en una batería completamente cargada, por ejemplo, una batería totalmente cargada se dice que está al 100% del SOC, mientras que una batería descargada al 75% está al 25% de SOC. La descarga de una batería da lugar a un decrecimiento del estado de carga, mientras que la carga da lugar a un aumento del SOC [14]. Los cambios en el estado de carga se reflejan tanto en la densidad del electrolito como en el voltaje de la batería, y los métodos clásicos para determinarlo son: la medida de la tensión en circuito abierto, la determinación de la resistencia interna, la medida de la densidad del electrolito y el cómputo de los amperios-hora de carga/descarga [14].
- Autodescarga: se define como la pérdida de capacidad de una batería que ocurre cuando está en circuito abierto, este fenómeno se debe a mecanismos internos y a pérdidas internas. La autodescarga es diferente en cada tipo de batería y depende principalmente de dos elementos como son: el tipo de aleación utilizada en las rejillas y el tipo de material activo. La autodescarga aumenta con la temperatura, pudiendo llegar hasta un 15% mensual [14].
- Profundidad de descarga (DOD): la profundidad de descarga (DOD) de una batería se define como el porcentaje de la capacidad que ha sido “extraída” de la batería comparada con la capacidad a plena carga. Por definición, la suma del SOC y del DOD debe ser el 100%. Dos parámetros que se pueden utilizar comúnmente son la DOD disponible y promedio diario [14] [4]. La DOD disponible es el máximo porcentaje de la capacidad a plena carga que es permitido utilizar, es decir, el límite máximo de descarga; generalmente es dictada por el voltaje de corte y el régimen de descarga. En sistemas fotovoltaicos autónomos, el voltaje de desconexión de la carga indica el límite de DOD disponible a un determinado régimen de descarga.

Dependiendo del tipo de batería, la DOD disponible puede llegar al 80% para baterías de ciclo profundo o al (15 – 20) % para baterías de arranque. La DOD disponible está relacionada con la autonomía, en términos de capacidad necesaria para suministrar energía al consumo durante un determinado número de días sin energía del generador fotovoltaico. Un sistema con poca DOD disponible resultará en un menor periodo de

autonomía [14]. La profundidad de descarga media diaria es el porcentaje respecto de la capacidad a plena carga que se extrae de una batería con el perfil de consumo medio diario. Para sistemas con un consumo diario constante, la DOD media diaria será mayor en épocas de bajas temperaturas y poca radiación [14].

El número de días de autonomía es el principal factor que determina el tamaño de la batería y, por tanto, la profundidad diaria de descarga. Mientras mayor sea el número de días de autonomía, mayor capacidad, por lo que se utilizará menor porcentaje cada día para un ciclo diario típico. Ya que la mayoría de sistemas fotovoltaicos autónomos son diseñados con al menos 4 días de autonomía, los ciclos diarios son poco profundos; sin embargo, se recomienda utilizar baterías de ciclo profundo a pesar de que el ciclado diario sea del orden del (10 al 15) % ya que de este modo el sistema puede soportar caídas estacionales no previstas debido a periodos de baja irradiación [14].

- Temperatura de operación: como se mencionó en el punto 4.6.2. (capacidad nominal de las baterías), la temperatura de operación es un factor importante en el diseño de banco de baterías, ya que, a menor temperatura, menor es su actividad química interna, lo cual se ve reflejada en una menor capacidad con respecto a la nominal y a mayor temperatura, mayor es su capacidad, pero su vida útil se ve perjudicada [4].

Si la temperatura interna de la batería alcanza el punto de congelación del electrolito, éste puede congelarse y expandirse, causando daños irreversibles y dando fin a la vida útil de la batería. En una batería plenamente cargada el punto de congelación es muy bajo (aproximadamente 60°C). Cuando la batería se descarga su punto de congelación se acerca a 0°C . Por cada 10°C de incremento en la temperatura, la vida de la batería se reduce a la mitad, es decir, si la temperatura promedio de operación es de 35°C , la vida de la batería se reduce en un 50%, porque su temperatura óptima de trabajo es de 25°C (temperatura promedio recomendada por los fabricantes). Por cada 10°C que se reduce la temperatura, la capacidad de la batería se reduce en un 10%, es decir, $1\%/^{\circ}\text{C}$ [14].

- Carga de la batería: los métodos utilizados para la carga de la batería en sistemas fotovoltaicos varían considerablemente. Generalmente se distinguen tres etapas de carga:

- ✓ Etapa normal o *bulk*: es la primera etapa de carga de una batería. Es un primer impulso que se le da a la batería, suministrando una corriente elevada. En este proceso aumenta rápidamente la tensión de la batería, hasta una primera tensión límite. Aquí se consigue que la batería alcance una carga entre (80 y 90) % [23].
En esta primera etapa de carga el regulador no realiza ninguna función, ya que se suministra la potencia máxima que pueda dar el sistema a las baterías. El regulador es necesario para terminar el proceso de carga normal, ya que, si no existiera este elemento, nunca se saldría de esta primera etapa y la elevada corriente procedente de los paneles podría dañar la batería [23].
- ✓ Etapa de flotación: es el último proceso de carga, es decir, se realiza cuando el sistema de baterías ya está cargado al 100% y el regulador mantiene la carga del sistema de acumulación. Se suministra a las baterías una intensidad muy baja para compensar la autodescarga, de forma que sigan cargadas. También en este proceso se puede decir que se realiza un mantenimiento de la carga de las baterías [23].
- ✓ Etapa de ecualización (o gaseo): en esta última etapa, se aplica un voltaje alto de carga con baja intensidad, consiguiendo que el gas ascienda dentro del ácido de la batería, provocando el burbujeo o gaseo. Para realizar esta etapa, se remueve la parte inferior de la batería, igualando las densidades y voltajes entre la parte inferior y la superior, consiguiendo una mezcla de electrolito homogénea y evitando la sulfatación de las placas. Mediante este proceso se consigue igualar el voltaje de las celdas de las baterías [23].

El regulador de carga puede realizar este proceso cada cierto tiempo. Es conveniente realizar este proceso si detecta valores de densidad de electrolito diferentes en las celdas de las baterías. También en baterías con electrolito líquido es recomendable realizar, al menos, de 4 a 6 ecualizaciones al año, para igualar la carga de las celdas y eliminar la sulfatación de la superficie de las placas de plomo [23].

Esta etapa de ecualización no se recomienda realizarla en baterías de AGM o Gel, ya que no hay electrolito líquido y el mismo puede dañarse irreversiblemente [23].

- Rendimiento: el rendimiento de las baterías depende de diversos factores como son: tipo de batería, método de carga, regímenes de carga y descarga, profundidad de descarga y temperatura de operación. Por lo general, el rendimiento aumenta cuando el estado de carga es bajo y disminuye cuando la batería alcanza su plena carga [14].

Para calcular el rendimiento total de la batería, se debe realizar la suma de un rendimiento de voltaje y un rendimiento de carga [14].

El rendimiento de voltaje se determina a través de la temperatura y los regímenes de carga y descarga. Se expresa como la relación entre el voltaje de la batería durante la descarga y el voltaje durante la carga. Por ejemplo, si se supone que en promedio la batería se carga a 14 V y se descarga a 12 V, el rendimiento de voltaje promedio se ubica en el 85% [14].

Por su parte, el rendimiento de carga de una batería, se define como la relación entre los amperios hora sacados de la batería durante la descarga respecto de los amperios hora durante la carga. Debido a las pérdidas en el gaseo y otros mecanismos internos, la batería no puede suministrar todos los amperios que se cargan. A bajos estados de carga, la batería acepta muy bien la corriente, hay poco gaseo y el rendimiento de carga es elevado, pero, cuando la batería llega a su pleno estado de carga, el gaseo y el calentamiento interno reducen el rendimiento de carga. Aunque el rendimiento de carga es difícil de determinar, se puede tomar un 90% como valor típico para la mayoría de las baterías utilizadas en los sistemas fotovoltaicos, sin embargo, éste será diferente dependiendo del lugar de la curva de carga en que se encuentre [14].

Finalmente, el rendimiento total de la batería se define como el producto de los rendimientos de voltaje y de carga. Este rendimiento define la relación entre la energía obtenida de una batería durante la descarga respecto a la que es necesario suministrarle para volverla a su estado de plena carga [14].

- Vida útil de la batería y factores que la afectan: uno de los problemas más recurrentes en los sistemas fotovoltaicos, es que las baterías tengan un tiempo de vida menor del esperado. Después del generador fotovoltaico, la batería es el componente más caro del sistema. Durante el periodo de vida de un sistema fotovoltaico, alrededor de (20 a 30)

años, los costes de mantener y reemplazar las baterías pueden suponer la mayor parte de los costes del sistema. La vida de la batería depende de un gran número de factores de diseño y operacionales, entre los que se encuentran: los materiales y componentes constructivos, la temperatura de operación, la frecuencia y la profundidad de las cargas y descargas, el estado de carga medio y los métodos de carga [14].

El tiempo de vida se puede expresar en términos de ciclos o de años, dependiendo del tipo de batería y de la aplicación. La determinación con exactitud del tiempo de vida de una batería resulta muy difícil debido al gran número de variables involucradas. Sin embargo, su vida se puede maximizar teniendo en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Temperatura de operación: la temperatura de operación tiene importantes efectos en el tiempo de vida de la batería. En general, cuando la temperatura aumenta 10°C las reacciones electroquímicas se doblan dando como resultado una disminución del 30% de su tiempo de vida. La temperatura afecta más el tiempo de vida de las baterías de Plomo-ácido que a las de níquel-cadmio [4] [14].
- ✓ Profundidad de descarga: al someter las baterías a descargas muy profundas, se produce una pérdida de materia activa, disminuyendo de esta manera su vida útil; es por ello que, en los sistemas fotovoltaicos, bien dimensionados, la profundidad de descarga diaria promedio es baja, alrededor del (10 al 20) % de su capacidad total. Cuantos más días de autonomía se consideren en el dimensionado de la batería, menor será la profundidad de descarga diaria y mayor su tiempo de vida [14].
- ✓ Sobrecarga: la sobrecarga produce un gaseo excesivo y pérdida de electrolito. El gaseo acelera la erosión de la materia activa de las placas, reduciendo la vida de la batería. El excesivo calentamiento durante la sobrecarga acelera el proceso natural de la corrosión; la corrosión es la actividad electroquímica resultante de la inmersión de dos metales diferentes en un electrolito, o el contacto de dos metales, causando a un material una oxidación, o pérdida de electrones, y al otro una reducción, o ganancia de electrones. La sobrecarga se previene utilizando el regulador de carga adecuado [14].

- ✓ Plena carga: si las baterías de plomo-ácido se mantienen a estados de carga parciales durante mucho tiempo, se produce sulfatación y se puede perder permanentemente capacidad. Los cristales de sulfato pueden crecer y cortocircuitar las placas [14].
- ✓ Mantenimiento: este punto es clave en todo el sistema fotovoltaico y no solo en las baterías, ya que cualquier componente del sistema durará más cuanto mayor sea el mantenimiento. Específicamente en las baterías, se vigila que el nivel del electrolito sea el necesario, manteniendo su concentración, y que las placas siempre se encuentren sumergidas en el electrolito. También, mantener los terminales de conexión eléctricos en buen estado, limpios y sin corrosión, permitirá la ausencia de caídas de tensión o sobrecalentamiento, y una carga igualitaria [14].

2.1.5 Modelo teórico de las baterías en sistemas fotovoltaicos

A pesar de que las baterías son un elemento ampliamente utilizado, siguen siendo uno de los componentes más difíciles de controlar; dentro de ellas se encuentran reacciones electroquímicas que ocultan una gran complejidad [4].

Una batería puede considerarse como una fuente de tensión real. La cual se encuentra compuesta por una fuente de tensión (V_g) y una resistencia (R_g), y que a su vez integra las principales variables del sistema: el estado de carga de la batería (SOC), la corriente que circula a través de ella (I) y la temperatura de trabajo (T) [4].

La fuente de tensión (V_g), representa la tensión en circuito abierto entre terminales. Esta tensión es debida a la energía almacenada en la batería mediante reacciones químicas internas. Evidentemente, este término es directamente proporcional al estado de carga, SOC, de la batería [24].

Por ley de voltaje de Kirchhoff se puede deducir la siguiente expresión:

$$V_g = f. (SOC)$$

$$\text{Deduciendo que: } R_g = f. (I.SOC.T)$$

Por otro lado, (R_g), es la resistencia interna que la batería opone al flujo de energía, es decir, las pérdidas. Este término comprende los efectos del trabajo (corriente, temperatura y estado de

carga) y el estado de salud de la misma. Una batería dañada presenta un elevado valor de resistencia. La resistencia es inversamente proporcional al estado de carga, esto significa que a medida que la batería se va descargando, la resistencia interna va en aumento [24].

Para el cálculo y análisis, se definirá el comportamiento de la batería por las expresiones indicadas, ya que como se mencionó anteriormente, las baterías ocultan una gran complejidad en su interior [4]

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS BATERÍAS EN ESTUDIO

En este capítulo se muestran los cuestionarios aplicados durante la realización de esta investigación, los cuales tienen como objetivo recaudar la información necesaria de las baterías utilizadas en Venezuela, validando de esta manera los resultados obtenidos.

En este estudio de campo se consultaron dos sectores importantes que tienen que ver con el sector de las baterías para el almacenamiento de energía eléctrica en corriente continua. Esos dos sectores están directamente relacionados con quienes venden los dispositivos (tiendas comerciales) y los usuarios finales a nivel residencial (principalmente). La consulta de ambos sectores debe aportar la información base requerida en esta investigación, la cual es crucial para verificar cuales son las baterías más utilizadas, las razones de su implementación, sus fallas, entre otros aspectos.

La contabilización para determinar el valor de la muestra no se pudo llevar a cabo, ya que se desconoce el valor total de la población, requisito indispensable para la aplicación de la ecuación estadística.

En el país no se tienen valores ni estadísticas del número de usuarios de sistemas fotovoltaicos, así como tampoco de la población de empresas de energía solar fotovoltaica o que suministran sistemas de respaldo. Al no contar con dichos registros, la muestra total del instrumento aplicado no fue calculada estadísticamente

3.1 CUESTIONARIO PARA ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES

Para llevar a cabo la recolección de datos sobre las baterías en estudio, se diseñó un instrumento de campo tipo cuestionario de 11 preguntas abiertas a proveedores de sistemas de energía solar

fotovoltaica y sistemas de respaldo como inversores cargadores. Dicho cuestionario se implementó presencialmente en la ciudad de Mérida y telefónicamente a tiendas ubicadas en otras ciudades del país.

El total de la muestra fue de 9 proveedores. El instrumento definitivo se muestra al final en Apéndice 1.

3.1.1 Resultados

A continuación, se registraron y procesaron los resultados obtenidos de cada una de las preguntas realizadas con su respectivo análisis, utilizando las herramientas gráficas más adecuadas en cada caso.

Pregunta N° 1: ¿Cuáles son las baterías más vendidas para su aplicación en instalaciones solares autónomas o como sistemas de respaldo doméstico (marca)?

Se le preguntó a los encuestados cuáles son las baterías más vendidas en su establecimiento. Las respuestas se detallan a continuación:

- Aton
- Cofive
- Denky
- Huawei
- Matrix
- Rolls
- Trojan
- Ultracell
- Victron energy
- Zte

Se puede observar que existen establecimientos que solo ofrecen las baterías que ellos mismos diseñan, es decir, se encuentran patentadas por su marca. Mientras que otros proveedores importan las baterías. De las baterías mencionadas, la más ofrecida es la de la marca canadiense Rolls con un 29%, le sigue la marca Huawei con un 15% y las 8 baterías restantes poseen un 7% cada una.

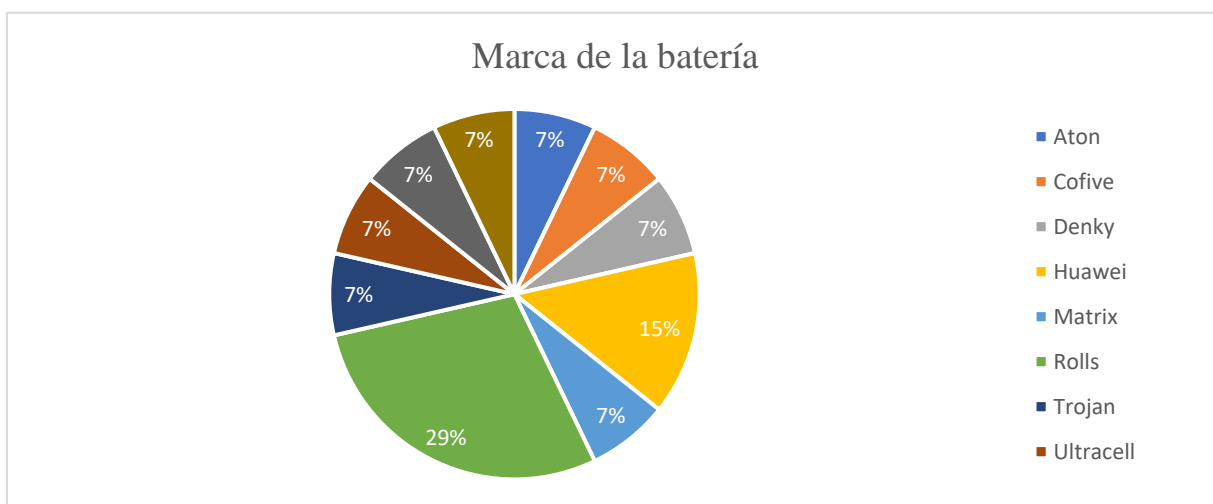


Gráfico 3.1 Marcas de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 2: ¿Qué tipo de baterías son (Gel, Plomo ácido, Litio, otras)?

Esta pregunta permitió conocer que las baterías que se comercializan en Venezuela son las de tipo gel, plomo ácido y litio. Las más utilizadas son las de gel debido a su bajo costo, por ello cuentan con un 58%, luego le siguen las de litio con un 29% y por último las de plomo ácido con solo un 13%.

Cabe aclarar, que las baterías de tipo gel no son las mejores en cuanto a calidad y duración. No obstante, la situación económica que enfrenta el país actualmente, hace que los usuarios o clientes hagan su elección en base al menor costo de inversión, y no considerando la mejor opción a largo plazo.

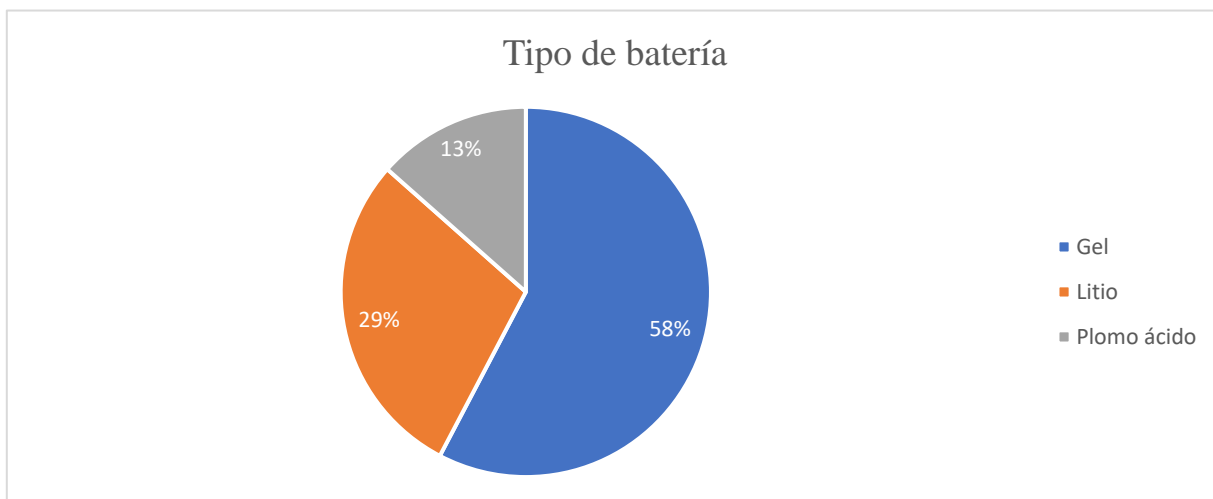


Gráfico 3.2 Tipo de baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 3: ¿Cuáles son sus voltajes nominales?

Respecto a la pregunta número 3, se conoce que, de los 9 establecimientos encuestados, todos ofrecen baterías de 12 V (voltios), siendo estas las más utilizadas. También tienen disponibles baterías de 6 V, 24 V y 48 V, aunque estas últimas no son tan aplicadas en sistemas residenciales.

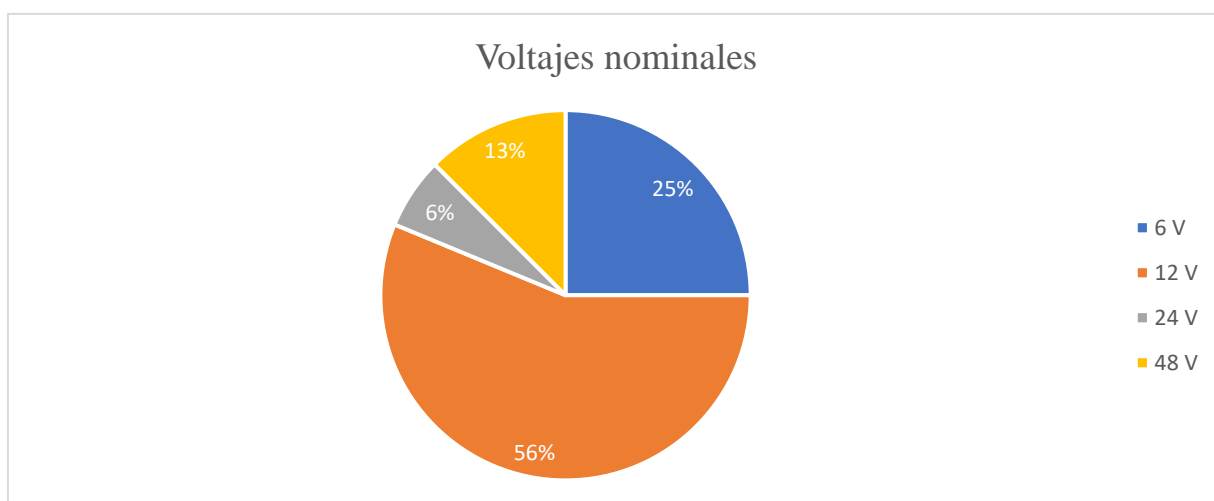


Gráfico 3.3 Voltajes nominales de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 4: ¿Qué capacidad poseen en Amperios horas (Ah)?

Las baterías más vendidas son las de 100 Ah (Amperios hora) y 200 Ah. En el mercado venezolano se pueden encontrar también de 20 Ah, 65 Ah, 150 Ah, 300 Ah hasta 2.900 Ah. Sin embargo, no es común que baterías de tanto amperaje sean utilizadas para sistemas residenciales.

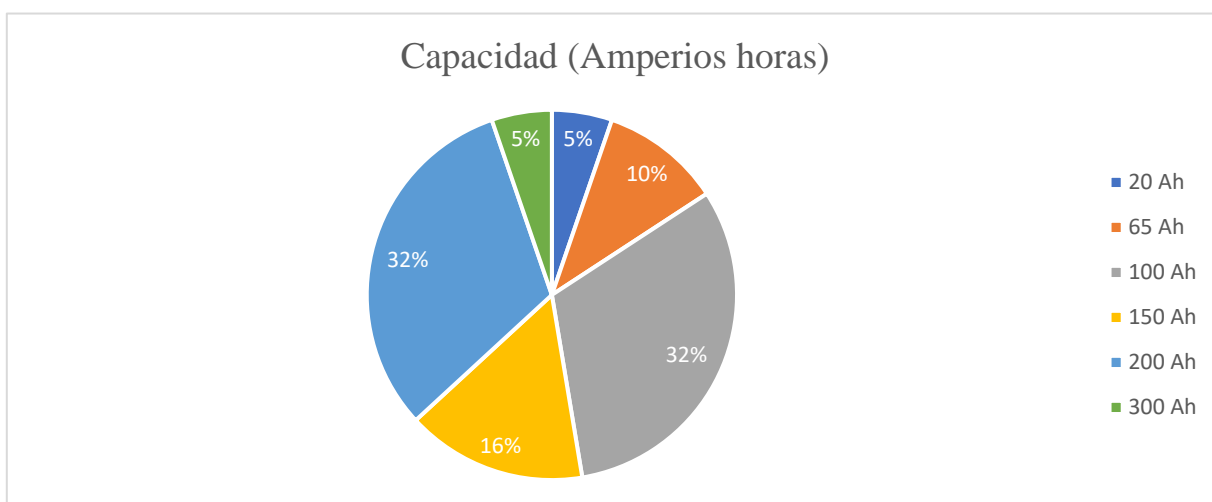


Gráfico 3.4 Capacidad de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 5: ¿Para cuántos ciclos fueron diseñadas las baterías?

Las baterías más vendidas en Venezuela están diseñadas para 1.200 ciclos, aunque también existen opciones mejores como lo son las de 2.000, 3.600 y 5.000 ciclos. En esta pregunta se evidenció que muchas veces, el personal a cargo de estos establecimientos no poseen conocimiento del producto en la venta. De los 9 proveedores consultados, 2 no respondieron a la pregunta.

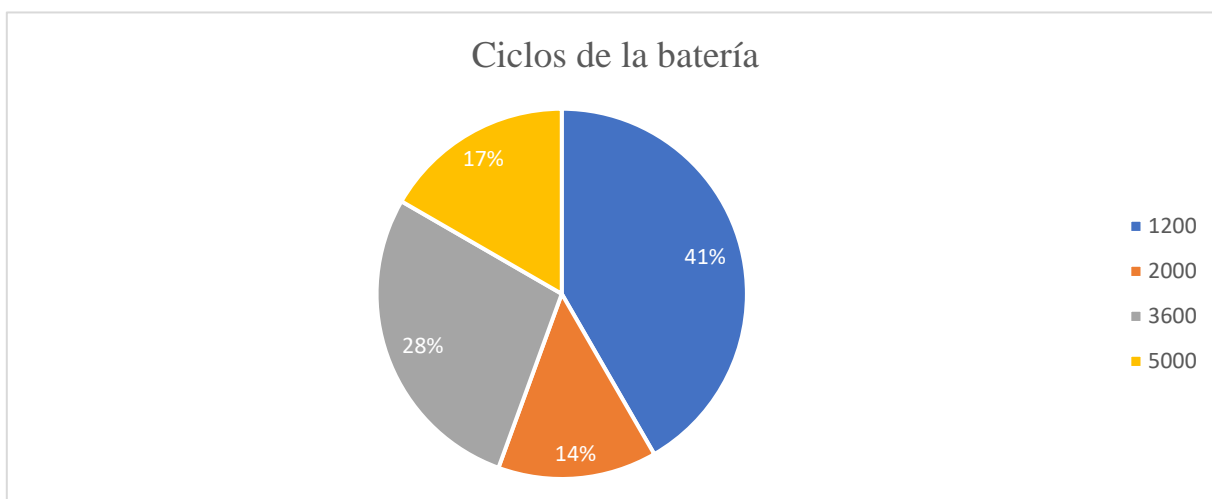


Gráfico 3.5 Ciclos de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 6: ¿Cuánto es la duración de las baterías (vida útil en años)?

En esta pregunta, 5 establecimientos encuestados (que representan el 56 %) respondieron que ofrecen baterías con una vida útil comprendida entre 3 y 5 años, lo que refleja que, así como en las otras preguntas, la elección de la batería es cuestión de costos y no de calidad. Las baterías con una duración entre 10 y 12 años en ocasiones llegan a costar el doble de las que duran 3 y 5 años. Nótese que las baterías de mayor duración apenas duplican el costo de inversión, mientras que su duración se eleva casi tres veces.

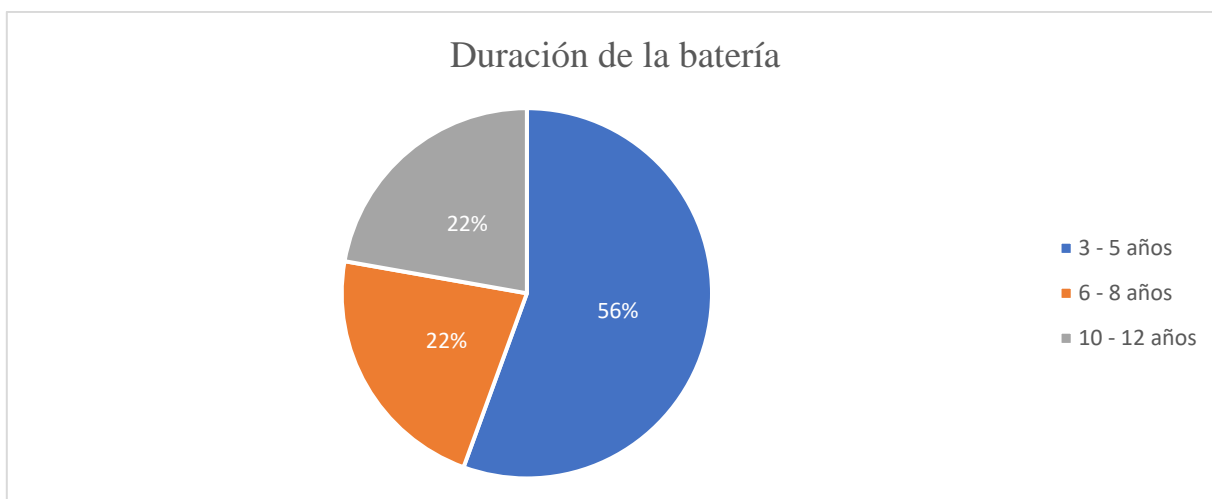


Gráfico 3.6 Vida útil de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 7: ¿Cuál es la temperatura de funcionamiento de dichas baterías?

Las temperaturas de funcionamiento de las baterías más comunes en el mercado local de Venezuela, oscila entre los 20 y 30 °C. Sin embargo, las baterías de litio pueden llegar a trabajar hasta los 60 °C. De la literatura se conoce que el rango ideal de funcionamiento de estos dispositivos de almacenamiento de energía oscila entre 10 y 30 °C.

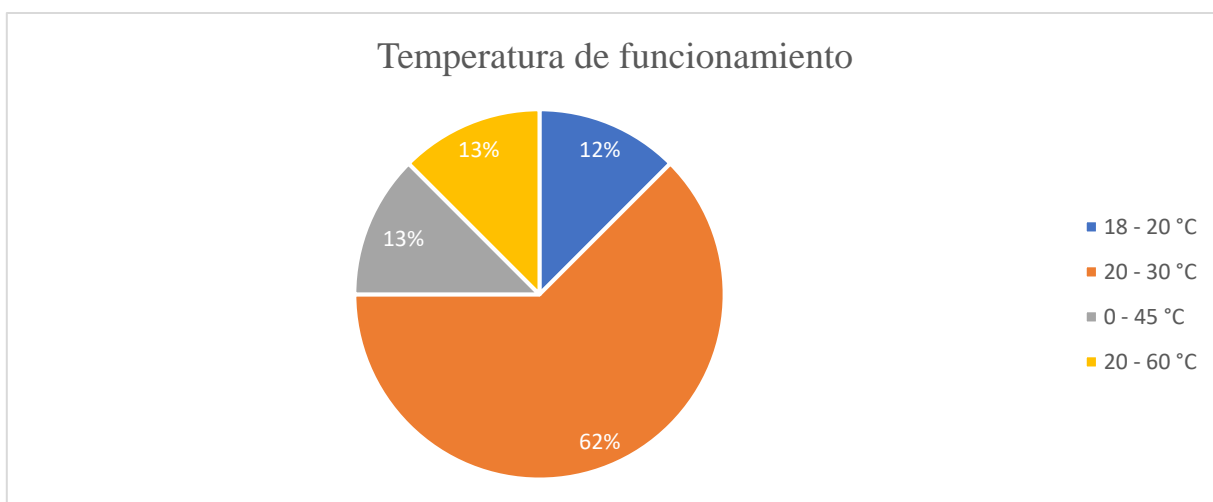


Gráfico 3.7 Temperatura de funcionamiento de las baterías más vendidas en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 8: ¿Qué costo tienen estos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica?

En esta pregunta se detalla el costo suministrado por los establecimientos comerciales, el cual varía según el tipo, marca, voltaje y capacidad de la batería.

Tabla 3.1 Costo de la batería según establecimientos comerciales.

Batería	Tipo	Voltaje	Amperios horas	Costo
Aton	Gel	12 V	200 Ah	380 US\$
Cofive	Gel	12 V	100/200 Ah	260 US\$ - 420 US\$

Tabla 3.1 Costo de la batería según establecimientos comerciales. Continuación.

Denky	Gel	12 V	100/200 Ah	204 US\$ - 410 US\$
Huawei	Litio	48 V	120 Ah	1.250 US\$
Matrix	Gel	12 V	100/220 Ah	275 US\$ - 420 US\$
Rolls	Plomo ácido	6 – 12 V	235/450 Ah	200 US\$ - 500 US\$
Trojan	Plomo ácido	6 – 12 V	225/445/1500/ 2.560 Ah	290 US\$ - 610 US\$ - 1.500 US\$ - 2.000 US\$
Ultracell	Gel	12 V	150/200 Ah	360 US\$ - 450 US\$
Victron energy	Gel	12 V	110/220 Ah	366 US\$ - 528 US\$
	Litio	25.6 V	60/100/200/300 Ah	693 US\$ - 1001 US\$ - 1683 US\$ - 2534 US\$
Zte	Gel	12 V	100 Ah	200 US\$
	Litio	12 - 24 - 48 V	100 Ah	130 US\$ - 460 US\$ - 920 US\$

En la tabla 3.1 se puede observar que el precio de las baterías más vendidas en el mercado venezolano oscila entre 200 US\$ a 1.000 US\$, ya que por encima de este monto no tienen tanta demanda por parte de los usuarios de sistemas fotovoltaicos a nivel residencial.

Pregunta N° 9: ¿Cuál es el tiempo máximo de garantía de las baterías que otorga su establecimiento comercial?

Todos los establecimientos comerciales consultados otorgan garantía a sus clientes. Las baterías de tipo gel son las que poseen un menor tiempo de garantía, siendo este de 3 a 6 meses. Las baterías de tipo litio tienen una garantía comprendida entre 1 a 3 años. Lo que sigue demostrando que dichas baterías son las mejores de Venezuela.

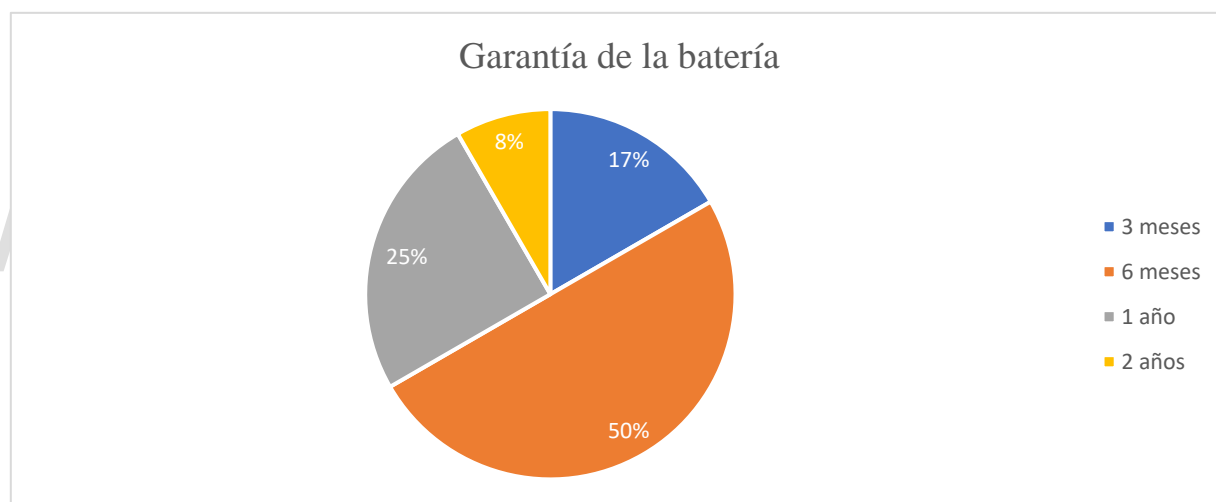


Gráfico 3.8 Garantía de las baterías otorgada en establecimientos comerciales.

Pregunta N° 10: ¿Cuáles son las fallas más comunes reportadas por los usuarios?

De los 9 establecimientos encuestados, solo 3 respondieron que sus baterías habían presentado fallas. No obstante, dichas fallas eran causadas por agentes externos o el uso incorrecto que le dan los usuarios y no por fallas en sus equipos (baterías defectuosas). Como la pregunta fue abierta, las respuestas se detallan a continuación para su análisis:

- “Fallas causadas por los apagones y supervisores quemados”

- “Uso de la batería cuando está por debajo de 30% de carga (para las de gel)”
- “Uso de la batería cuando está por debajo de 50% de carga (para las de gel)”

A partir de los aspectos anteriormente mencionados, se puede observar que, en la mayoría de los casos, son los usuarios quienes producen las fallas, ya que la batería trabaja fuera de las condiciones ideales de funcionamiento.

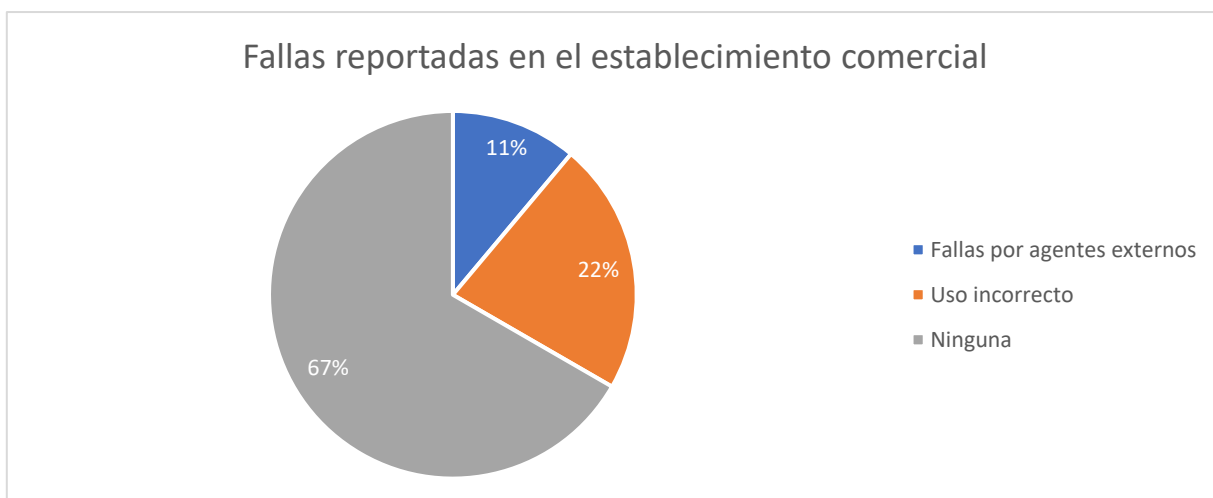


Gráfico 3.9 Fallas reportadas por los usuarios a establecimientos comerciales.

Pregunta N° 11: ¿Cuál es la batería más utilizada para sistemas residenciales?

Al igual que en la pregunta anterior, las respuestas se muestran a continuación:

- “Gel de 24 V”
- “Gel de 200 Ah porque no emite gases”
- “Batería de gel de 65 Ah para un apartamento tipo estudio y 100 Ah para un apartamento grande”
- “Batería de plomo ácido marca Rolls de 6 V y 235 Ah”
- “Batería de gel de 12 V y 100 V”
- “Baterías de gel de 100 Ah y 200 Ah”
- “Batería de plomo ácido de 12 V y 5 Ah”

- “Baterías de 100 y 200 Ah”
- “Las de tipo gel de 12 V”

Siendo la pregunta número 11, la última del cuestionario aplicado a los establecimientos comerciales, se puede concluir que las baterías más comercializadas en el país son las de tipo gel de 12 V y 100-200 Ah. En cuanto a la marca, es un aspecto que varía, sin embargo, las de plomo ácido, son de las marcas Rolls o Trojan. Los pocos establecimientos que ofrecen las de tipo litio, son de las marcas Victron energy, Huawei o Zte.

Como las de tipo gel son las más vendidas, es común encontrar establecimientos que hayan diseñado sus baterías y por dicha razón, llevan el nombre de su marca registrada.

3.2 CUESTIONARIO PARA USUARIOS DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A NIVEL RESIDENCIAL Y SISTEMAS DE INVERSOR-CARGADOR

El instrumento aplicado a los establecimientos comerciales, permitió desarrollar el cuestionario que posteriormente se realizó a los usuarios de sistemas de energía solar fotovoltaica. Se desarrolló una encuesta cerrada y se aplicó vía electrónica por medio de la plataforma Google Forms, para así facilitar a los encuestados la resolución de la misma. El objetivo fue obtener información de la experiencia y satisfacción de los usuarios, y de esta manera contrastar las respuestas facilitadas por los establecimientos consultados previamente.

El total de la muestra fue de 10 personas, ya que en Venezuela es poco frecuente la implementación de energía solar a nivel residencial. Este cuestionario se encuentra adjunto en la parte de anexos (Apéndice 2).

3.2.1 Resultados

Los resultados obtenidos de cada una de las preguntas realizadas se presentan a continuación con el fin de procesarlos y analizarlos, empleando las herramientas gráficas pertinentes en cada caso como se presentó anteriormente.

Pregunta N° 1: ¿Especifique el tipo de instalación de suministro de energía que posee?

El fin de esta primera pregunta, fue conocer con qué tipo de instalación contaban los usuarios, ya que, en Venezuela es común que los sistemas residenciales de energía solar fotovoltaica sean de respaldo y no autónomos, es decir, que se encuentren aislados de la red y para soportar las cargas eléctricas durante un tiempo determinado. También el tipo de instalación determina el número de baterías utilizadas en el sistema.

El cuestionario reflejó que un 70 % de los encuestados poseen un sistema de respaldo energético mediante inversor híbrido: inversor-cargador. Lo que confirma que estos sistemas son los de uso frecuente en el país.

Tabla 3.2 Tipo de instalación de suministro de energía.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Sistema de energía solar fotovoltaica autónomo (sistema aislado de la red eléctrica)	1
Energía solar fotovoltaica como sistema de respaldo o emergencia	2
Sistema de respaldo energético mediante inversor híbrido: inversor-cargador	7
Otro sistema	-
TOTAL	10

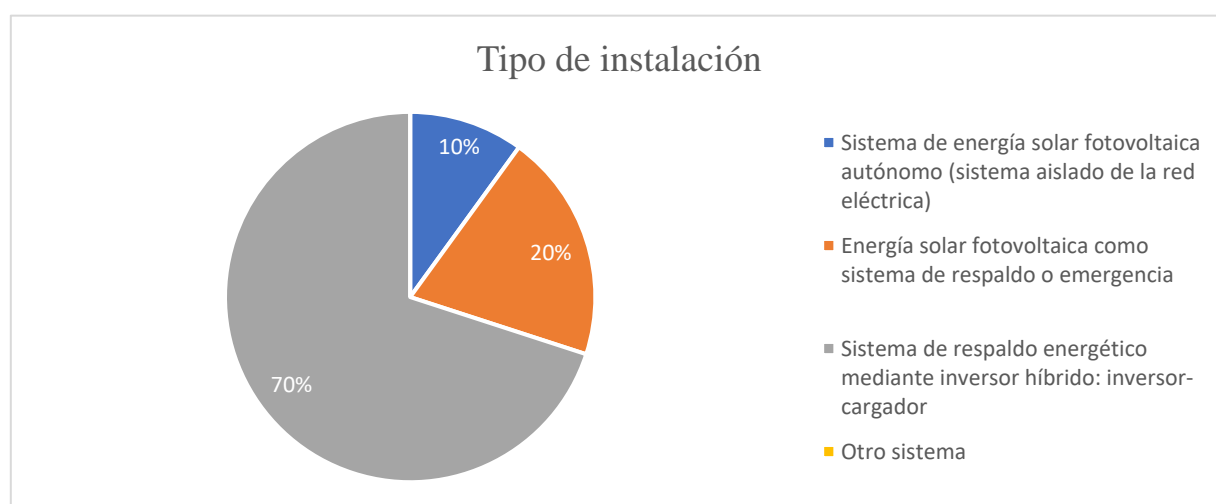


Gráfico 3.10 Tipo de instalación de suministro de energía.

Pregunta N° 2: ¿Puede especificar la potencia nominal del sistema de suministro de energía, ya sea como sistema autónomo o de respaldo?

En esta pregunta se evidenció que el 50% de los usuarios tienen un sistema de potencia nominal mayor a 2 kilovatios (kW), lo que indica que cuentan con un sistema de mayor capacidad. Ningún encuestado posee un sistema menor a 500 W, evidenciando que, debido a la crisis eléctrica que se presenta en el país, los usuarios buscan sistemas fotovoltaicos o sistemas inversores-cargadores que tengan la capacidad de generar o almacenar más energía eléctrica, lo que a su vez permite alimentar un mayor número de artefactos por un periodo de tiempo más prolongado.

Tabla 3.3 Potencia nominal del sistema de suministro de energía.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Menor a 500 vatios (W)	-
Entre 500 W a 1 kW	2
Entre 1 a 2 kW	3
Mayor a 2 kW	5
TOTAL	10

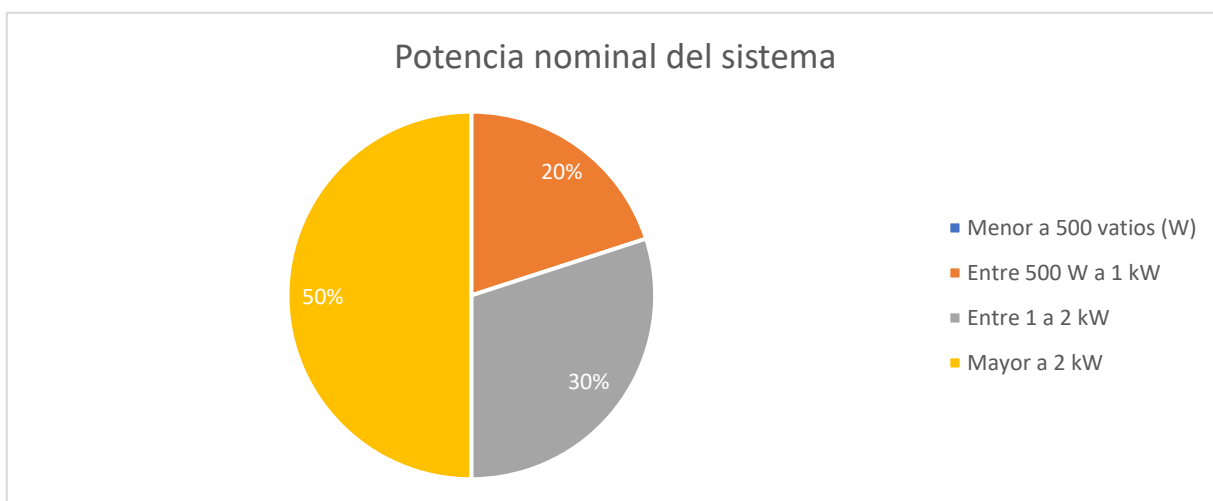


Gráfico 3.11 Potencia nominal del sistema de suministro de energía.

Pregunta N° 3: ¿Cuántas baterías utiliza su sistema de almacenamiento de energía?

El 40% de los encuestados respondieron que el sistema de almacenamiento de energía que tienen usa 2 baterías, el 40% funciona con 4 baterías, y solo el 20% utiliza 3 baterías. En efecto, esta pregunta demuestra que, es común que los sistemas fotovoltaicos residenciales e inversores híbridos en Venezuela, son instalados con el fin de alimentar más cargas que solamente la iluminación.

Tabla 3.4 Número de baterías utilizadas en el sistema.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
1	-
2	4
3	2
4	4
Entre 5 y 10 unidades	-
TOTAL	10

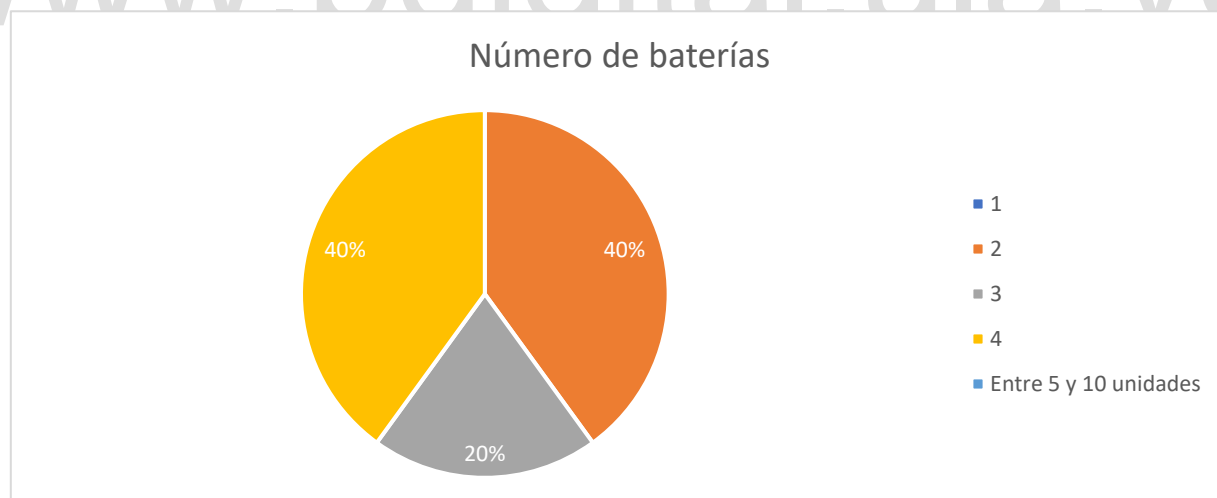


Gráfico 3.12 Número de baterías utilizadas en el sistema.

Pregunta N° 4: ¿Cuál es la marca de la batería utilizada en su sistema fotovoltaico o el sistema de respaldo energético que disponga?

En cuanto a la marca, solo dos usuarios que representa el 20%, respondieron que la batería usada en sus sistemas es Rolls. El 80% restante no poseen baterías de las marcas suministradas por las empresas consultadas, lo que revela que dichos usuarios no adquirieron sus sistemas fotovoltaicos o de respaldo en estos establecimientos comerciales.

Tabla 3.5 Marca de la batería utilizada en el sistema.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Cofive	-
Denky	-
Huawei	-
Rolls	2
Trojan	-
Zte	-
Otras	8
TOTAL	10

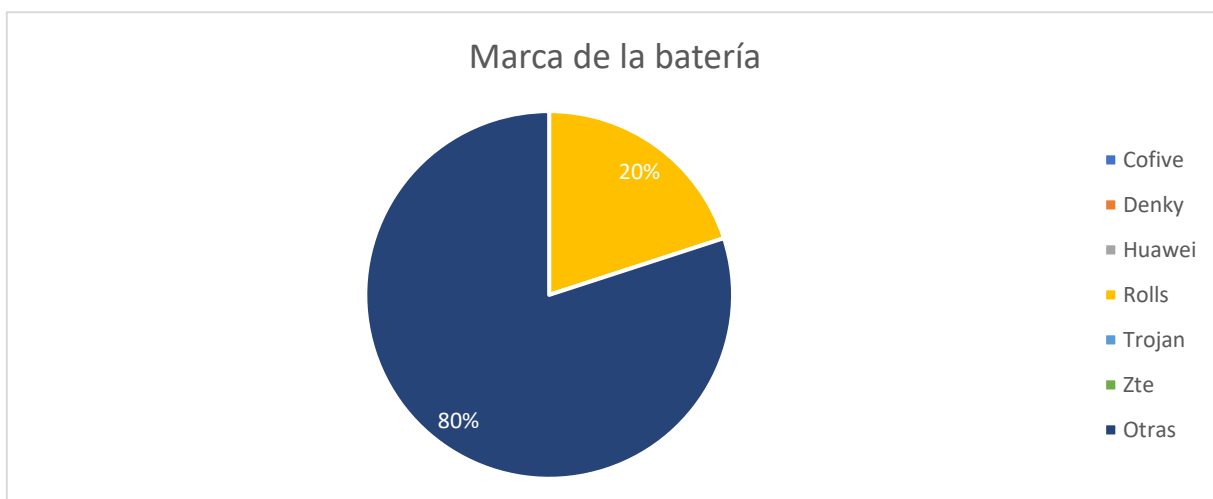


Gráfico 3.13 Marca de la batería utilizada en el sistema.

Pregunta N° 5: ¿Qué tipo de batería es?

Con respecto al tipo de batería, al igual que en los resultados de las encuestas realizadas a los establecimientos comerciales, la más adquirida es la de gel, que cuenta con un 60%. Comparando las respuestas de ambos cuestionarios, podemos concluir que los tipos de baterías mencionados (gel, plomo ácido y litio) son los comercializados en Venezuela, y debido al factor económico, las baterías de plomo ácido son más demandadas y adquiridas que las de litio.

Tabla 3.6 Tipo de batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Gel	6
Litio	1
Plomo ácido	3
Otras	-
TOTAL	10

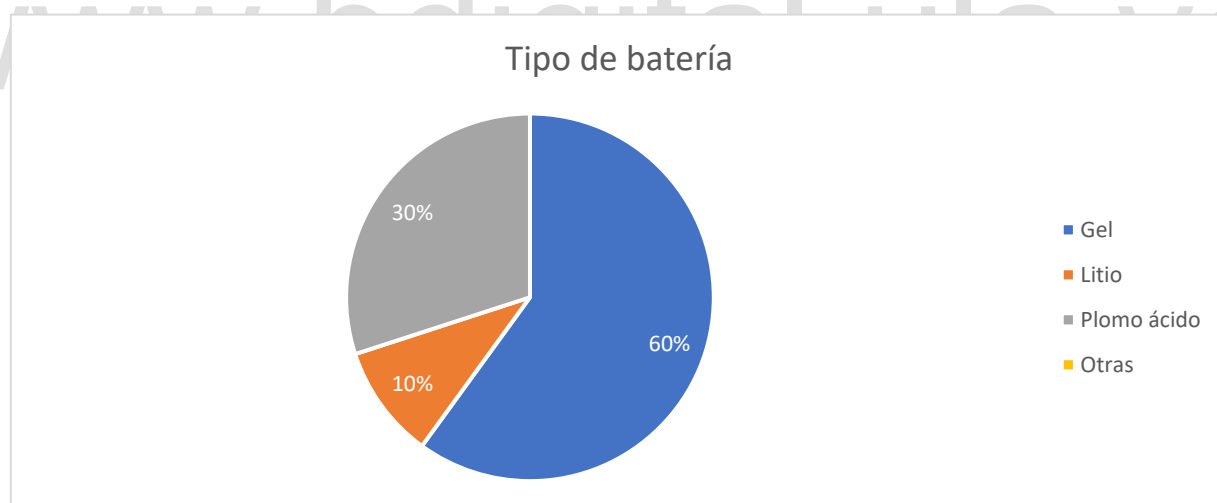


Gráfico 3.14 Tipo de batería que posee el usuario.

Pregunta N° 6: ¿Cuál es el voltaje nominal de la batería?

En esta pregunta, se demuestra que existe concordancia en la información obtenida de ambos cuestionarios, puesto que las baterías de 12 V son las más utilizadas en sistemas residenciales. De los 10 usuarios consultados, 8 que representan el 80%, poseen baterías del voltaje mencionado anteriormente.

Tabla 3.7 Voltaje nominal de la batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
6 V	1
12 V	8
24 V	-
48 V	1
TOTAL	10

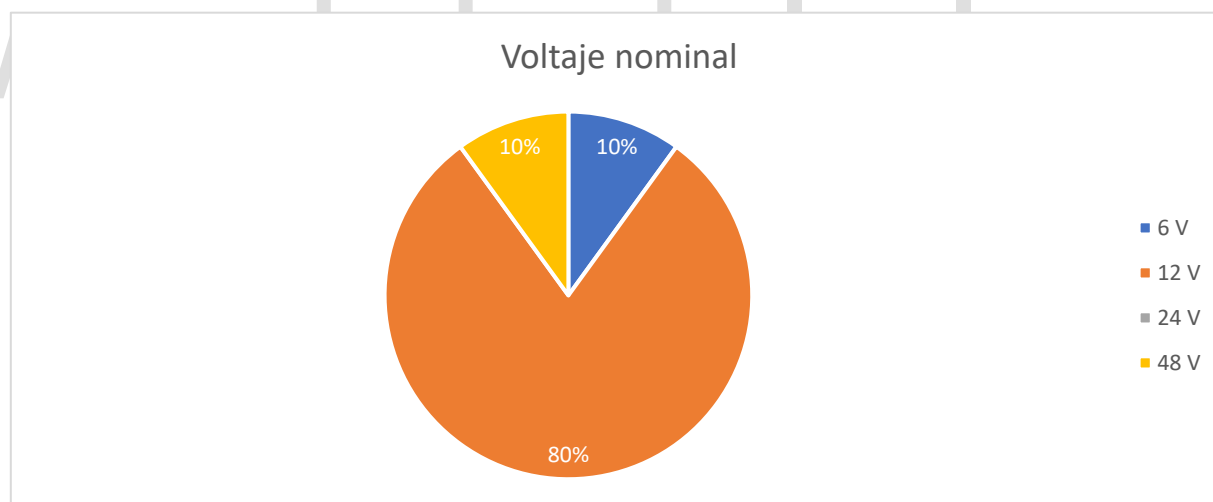


Gráfico 3.15 Voltaje nominal de la batería que posee el usuario.

Pregunta N° 7: ¿Qué capacidad poseen las baterías (Amperios horas)?

Al igual que en el primer cuestionario presentado en esta investigación, los usuarios reportan que las baterías que utilizan sus sistemas de energía eléctrica fotovoltaica tienen una capacidad de 100 Ah y 200 Ah.

Tabla 3.8 Capacidad de la batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Menor de 100 Ah	-
100 Ah	4
Mayor de 100 Ah	6
No sabe o no contesta	-
TOTAL	10

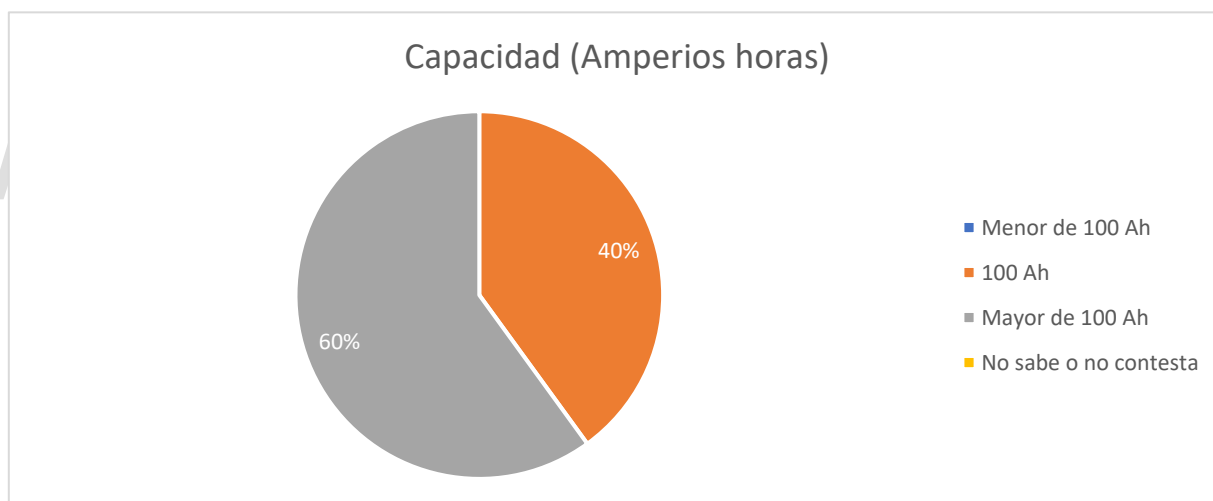


Gráfico 3.16 Capacidad de la batería que posee el usuario.

Pregunta N° 8: ¿Para cuántos ciclos fue diseñada la batería?

En esta pregunta, el 40% de los usuarios respondieron que sus baterías fueron diseñadas para 2.000 ciclos, otro 30% respondió que, para menos de 2.000 ciclos, un 20% posee baterías para más de 2.000 ciclos y un usuario que representa el 10% no sabe cuántos ciclos tienen las baterías de su sistema fotovoltaico o de respaldo mediante inversor-cargador (sistema híbrido).

Tabla 3.9 Ciclos de la batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Menor de 2000	3
2000	4
Mayor de 2000	2
No sabe o no contesta	1
TOTAL	10

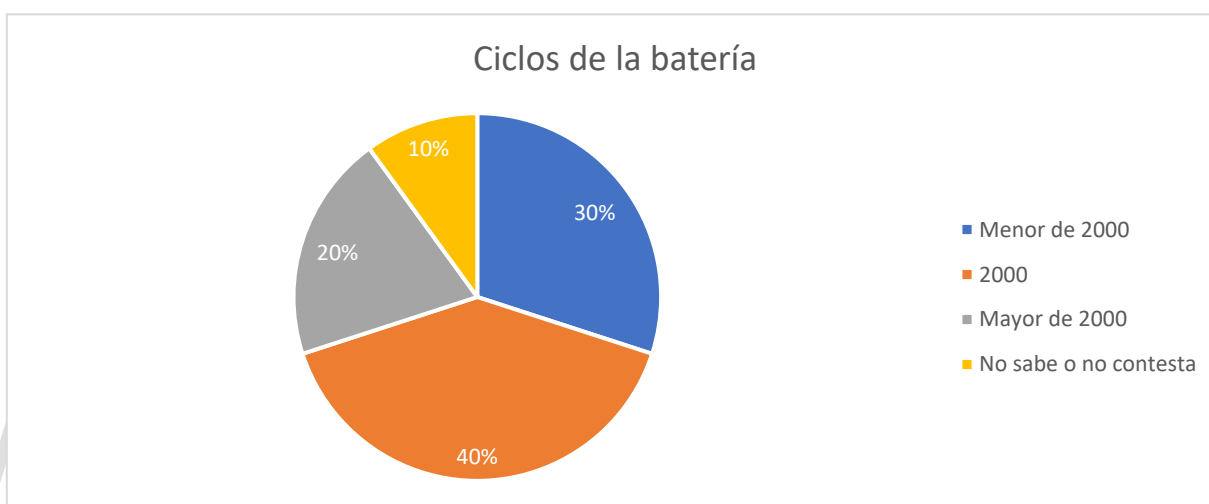


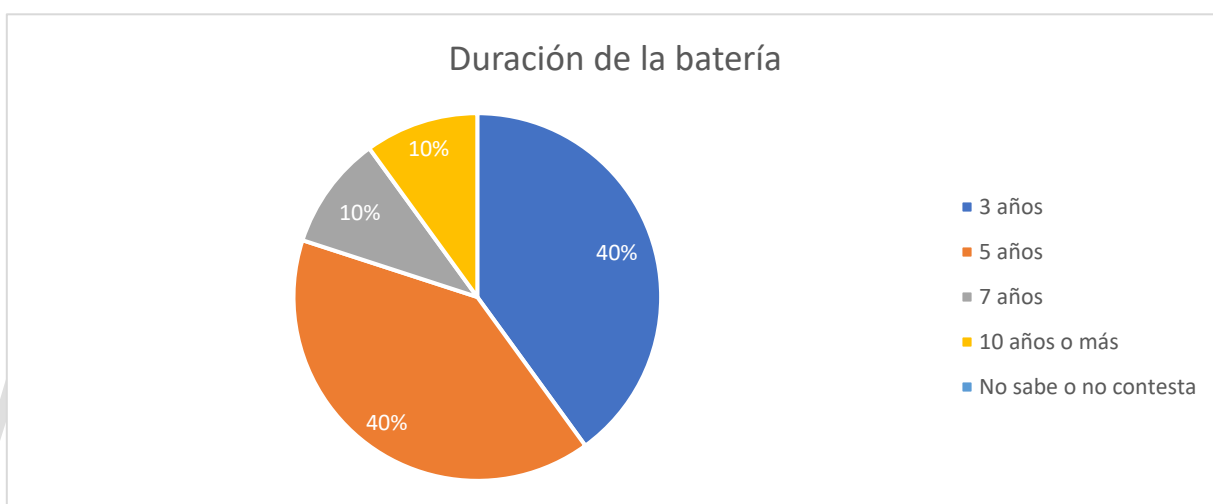
Gráfico 3.17 Ciclos de la batería que posee el usuario.

Pregunta N° 9: ¿Cuánto es la duración de la batería (vida útil en años)?

La vida útil de las baterías que poseen los usuarios oscilan entre los 3 y 5 años, lo que daría un total de 80%. Contrastando la información recolectada anteriormente del otro cuestionario, se observa que existe total relación, lo que sugiere que, aunque los usuarios no posean baterías de las marcas suministradas por los establecimientos comerciales consultados, las baterías tienen las mismas características.

Tabla 3.10 Duración de la batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
3 años	4
5 años	4
7 años	1
10 años o más	1
No sabe o no contesta	-
TOTAL	10

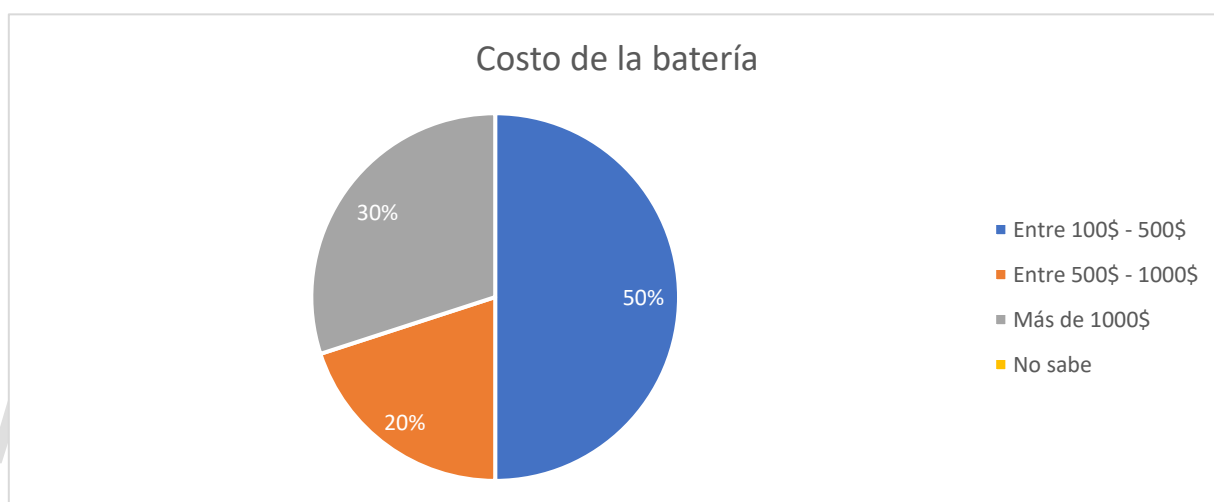
**Gráfico 3.18 Duración de la batería según usuarios.****Pregunta N° 10: ¿Qué costo tuvo dicha batería o grupo de baterías?**

El 50% de los encuestados reportaron que su grupo de baterías tuvo un valor comprendido entre 100\$ y 500\$, lo que corresponde con el costo de las baterías de tipo gel suministrado por los establecimientos comerciales. Respecto al otro 50%, 3 usuarios poseen sistemas conformados por 4 baterías, lo que eleva el costo del sistema, superando los 1.000 US\$. El 20% restante, adquirió un sistema con un costo comprendido entre 500 US\$ y 1.000 US\$.

En definitiva, existe concordancia entre el costo informado por los vendedores y el reflejado por los usuarios.

Tabla 3.11 Costo de la batería según usuarios.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
Entre 100 US\$ - 500 US\$	5
Entre 500 US\$ - 1.000 US\$	2
Más de 1.000 US\$	3
No sabe	-
TOTAL	10

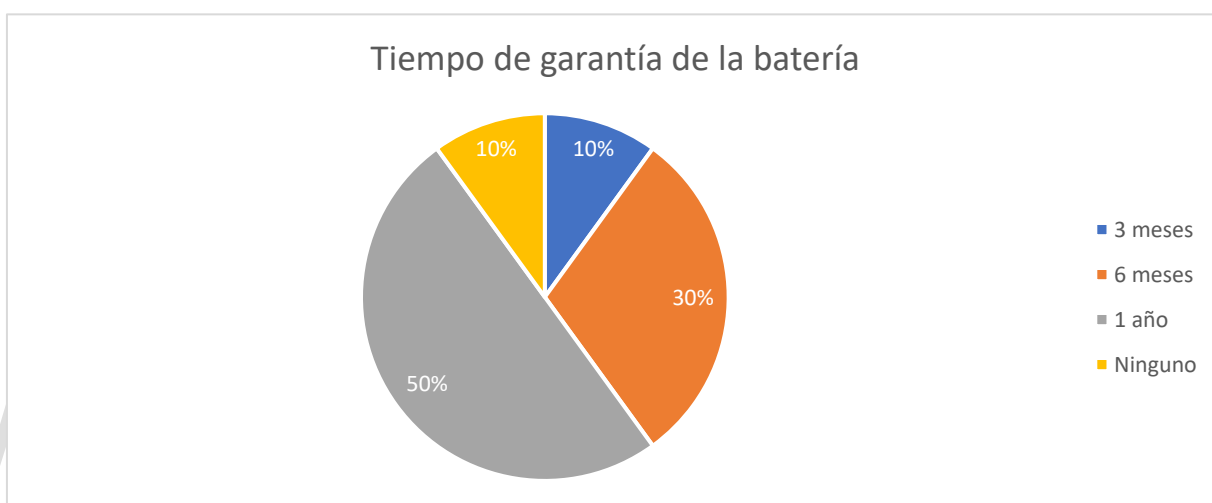
**Gráfico 3.19 Costo de la batería según usuarios.**

Pregunta N° 11: ¿Cuál es el tiempo de garantía de la batería que le otorgó el establecimiento comercial?

Aunque en los establecimientos comerciales encuestados el tiempo de garantía que predominaba fue de 3 y 6 meses, al 50% de los usuarios les fue otorgado 1 año de garantía, un 30% se le otorgó 6 meses y solo un usuario recibió 3 meses por su grupo de baterías.

Tabla 3.12 Tiempo de garantía de la batería.

Categorías de respuesta	Número de encuestados
3 meses	1
6 meses	3
1 año	5
Ninguno	1
TOTAL	10

**Gráfico 3.20 Tiempo de garantía de la batería recibida por el usuario.****Pregunta N° 12: ¿Cuál es la falla más frecuente presentada en su batería?**

Se utilizó un método de pregunta con respuesta abierta, en la que se dio libertad al encuestado para responder, de ser el caso, la falla presentada en su batería. Dentro de los 10 encuestados, 6 reportaron que su batería o sistema de baterías no ha presentado fallas, un usuario no respondió.

La información suministrada por los 3 usuarios restantes, se presenta a continuación:

- “Poca durabilidad de la batería”
- “Las baterías fallaron antes del año de garantía y fueron reemplazadas por otra marca y modelo, la marca y modelo inicial con la que fue instalada el sistema es la siguiente,

Marca: koyosonic 12v 200Ah gel Modelo: NPCG200 y fueron reemplazadas por la marca Renogy 12v 200Ah gel”

- “La Batería de gel de marca Dongjin Poder no fue eficiente y en un periodo de un año ya no mantenía la carga necesaria para trabajar con el inversor. Disminuía drásticamente el tiempo de uso. De 8 o 6 horas a solo 2 horas. Se cambiaron 3 de 4 baterías. Ahora las baterías marca MCA han mostrado una mejor respuesta y el sistema ha funcionado perfectamente. El costo de las segundas baterías MCA estuvo alrededor de 200 US\$ cada una”

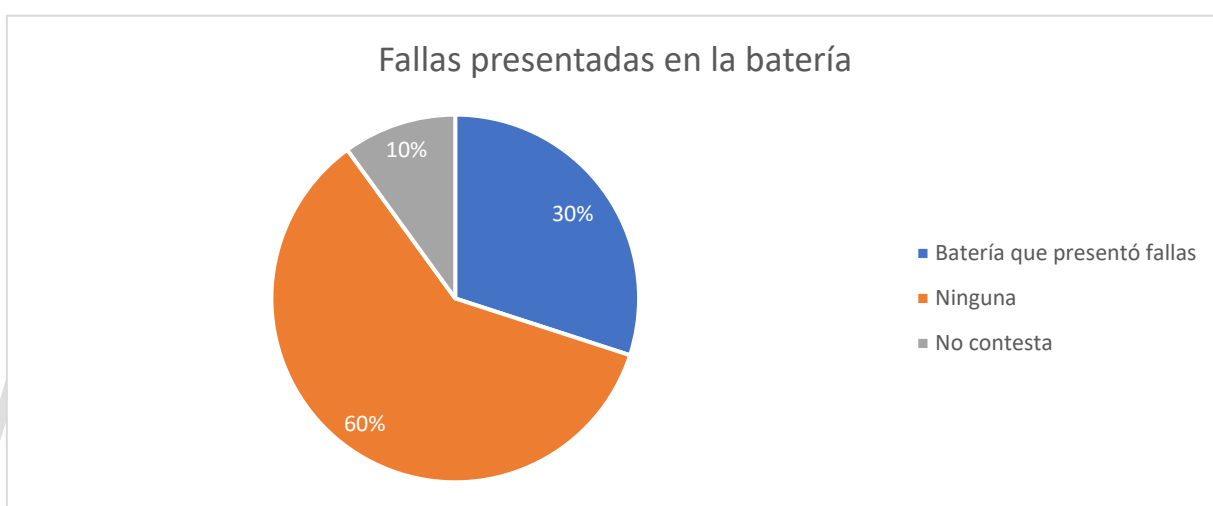


Gráfico 3 21 Fallas presentadas en la batería.

CAPÍTULO 4

SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE LAS BATERÍAS SELECCIONADAS

En este capítulo se muestra la herramienta diseñada (PVSolars), la cual desarrolla un modelo matemático que logra determinar el mejor banco de baterías en base a la relación costo-beneficio mediante indicadores financieros, dando resolución al caso de estudio planteado.

4.1 DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA HÍBRIDA

El tipo de sistema seleccionado para el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica es de respaldo energético mediante inversor híbrido (inversor-cargador), ya que el instrumento de campo aplicado en el capítulo III demostró que este es el tipo de instalación más utilizada en el país a nivel residencial.

En Venezuela, a diferencia de otros países, la energía eléctrica es sumamente económica, por lo que los usuarios de sistemas fotovoltaicos en el país no tienen como objetivo disminuir su factura de electricidad. Las energías renovables están siendo implementadas, como consecuencia de las interrupciones presentadas en la red eléctrica nacional. Por este motivo, los sistemas híbridos funcionan como una opción de respaldo energético.

En PVSolars (*PhotoVoltaic Solar system*), se presentan una serie de pasos para el dimensionamiento de una instalación de tipo híbrido, los cuales se muestran a continuación:

1. Recopilación de la información
2. Cálculo del consumo de energía diario total en caso de no contar con factura de electricidad
3. Determinación de las cargas que se desean respaldar con las baterías (Carga de respaldo)

4. Determinación de las condiciones de radiación solar del sitio (HSP)
5. Determinación de la potencia solar fotovoltaica requerida
6. Determinación del inversor y números de módulos a utilizar
7. Selección del mejor banco de baterías

La herramienta *PVSolars* funciona para usuarios de tipo residencial y pequeños comercios. Sin embargo, para efectos de esta investigación, el tipo de usuario queda delimitado exclusivamente a nivel residencial. En el apartado 4.8 se especificará la herramienta propuesta.

4.2 CASO DE ESTUDIO

Se planteó un caso de estudio cuyos datos fueron extraídos de los resultados arrojados en el instrumento aplicado en el capítulo anterior. Partiendo del tipo de sistema más empleado en Venezuela, así como la potencia del sistema de energía solar fotovoltaica, las características de las baterías y el costo de las mismas, entre otros aspectos.

El caso de estudio propuesto se presenta a continuación:

Se tiene una casa de 120 m², 4 habitaciones, 2 baños, sala-comedor, oficina y vestier. La vivienda está ubicada en la ciudad Mérida perteneciente al estado Mérida, y cuenta con un techo plano de 4% de inclinación, con revestimiento de teja asfáltica.

La carga conectada en esta casa es la siguiente: 2 circuitos de pequeños artefactos, 1 circuito para lavadero, 1 circuito para una secadora, 1 circuito para un calentador y 1 circuito para un aire acondicionado de 12.000 BTU.

Para esta casa se dimensionará un sistema de energía solar fotovoltaica de respaldo energético mediante inversor híbrido (inversor-cargador), con la intención de proteger los equipos de interés ante interrupciones de la red eléctrica. Los equipos a respaldar serán: 10 luminarias, 1 televisor LCD, 1 refrigerador, 1 ordenador portátil y 1 modem-router.

Datos generales del caso de estudio:

La vivienda del caso de estudio cuenta con un área de 120 m². Es importante acotar que se tomó como criterio de diseño un factor de potencia de uno para las cargas de alumbrado y tomacorrientes, por esta razón los Volt-Ampere son equivalentes a Watt.

Tabla 4.1 Datos del caso de estudio.

Área de la Vivienda (m ²)	120	
Circuitos	Número de circuitos	Potencia (W)
Pequeños artefactos	2	3.000
Lavadero	1	1.500
Secadora	1	5.000
Calentador	1	1.500
Aire acondicionado 12000 BTU	1	1.900

La vivienda considerada es de 2da categoría, que corresponden a viviendas de clase media. Este tipo de viviendas cuentan con un área de construcción comprendida entre 120 m² y 250 m² y tiene los servicios para algunos equipos electrodomésticos, incluyendo equipos de aire acondicionado.

4.2.1 Características geográficas y climatológicas de la localidad

Las características geográficas, climatológicas y los niveles de irradiación solar se deben conocer para elaborar el cálculo de la instalación solar fotovoltaica (SPV). Los datos de latitud y longitud fueron extraídos del portal web desarrollado por la Unión Europea, PVGIS, la cual es una aplicación que calcula la producción fotovoltaica. Por su parte, los datos relacionados con la temperatura se obtuvieron de los portales web *Weather Spark* y *Solargis*, que son las bases de datos solares más confiables.

Como fue mencionado anteriormente, el caso en estudio estará localizado en la ciudad de Mérida, estado Mérida.

Tabla 4.2 Características geográficas y meteorológicas.

Ciudad	Latitud (°)	Longitud (°)	Tempe. Máxi. (°C)	Tempe. Mini. (°C)	Temp. Promedio (°C)
Mérida	8,61	-71,14	27	12	24

4.2.2 Estimación de la demanda

La estimación de la demanda es uno de los pasos más importantes para dimensionar cualquier instalación eléctrica. La demanda varía en el tiempo, porque es la cantidad de potencia que un consumidor utiliza. La variación de una carga dada, origina el ciclo de carga, lo que se llama curva de carga (demanda vs tiempo).

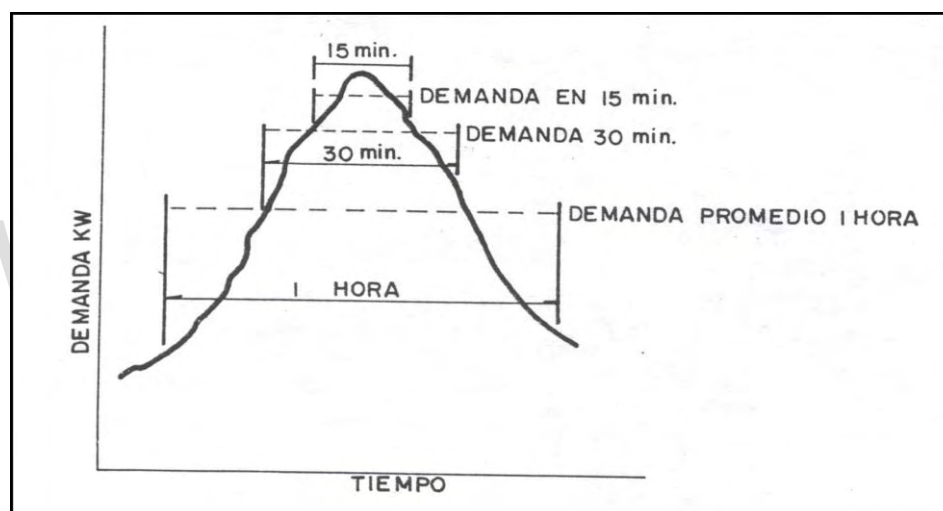


Figura 4.1 Curva de carga [12].

En esta investigación se realizó dicha estimación, ya que actualmente en Venezuela no se suministra la factura del servicio eléctrico a nivel residencial. Para ello, se utilizó el método descrito en el Código Eléctrico Nacional (CEN).

$$D_{m\acute{a}x} = \text{carga conectada} \times F_{dem} \quad (1)$$

$$D_{m\acute{a}x} = D_{alumb+tu\grave{g}} + D_{CE's} \quad (2)$$

$$D_{CE's} = \sum_{i=1}^n D_{CEi} \quad (3)$$

$$D_{CEi} = (\text{potencia nominal}) \times F_{dem} \quad (4)$$

Donde:

- Dmax: demanda máxima
- Cargas conectadas: suma de los valores nominales de todas las cargas del consumidor que tiene probabilidad de estar en servicio al mismo tiempo para producir una Dmax.
- Fdem: factor de demanda. Es la relación entre su demanda máxima y la carga conectada total.
- Dalumb+tug: demanda de iluminación y tomacorriente
- Dces: demanda de cargas especiales

A continuación, se muestran las fórmulas para calcular las cargas conectadas de iluminación, tomacorrientes (tug) y cargas especiales (Tabla 4.3):

Tabla 4.3 Cargas conectadas iluminación, tug y cargas especiales.

Tipo de Carga	Circuitos	Cargas Conectada (VA)
Iluminación y Tug	Iluminación	33*áreaV
	Pequeños artefactos	1.500 ó 3.000
	Lavadero	1.500
Equipos especiales	Secadora	
	Calentador	
	Aire acondicionado	

Para conocer el factor de demanda se tomó como referencia los valores descritos en las tablas 220-18 y 220-11 del CEN (anexo 1 y 2). Para Aires acondicionados y/o Calefacción se considera Fdem=100%.

Por lo tanto, aplicando las ecuaciones anteriormente descritas, la demanda total de la vivienda es (Tabla 4.4):

Tabla 4.4 Determinación de la demanda máxima.

Tipo de Carga	Circuitos	N° de circuitos	Potencia (W)	Fdem	Dmáx (kW)
Alumbrado y Tug	Alumbrado		3960	1	3,960
	Pequeños artefactos	2	3000	1	3,000
	Lavadero	1	1500	1	1,500
					8,460
Total			Aplicando anexo (2)		4,911
Equipos especiales	Secadora	1	5000	1	5,000
	Calentador	1	1500	1	1,500
	Aire acondicionado	1	1900	1	1,900
Total					13,311

Por último, se determinó el consumo diario total de energía por medio de la ecuación (5), dando como resultado 33,344 kWh/día (tabla 4.5).

$$E_{total} = D_{alum+tug} \times h_{alum+tug} + D_{espe} \times h_{espe} \quad (5)$$

Donde:

- E_{total} : energía diaria total consumida
- $D_{alum+tug}$: sumatoria de la demanda de iluminación y tomacorrientes
- $h_{alum+tug}$: sumatoria de horas de consumo diario de iluminación y tomacorrientes
- D_{espe} : demanda de cargas especiales
- h_{espe} : horas de consumo diario de cargas especiales

Tabla 4.5 Cálculo del consumo total diario de energía.

Tipo de Carga	Circuitos	Dmáx (kW)	Hora de consumo diario por salidas (h)	Energía diaria total consumida (kWh/día)
Iluminación y Tug	Iluminación	4,911	4	19,644
	Pequeños artefactos			
	Lavadero			
Equipos especiales	Secadora	5	1	5
	Calentador	1,5	2	3
	Aire acondicionado	1,9	3	5,7
				33,344

4.3 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS QUE SE DESEAN RESPALDAR CON EL BANCO DE BATERÍAS (CARGAS DE RESPALDO)

En la tabla 4,6 se muestra el total de cargas a respaldar.

Tabla 4.6 Determinación de cargas a respaldar.

Artefacto	Cantidad	Potencia por artefacto (W)	Voltaje del artefacto (V)	Horas de uso diario	Consumo de energía diario (kWh/día)	Dmáx.r (kW)
Luminaria	10	10	110	5	500	100
Televisor	1	150	110	2	300	150
Refrigerador Congelador	1	480	110	10	4800	480
Computadora personal	1	480	110	7	3360	480
Modem-router	1	15	110	12	180	15
TOTAL					9,140	1,225

Los valores de potencia por artefacto se tomaron de la página oficial de la Corporación Eléctrica Nacional (Corpoelec) y del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacit).

4.4 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE RADIACIÓN SOLAR DEL SITIO (HSP)

Las horas solar pico (HSP), son el conjunto de horas donde se tiene en promedio 1000 W de radiación por m². Este parámetro posibilita el cálculo de la energía que se recibe en un periodo de tiempo determinado.

Mes	HSP 11°
Enero	5,15
Febrero	5,22
Marzo	4,82
Abril	4,43
Mayo	4,28
Junio	4,41
Julio	4,57
Agosto	4,98
Septiembre	5,14
Octubre	4,77
Noviembre	4,50
Diciembre	4,89

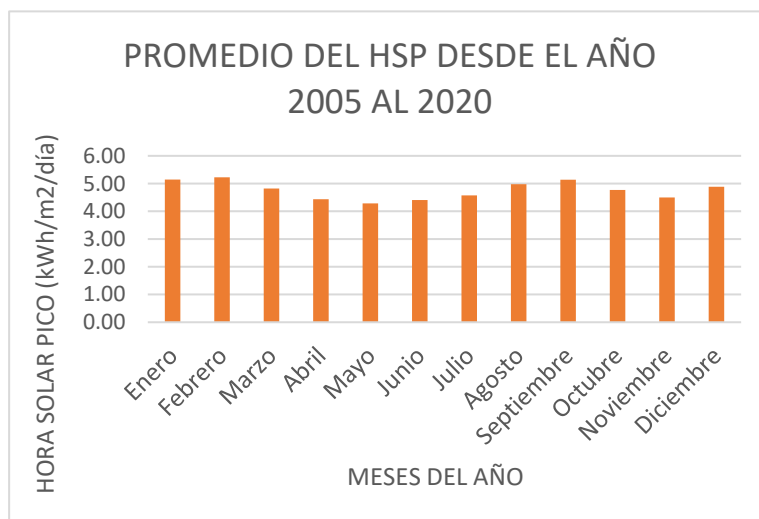


Gráfico 4.1 Promedio hora solar pico. Fuente: Elaboración propia.

El valor que se tomó de HSP corresponde a una recopilación de datos de irradiación solar global con el ángulo de inclinación óptimo (11 grados) comprendida entre los años 2005 al 2020 que proporciona el portal web PVGIS. Como se muestra en el gráfico 4.1. el mes menos favorable es mayo. Con la intención de dimensionar el sistema, tomando en cuenta las peores condiciones (el peor mes), la hora solar pico que se tomó fue de 4,28 kWh/m²/día.

4.5 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA SOLAR FOTOVOLTAICA REQUERIDA

La potencia solar fotovoltaica (PSF) se calculó con la finalidad de seleccionar el inversor adecuado. Para la ecuación se usó el consumo de energía diario (cargas de respaldo) y las horas solar pico.

$$PSF \text{ (kWp)} = \frac{\text{Consumo de energía diario (kWh/día)}}{\frac{\text{Hora solar pico (kWh/m}^2\text{/día)}}{1 \text{ (kW/m}^2\text{)}}} \times (1 + \text{Factor de pérdidas}) \quad (6)$$

$$PSF = 2,77 \text{ kWp}$$

4.6 DETERMINACIÓN DEL INVERSOR Y NÚMEROS DE MÓDULOS A UTILIZAR

4.6.1 Inversor híbrido (inversor-cargador) a utilizar

A partir de la PSF determinada en el paso 4.5, se selecciona el inversor híbrido adecuado para cubrir las necesidades. Las características de frecuencia y voltaje deben ser las apropiadas en Venezuela. Cumpliendo con la sección 705.14 del CEN, sería 50/60 Hz de frecuencia, 120/240 V de tensión de salida y una onda senoidal pura.

En base a lo descrito anteriormente, se realizó una búsqueda exhaustiva de las marcas de inversores más reconocidas que se comercializan en el país. El inversor seleccionado para el caso de estudio, corresponde a la marca Growatt, sus características se muestran a continuación:

Tabla 4.7 Características del inversor seleccionado.

Marca	Growatt
Modelo	SPF 3000TL LVM-48P
Potencia del inversor (kW)	3
Potencia nominal/máx. Solar charger (kW)	4,5
Números de MPPT	1
Eficiencia del inversor	93%
Frecuencia (Hz)	50/60
Voc	145
Isc	80
Voltaje del banco de batería (V)	48

La capacidad del inversor seleccionado es de 3 kW. Lo recomendable, es que el inversor a utilizar supere la demanda de potencia requerida en al menos 20 %, necesidad que se cumple en el caso de estudio. Según el instrumento aplicado previamente, quedó evidenciado que en Venezuela es común usar inversores con una capacidad superior, a fin de que el usuario tenga la posibilidad de expandir su sistema posteriormente.

Dando cumplimiento a la normativa del CEN, el inversor cuenta con una frecuencia 50/60 Hz, un voltaje de 120 V (monofásico) y tensión de salida con onda senoidal pura. Los MPPT son seguidores del punto de máxima potencia, es decir, reguladores que tienen como objetivo el balance entre la corriente y el voltaje, causando que los paneles solares trabajen a su máxima potencia.

El número de MPPT, indica cuantas entradas provenientes del área de módulos solares son admitidas en el inversor, de manera que el inversor maximice la potencia generada en cada una de estas. Elegir un inversor con más de 1 MPPT permite conseguir una mayor producción de energía eléctrica de origen fotovoltaica y admite la configuración de distintas orientaciones, lo que se traduce en un aumento de eficiencia en el caso de que los módulos se encuentren afectados por sombreados.

La eficiencia o rendimiento, es la relación entre la potencia de entrada y salida del inversor. Generalmente, tienen una eficiencia a plena carga comprendida entre el 90% y 98%. El inversor seleccionado en esta investigación, cuenta con una eficiencia del 93%, lo que significa que perderá 7% de energía al hacer la conversión de DC a AC.

El sobredimensionamiento en corriente continua se realizó en base a un 30%, es decir, se tomó ese porcentaje de pérdida, ya que el medio ambiente es variable y los equipos incorporados también incluyen pérdidas y como tal se quiere evitar que la potencia de salida resulte afectada.

4.6.2. Números de módulos fotovoltaicos

4.6.2.1 Selección del panel fotovoltaico

Para conocer el número de módulos requeridos por el sistema, se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{Número de módulos} = \frac{PSF}{\text{Potencia del módulo}} \times (1 + \text{Factor de pérdidas}) \quad (7)$$

$$\text{Número de módulos} = 8$$

En los factores de corrección se toman en cuenta las pérdidas que se pueden presentar en el sistema, con la finalidad de obtener resultados más exactos. Por dichas pérdidas es que se recomienda hacer un sobredimensionamiento. Normalmente, es del 20% al 30%, considerando así el coeficiente de temperatura del módulo, la nubosidad o sombras, la eficiencia y tipo de señal del inversor, las pérdidas en los conductores y las condiciones atmosféricas.

Para el caso de estudio de esta investigación, se seleccionó un módulo solar de silicio policristalino con celdas de doble vidrio. Tiene una potencia de 345 W y la capacidad de conectar módulos solares en serie con un voltaje máximo de sistema de 1.500 V. Permite tener cierta autonomía energética ya que está agrupado en el segmento de media o alta potencia; muy eficaz en puntos sin conexión a red. Se trata de un módulo solar de 72 células, lo que indica que es de 24V. Para que su conexión sea más sencilla, trae incorporado por cada polo 90 cm de cable.

Las características del panel suministradas por la empresa fabricante se muestran en la parte de anexos (anexo 4).

El ángulo de inclinación óptimo de los módulos es de 11°, dicho valor fue extraído del portal web PVGIS. Los paneles deben estar posicionados al sur porque Venezuela se ubica al norte de la línea ecuatorial. Si se cumple adecuadamente la geometría solar, se alcanzan mayores ganancias de radiación.

4.6.2.2 Arreglo de los módulos

Los módulos se arreglan de maneras diferentes para buscar la compatibilidad con el inversor. Un arreglo adecuado puede ayudar a optimizar el espacio en donde estará el panel, esto es fundamental en el caso de instalaciones con espacios reducidos.

Para hacer el arreglo en serie se suma la tensión (corriente constante) mientras que en paralelo se suma la corriente (tensión constante).

Tabla 4.8 Características tensión y corriente de los módulos.

Marca	ATON
Modelo	ZXP6-HLD144-345/P
Potencia nominal (Wp)	345
Vmp (V)	38,3
Imp (A)	9,01
Voc (V)	47
Isc (A)	9,28
Tipo de celda	Silicio policristalino
Largo (m)	2
Ancho (m)	0,99

Para calcular el número máximo de módulos en serie que soporta el inversor (*String FV*) se usó la ecuación mostrada a continuación:

$$N^{\circ} \text{ máx. Módulos S.} = \frac{Voc \text{ (inversor)}}{Voc \text{ (módulo)}} \quad (8)$$

$$N^{\circ} \text{ máx. Módulos S.} = 3$$

El número máximo de módulos en paralelo que soporta el inversor (*Array FV*) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$N^{\circ} \text{ máx. Módulos P.} = \frac{Icc \text{ (inversor)}}{Icc \text{ (módulo)}} \quad (9)$$

$$N^{\circ} \text{ máx. Módulos P.} = 8$$

Al aplicar las fórmulas anteriores se obtiene como resultado un arreglo máximo de 24 módulos. Sin embargo, para el caso de estudio el sistema solo requiere 8.

Si el espacio donde se ubicarán los módulos es muy pequeño, se pueden configurar en paralelo para reducir el área ocupada, siempre y cuando no exceda el voltaje y corriente que soporta el inversor. En este caso se dispone un arreglo de 2 módulos en serie y 4 módulos en paralelo, ocupando un área aproximada de 9,98 m².

4.6.2.3 Cálculo de voltaje y corriente total del sistema

Se calculó el máximo de voltaje y corriente mediante el número de módulos seleccionado, tanto en serie como en paralelo. Las ecuaciones se muestran a continuación:

$$I_{\text{máx. SFV}} (A) = N^{\circ} \text{Módulos P.} \times I_{\text{cc}} \text{ módulo} \quad (10)$$

$$V_{\text{máx. SFV}} (V) = N^{\circ} \text{Módulos S.} \times V_{\text{oc}} \text{ módulo} \quad (11)$$

Los 8 módulos tienen un voltaje y corriente máximo de 94 V y 37,12 A respectivamente, los cuales no exceden el voltaje de circuito abierto de 145 V y corriente de cortocircuito de 80 A del inversor.

4.6.2.4 Potencia pico del arreglo fotovoltaico

La potencia pico es la máxima potencia que el sistema puede generar bajo las condiciones estándar de ensayo (STC), a radiación solar de 1000 W/m² normales al plano receptor, temperatura de celda de 25°C y masa de aire de 1,5. Se aplica como regla general para la mayoría de los módulos fotovoltaicos que por cada grado superior de temperatura ambiente ideal de 25 °C la potencia pierde un equivalente de 0,5% (FPT).

Entre más alta sea la potencia pico, mayor será la energía producida en momentos en los que la irradiación es dispersa, como es el caso al amanecer y atardecer. Para calcular la potencia pico del arreglo fotovoltaico se aplicó la ecuación a continuación:

Temperatura actual: 24 °C

$$P_{pico} = N_t \times P_{módulo_mp} \times FPT \quad (12)$$

$$FPT = 1 - ((Temp. Actual - 25)/100) \times 0,5 \quad (13)$$

$$P_{pico\ FV\ (kWp)} = 2,77$$

Sobredimensionar no representa ningún problema siempre y cuando no se superen los valores máximos de corriente y voltaje. El sobredimensionamiento obliga al inversor a llegar al tope, y que las pérdidas producidas no disminuyan considerablemente la generación eléctrica. Sin embargo, en este caso, los 2,77 kW ni siquiera se acercan a los 4,5 kW, ya que 2,77 kW representa el 61,5% de potencia nominal máxima (*Solar charger*) que soporta el inversor.

4.7. DETERMINACIÓN Y SELECCIÓN DEL BANCO DE BATERÍAS

4.7.1 Costos de las baterías de los establecimientos comerciales

Los costos que se presentan a continuación son tomados de la información suministrada por los establecimientos comerciales encuestados (tiendas especializadas ubicadas en la ciudad de Mérida y otras ciudades de Venezuela). Cada batería se encuentra identificada por la marca, tipo, voltaje y amperios horas.

Tabla 4.9 Costos de las baterías según establecimientos comerciales.

Baterías	Tipo	Voltaje (V)	Capacidad nominal (Ah)	N° de Ciclos	Vida útil de (años)	Garantía (meses)	Costo por unidad (\$)
Aton	Gel	12	200	1.200	3	3	380
Rolls	Plomo ácido	6	235	1.200	3	6	200
Victron energy	AGM	12	110	600	7	12	373
Huawei	Litio	48	100	3.500	15	6	1.250

Como se muestra en el capítulo 3, la batería más usada para sistemas fotovoltaicos residenciales en Venezuela es la de 12 V.

La tabla 4.10 muestra un resumen de datos obtenidos anteriormente. Se tomó un día de autonomía que es equivalente a 12 horas de respaldo, ya que es lo requerido en el caso de estudio. La profundidad de descarga depende el tipo de batería y el sistema es de 48 V, dicho voltaje está determinado por el inversor.

Tabla 4.10 Voltajes de baterías.

	Gel/Plomo Acido/AGM	Litio
Días de autonomía (Da) (día)	1	1
Profundidad máxima de descarga (DOD)	50%	80%
Voltaje en el que va a trabajar el banco de batería (Vbanco) (V)	48	

4.7.2. Energía real necesaria (Wh/día)

Para calcular la energía real necesaria se empleó la ecuación a continuación:

$$E_{\text{real}} = \frac{\text{Consumo de energía diario (Wh/día)}}{n.\text{inv} \times n.\text{bat}} \quad (14)$$

$$E_{\text{real}} \text{ (Wh/día)} = 11283,95$$

Donde:

- n.inv: eficiencia del inversor (generalmente se considera 90%)
- n.bat: eficiencia de convertir energía química a energía eléctrica (generalmente se considera 90%)

4.7.3. Capacidad nominal del banco de batería (Ah):

La capacidad del banco de baterías se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Cn. \text{ bancoAh} = \frac{E_{\text{real}} (\text{Wh/día}) \times \text{Días de autonomía}}{V_{\text{banco}} \times \text{DOD} \times \text{FCT}} \quad (15)$$

Donde:

- FCT: factor de corrección de temperatura
- Vbanco: voltaje en el que va a trabajar el banco de batería

El factor de corrección de temperatura (FCT) se toma de la tabla 4.11. Los datos son extraídos de la normativa del CEN.

Tabla 4.11 Factor de corrección de temperatura.

Temperatura (°C)		FCT
≤	30	1
31	35	0,91
36	40	0,81

4.7.4. Baterías en serie y en paralelo:

Para determinar el número de baterías en serie, se empleó la siguiente ecuación:

$$N_s = \frac{V_{\text{banco}}}{V_{\text{batería}}} \quad (16)$$

Para conocer el número de baterías conectadas en paralelo, se utilizó la ecuación a continuación:

$$N_p = \frac{Cn. \text{ bancoAh}}{C_{\text{batería}}} \quad (17)$$

4.7.5. Cantidad total de baterías

El número total de baterías conectadas en serie y paralelo es el resultado de la multiplicación entre ellas. Por lo tanto:

$$NbT = Ns \times Np \quad (18)$$

4.7.6 Costo total de inversión (US\$)

El costo total de inversión se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo total US\$} = NbT \times \text{Costo por unidad (US$/unidad)} \quad (19)$$

4.7.7 Costo por N° de ciclos (US\$/N° de ciclos)

El número de ciclos ayuda a conocer la vida útil de la batería, por lo que determinando el costo de cada carga y descarga (ciclo), se tiene una referencia de que tan costoso resulta el funcionamiento de la batería. Para determinar el costo por ciclo se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{Costo por N° de Ciclos (US$/N° de Ciclos)} = \text{Costo por unidad/ N° de Ciclos} \quad (20)$$

4.7.8 Costo por capacidad nominal (US\$/Ah)

La ecuación (21) determina el costo de los amperios suministrados por la batería durante una hora hasta descargarse por completo.

$$\text{Costo por Capacidad nominal (US$/Ah)} = \text{Costo por unidad/ Ah} \quad (21)$$

4.7.9. Resultados del banco de baterías

4.7.9.1. Selección del mejor banco de baterías en base a costo de inversión, costo unitario por número de ciclos y costo unitario por capacidad nominal

En la tabla 4.12. se aplican a las 4 baterías seleccionadas (sus características se muestran en la tabla 4.9) las ecuaciones presentadas anteriormente. Los resultados obtenidos determinan el mejor banco de baterías según el menor costo de inversión.

Tabla 4.12 Resultados de las baterías según características.

Baterías	Tipo	Voltaje (V)	Capacidad nominal (Ah)	N° de Ciclos	*Vida útil (años)	Garantía (meses)	US\$/unidad	US\$/N° de Ciclos	US\$/Ah
Aton	Gel	12	200	1.200	3	3	380	0,32	1,90
Rolls	Plomo ácido	6	235	1.200	3	6	200	0,17	0,85
Victron energy	AGM	12	110	600	7	12	373	0,62	3,39
Huawei	Litio	48	100	3.500	15	6	1.250	0,36	12,50

*Vida útil según fabricantes.

Tabla 4.13 Resultados de las baterías seleccionadas.

Baterías	(Cn.bancoAh) (Ah)	N° de baterías en el banco	Cantidad de baterías en serie Ns	Cantidad de baterías en paralelo Np	Costo Total (\$)
Aton	470	8	4	2	3.040
Rolls	470	16	8	2	3.200
Victron energy	470	16	4	4	5.968
Huawei	294	2	1	2	2.500

Como se observa en la tabla 4.12, la mejor batería según costo de unidad por número de ciclos y costo de unidad por capacidad nominal es la Rolls. Sin embargo, en la tabla 4.13, se muestra que según el costo total de inversión la batería Huawei es la mejor opción. Al no tener una opción única de batería, se aplica un indicador financiero como método decisivo.

4.7.9.2. Selección del mejor banco de baterías en base al método del costo anual uniforme equivalente

El método del costo anual uniforme equivalente (CAUE), es un indicador financiero que convierte todos los egresos o costos en una cantidad anual uniforme equivalente, la cual es igual en cada periodo. El método CAUE se emplea para calcular el menor flujo anual, pues este representa un menor costo periódico. Se seleccionó este método porque se puede aplicar a diferentes vidas útiles.

Existen 3 métodos para calcular el CAUE, por lo que para este caso de estudio se escogió el método de Fondo de Amortización de Salvamento. Su ecuación se muestra a continuación:

$$CAUE = \frac{P}{A/P(i\%, n)} - V_s(A/F(i\%, n)) + CAO \quad (22)$$

$$CAUE = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] - V_s \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] + CAO \quad (23)$$

Donde:

- P: costo inicial o inversión
- V_s : valor de salvamento
- i: tasa de descuento (%)
- n: vida útil (años)
- CAO: costo anual de operación

- A/P: recuperación de capital
- A/F: fondo de amortización

Según el criterio del método CAUE, la mejor opción será la de menor valor numérico, es decir, el más cercano a 0. Aplicando dicho método, se alcanzaron los resultados mostrados en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Resultados de las baterías seleccionadas.

Banco de Baterías	Aton	Rolls	Victron energy	Huawei
CAUE	1219,20	1283,37	1226,74	324,49

La batería que mejor se ajusta a este indicador financiero es la de la marca Huawei. Para el caso de estudio, se asumió un costo anual de mantenimiento del 2% de la inversión del banco de baterías y un 0% de la inversión del banco como valor de salvamento. La tasa de descuento anual tiene un margen comprendido entre el 5% y 12%, sin embargo, se tomó el 7%.

4.8. ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA PVSOLARS

PVSolars es una herramienta desarrollada en Excel®, que permite dimensionar una instalación solar fotovoltaica conectada a la red y a su vez realiza un análisis económico del mejor banco de baterías. Funciona a la perfección para usuarios de tipo residencial y pequeños comercios, por lo que podría presentar discrepancias si se aplica en industrias. Cuenta con una base de datos que puede ser enriquecida y con la opción de visualizar la secuencia de cálculos aplicados. También genera automáticamente un informe de resultados (Apéndice 3). El nombre PVSolars parte de *PhotoVoltaic Solar system* o en español sistema solar fotovoltaico. A continuación, se mostrarán las capturas de la interfaz.

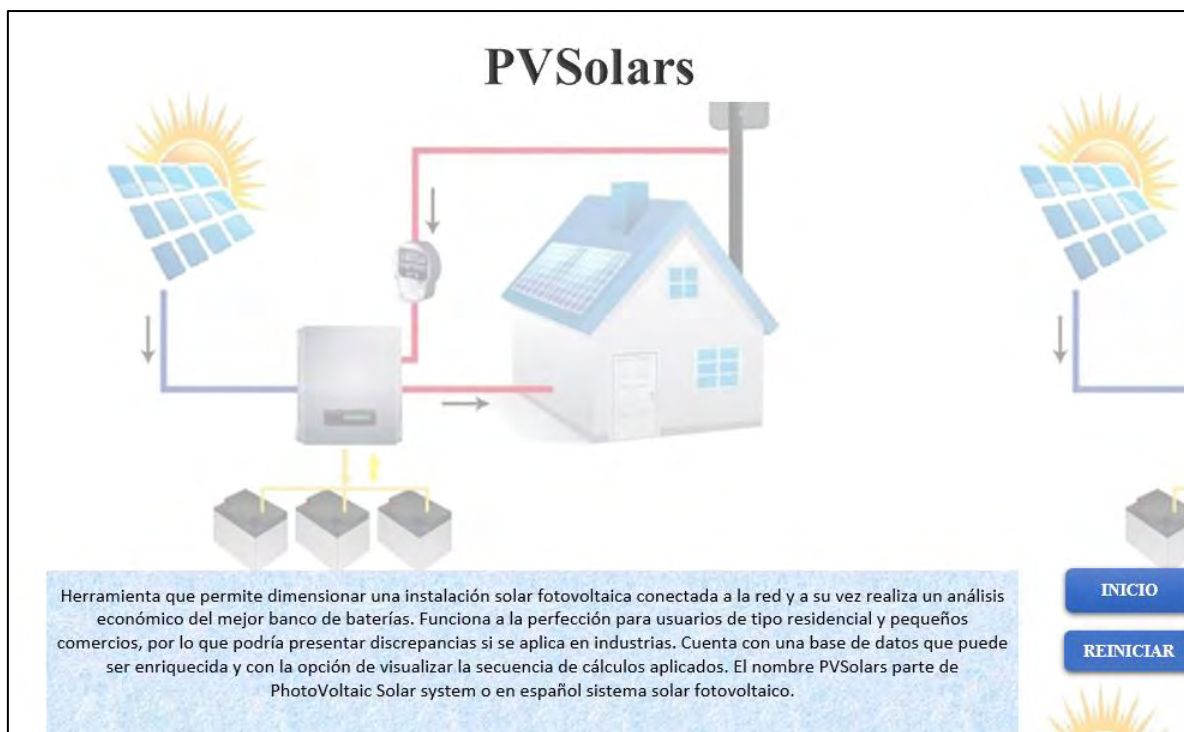


Figura 4. 2 Ventana de introducción.

www.bdigital.ula.ve

Información

Nombre del proyecto	
Nombre del proyecto	Tesis de pregado
Dimensionado por	
Dimensionado por	Br. Luis Méndez
Fecha	
Fecha	8/4/2022
Tipo de usuario	
Tipo de usuario	Residencial
Tipo de instalación	
Tipo de instalación	Hibrido sin vertido a la red
Ubicación	
Ubicación	Mérida
Hemisferio donde se ubica	
Hemisferio donde se ubica	Norte

Leyenda	
	Ingresar datos
	Resultados

En las celdas de color amarillo se introducen datos y en las de color azul se muestran los resultados obtenidos, por lo que no deben ser manipuladas

SIGUIENTE
BASE DE DATOS
FICHAS TÉCNICAS

Figura 4. 3 Ventana de recopilación de información.

Consumo total de energía

Si posee factura de electricidad seleccione el boton SI e ingrese el consumo. En caso de no tener una, seleccione NO e introduzca en la tabla los valores de tomacorrientes y equipos especiales.

Temperatura actual (°C)	24		
Área de vivienda (m ²)	120		
Posee factura de electricidad		<input type="radio"/> SI <input checked="" type="radio"/> NO	kWh/día

*NOTA: Con inversores de potencias pequeñas se puede respaldar solo una porción de este consumo total diario. En caso de respaldar el consumo en su totalidad agregue un inversor mas grande en la base de datos.

Tomacorrientes		Pequeños artefactos	
		N° de circuitos	Horas de consumo
		2	4
	Lavadero	1	4
Equipos especiales		1	1
		1	2
		0	0
		0	0
		1	3

Consumo de energía (kWh/día)	33.34	kWh/día
------------------------------	-------	---------

SIGUIENTE

ANTERIOR

MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 4 Ventana de consumo total de energía.

Cargas que se desean respaldar con las baterías

Artefactos	Potencia artefacto(W)	Cantidad	Horas de uso diario
Iluminación	10	10	5
Televisor	150	1	2
Refrigerador Congelador	480	1	10
Computadora personal	480	1	7
Modem-router	15	1	12
	0		
	0		
	0		

Consumo de energía diaria (kWh/día)	9.14
-------------------------------------	------

SIGUIENTE

ANTERIOR

MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 5 Ventana de cargas que se desean respaldar con las baterías.

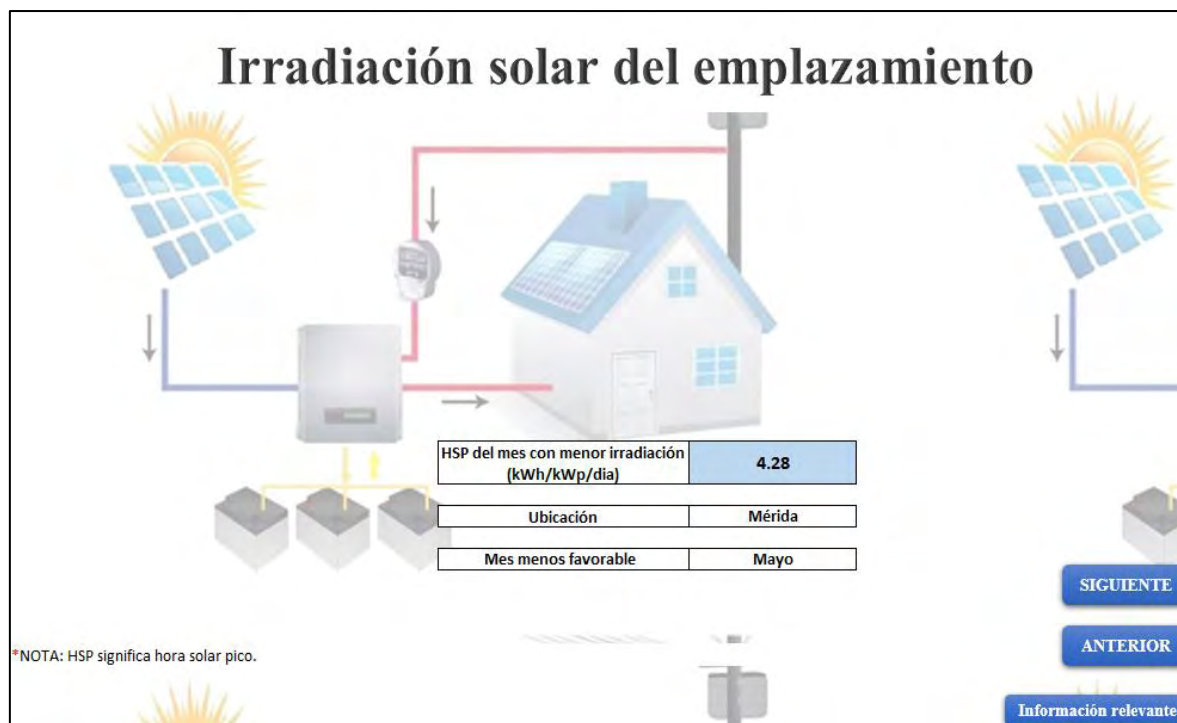


Figura 4. 6 Ventana de irradiación solar del emplazamiento.

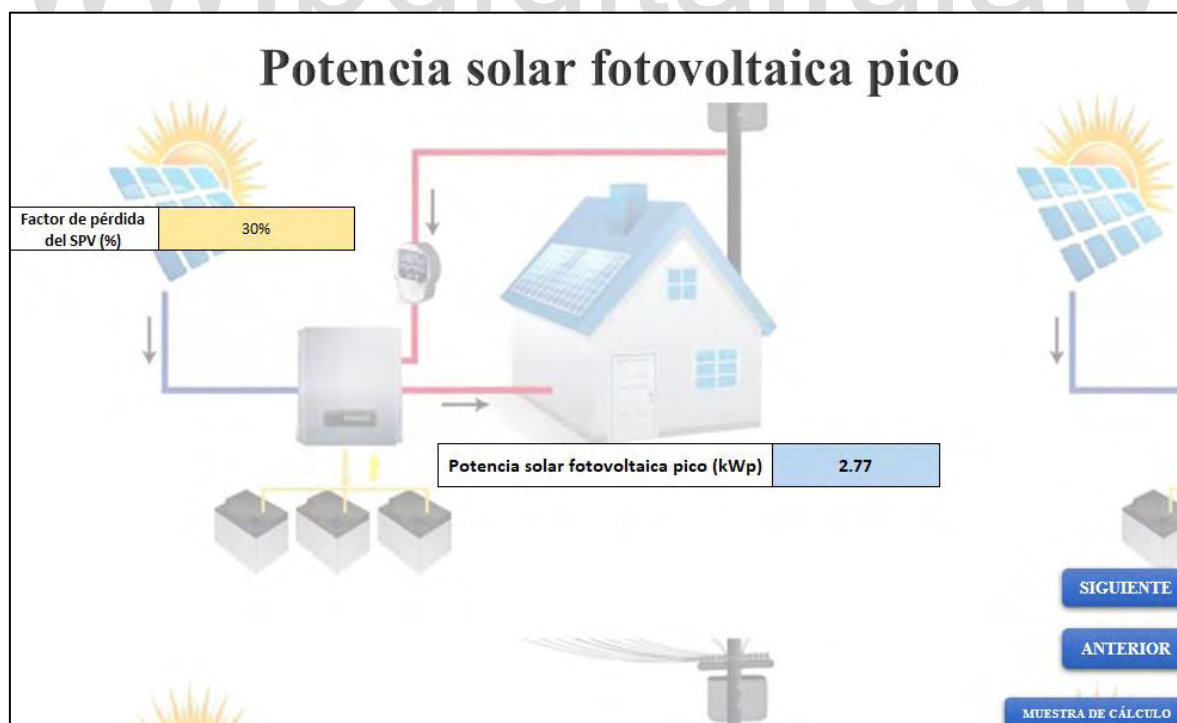




Figura 4. 7 Ventana de potencia solar fotovoltaica pico.

Selección del inversor



Seleccione el inversor a utilizar	Growatt LVM
Características del Inversor	
Marca	Growatt LVM
Modelo	SPF 3000TL LVM-48P
Potencia del inversor (kW)	3
Potencia nominal/máx. Solar charger (kW)	4.5
Números de MPPT	1
Eficiencia inversor	93%
Frecuencia (Hz)	50/60
Voc	145
Isc	80
Voltaje del banco de batería (V)	48



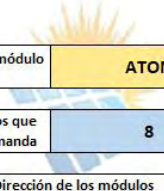
SIGUIENTE

ANTERIOR

MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 8 Ventana de selección del inversor.


Selección de los módulos SPV



Seleccione el módulo SPV	ATON
N° de módulos que cubren la demanda	8
Dirección de los módulos	Sur
Ángulo de inclinación (°)	11
N° máxi. de módulos en serie que acepta el SPV	3.00
N° máxi. de módulos en paralelo que acepta el SPV	8.00
Características del módulos solar	
Marca	ATON
Modelo	ZXP6-HLD144-345/P
Potencia nominal(Wp)	345
Vmp (V)	38.3
Imp (A)	9.01
Voc (V)	47
Isc (A)	9.28
Tipo de celda	Silicio policristalino
Largo (m)	2
Ancho (m)	0.99

N° módulos en serie	2
N° módulos en paralelo	4

Vmáx.SPv (V)	94
Imáx.SPv (A)	37.12
Área de módulos (m ²)	9.98
Potencia pico del arreglo fotovoltaico (kWp)	2.77



SIGUIENTE

ANTERIOR

MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 9 Ventana de selección de los módulos SPV.

Banco de baterías

Días de autonomía (día) **1**

Características de las Baterías

Seleccione las Baterías que desea comparar	Tipo	Voltaje (V)	Capacidad nominal (Ah)	N° de Ciclos	Vida útil según fabricante (años)	Garantía (meses)	Costo por unidad (\$)	Costo por N° de Ciclos (\$/N° de Ciclos)	Costo por Capacidad nominal (\$/Ah)
Aton	Gel	12	200	1200	3	3	380	0.32	1.90
Rolls	Plomo ácido	6	235	1200	3	6	200	0.17	0.85
Victron energy	AGM	12	110	600	7	12	373	0.62	3.39
Huawei	Litio	48	100	3500	15	6	1250	0.36	12.50

PVSolars:
Se recomienda una profundidad de descarga de 50% para Gel, Plomo ácidos y AGM. Para Litio 80%.

RESULTADOS DE LAS BATERIAS SELECCIONADAS

Marca de Baterías	Capacidad nominal del banco de batería (Cn.bancoAh) (Ah)	N° de baterías en el banco	Cantidad de baterías en serie Ns	Cantidad de baterías en paralelo Np	Costo Total (\$)
Aton	470	8	4	2	3040
Rolls	470	16	8	2	3200
Victron energy	470	16	4	4	5968
Huawei	294	2	1	2	2500

Marca de Baterías	Profundidad de descarga (DOD)
Aton	50%
Rolls	50%
Victron energy	50%
Huawei	80%

Mejor batería según costo total (\$) **Huawei**

Mejor batería según costo por N° de ciclos (\$/N° de Ciclos) **Rolls**

Mejor batería según Costo por Capacidad nominal (\$/Ah) **Rolls**

*NOTA: La mejor batería se determina posteriormente mediante el indicador financiero de CAUE.

SIGUIENTE
ANTERIOR
MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 10 Ventana de banco de baterías.

Método de CAUE

Tasa de descuento **7%**

Banco de Baterías	Aton	Rolls	Victron energy	Huawei
Mantenimiento (% de la inversión)	2%	2%	2%	2%

Banco de Baterías	Aton	Rolls	Victron energy	Huawei
Valor de Salvamento (% de la inversión)	0%	0%	0%	0%

RESULTADOS DE LAS BATERIAS SELECCIONADAS

Banco de Baterías	Aton	Rolls	Victron energy	Huawei
CAUE (Costo Anual Uniforme Equivalente)	1219.20	1283.37	1226.74	324.49

Mejor Baterías según el método de CAUE **Huawei**

GENERAR INFORME

*NOTA: Los porcentajes de costo anual de mantenimiento y valor de salvamento vienen dados como un porcentaje del costo de inversión del banco. Se recomienda 2% para el coste de mantenimiento.

INTRODUCCIÓN
ANTERIOR
MUESTRA DE CÁLCULO

Figura 4. 11 Ventana de método CAUE.

4.9. MODELADO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA PLANTEADA EN EL CASO DE ESTUDIO

Con fin ilustrativo se realizó un modelado del tablero y todos los elementos que conforman la instalación solar fotovoltaica del caso de estudio. Los elementos ilustrados son los obtenidos mediante la herramienta diseñada PVSolars para el caso planteado. El modelado se llevó a cabo en el software ArchiCAD® y posteriormente se renderizó en el software Twinmotion®. A continuación, se mostrarán las imágenes fotorrealistas.



Figura 4. 12 Vista del cuarto de baterías.

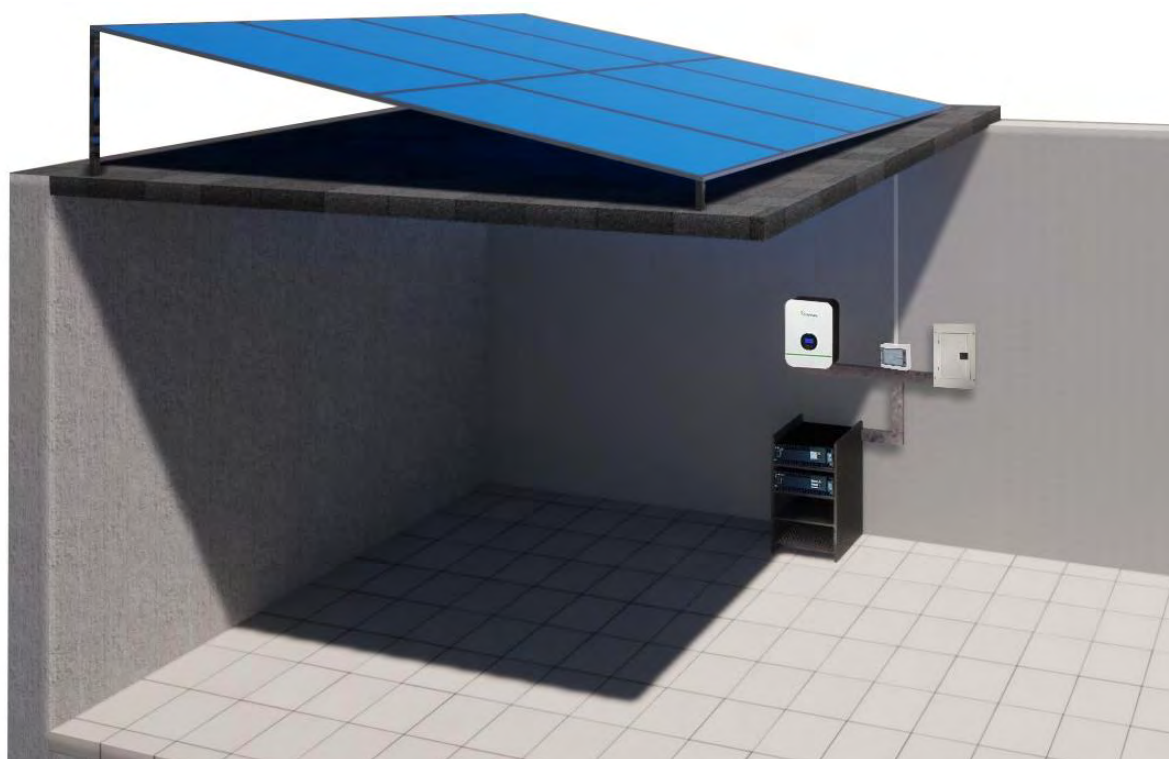


Figura 4. 13 Instalación solar fotovoltaica del caso de estudio.

CONCLUSIONES

Este proyecto de investigación aporta una herramienta innovadora para el área de potencia, pues no hay algún precedente de trabajos realizados en la Universidad de los Andes ni tampoco softwares en el mercado que estén enfocados específicamente en los bancos de baterías y en su relación costo beneficio, a pesar de ser los elementos que más suelen presentar fallas en los sistemas fotovoltaicos.

Luego de aplicar el instrumento a comercios y usuarios de sistemas fotovoltaicos, se evidenció que Venezuela se encuentra atrasada con respecto al resto de países. Actualmente, se están usando baterías de gel y plomo ácido, aun cuando en este momento existen mejores tecnologías como es el caso de las baterías de litio.

Mediante el caso de estudio planteado en esta investigación, se demostró que a pesar de la información que manejan los proveedores de sistemas fotovoltaicos en el país, en la mayoría de los casos a nivel residencial, resulta más económico emplear un banco de baterías de litio, pues al poseer mejores características con respecto a los otros tipos, requieren un menor número de baterías, lo que se traduce en un menor costo. Factor que no está siendo considerado por los comercios, pues siempre se contempla el costo por unidad y no el costo total del banco de baterías.

Al dimensionar un sistema, no se está sopesando el número de ciclos que poseen las baterías, componente determinante en la vida útil de las mismas. El elemento económico es el determinante en Venezuela, sin embargo, en esta investigación se demuestra que se obtienen mayores beneficios si el banco de baterías es seleccionado mediante indicadores financieros.

PVSolars es la herramienta desarrollada para dar respuesta al caso de estudio planteado. La interfaz gráfica fue realizada en Excel, y permite el dimensionamiento de una instalación solar

fotovoltaica conectada a la red mientras que realiza un análisis financiero del mejor banco de baterías.

Está disponible a nivel residencial y de pequeños comercios, y cuenta con una base de datos que puede ser ampliada si se requiere. PVSolars resulta muy versátil y se diseñó con la intención de que pueda ser usada intuitivamente, guiando al usuario en cada paso del diseño de la instalación fotovoltaica y el análisis financiero. Permite visualizar el modelo matemático aplicado y cuenta con la facilidad de realizar cambios y obtener al instante nuevos resultados.

Las baterías son el punto débil en los sistemas fotovoltaicos, es por ello, que PVSolars se enfocó en la selección del mejor banco de baterías, brindándole a los usuarios la opción más rentable. De esta manera, se busca que las instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red o inclusive en sistemas autónomos o de emergencia tengan un mayor aprovechamiento.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

Se recomienda que se aplique el instrumento de campo diseñado a una muestra más grande, ya que, al encuestar una población mayor, los resultados pueden variar e incluso cambiar parcialmente, lo que ofrece una idea más certera de las baterías más utilizada en sistemas residenciales.

Para PVSolars, se sugiere agregar las baterías más destacadas y las que se están empleando actualmente en el mercado de sistema fotovoltaicos a nivel mundial, conociendo de esta manera que tan actualizada está Venezuela con relación a los otros países.

También puede enriquecerse la herramienta, por lo que es recomendable ampliar la base de datos ya existente, al igual que incluir el dimensionamiento de sistemas híbridos con inversores que posean *backup*, ya que es la dirección que están tomando las industrias de sistemas solares fotovoltaicos.

A los proveedores y establecimientos comerciales, se aconseja tener un pleno conocimiento de las baterías que ofrecen. Igualmente se exhorta a que amplíen su portafolio de baterías y exploren nuevas alternativas, de modo que existan más opciones en el mercado y se promueva el uso de instalaciones fotovoltaicas en el país.

Futuros estudios pueden continuar con esta investigación y desarrollarla a profundidad. Al ser un tema novedoso, hay enfoques que no se abarcaron en esta investigación. Por lo que sería ideal modificar la herramienta para que funcione perfectamente a nivel industrial, aprovechando el potencial de PVSolars.

En futuros trabajos se recomienda incluir los factores de emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes de las baterías para evaluar los beneficios que se podrían obtener en una combinación de menor coste financiero, entre otras variables que se quieran considerar.

REFERENCIAS

- [1] E. Collado Fernández, «Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos,» España, 2009.
- [2] G. Pavón, «Cálculo del rendimiento de baterías en sistemas fotovoltaicos usando criterios de eficiencia energética,» Quito, 2018.
- [3] B. Zakeri y S. Syri, «Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis,» ELSEVIER, Finlandia, 2014.
- [4] G. Lorenzo y R. Campos, «Diseño y operación de un sistema fotovoltaico para una vivienda unifamiliar,» Mérida, 2008.
- [5] S. Delgado, «Diseño de un sistema de alimentación eléctrica para las cargas críticas de una vivienda multifamiliar basado en energía solar,» Maracaibo, 2010.
- [6] S. Ortega Pérez, «Factibilidad técnica, económica y social de instalaciones eléctricas solar fotovoltaicas para el consumo doméstico de la localidad de "El Vallecito", Cusco,» Lima, 2019.
- [7] I. Mártil de la Plaza, «OpenMind BBVA,» 12 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/el-reto-de-la-energia-la-transicion-hacia-un-nuevo-modelo-energetico/>. [Último acceso: 5 Julio 2021].

- [8] A. M. Almaraz, «Antecedentes y avances de la Transición Energética del Siglo XXI,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2018.
- [9] Corporación Eléctrica Nacional, «CORPOELEC,» [En línea]. Available: <http://www.corpoelec.gob.ve/generacion>. [Último acceso: 5 Julio 2021].
- [10] L. Herrera, J. Pesca y D. Cortés, «Energías renovables fotovoltaicas: una aproximación descriptiva de su estado,» Bogotá, 2021.
- [11] R. Varea, «Baterías: una revolución en marcha,» 27 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://elpais.com/extra/energia/2022-02-27/baterias-una-revolucion-en-marcha.html>. [Último acceso: 24 mayo 2022].
- [12] E. T. Abreu Rangel, L. A. Méndez Fernández, J. A. Merchan Carrero y A. J. Sánchez Granado, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO COMO PLANTA AUXILIAR PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL FUNDO LA PROSPERIDAD,» Mérida, 2019.
- [13] A. Fideas G., EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, Caracas: EPISTEME, C.A., 2012.
- [14] M. Alonso, «Sistemas fotovoltaicos,» Madrid, s/f.
- [15] D. Contreras, «Diseño de herramienta para el dimensionamiento de celdas fotovoltaicas,» Mérida, 2019.
- [16] O. Planas, «Energía solar,» 18 febrero 2016. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica>. [Último acceso: 22 septiembre 2021].
- [17] X. Estévez y J. Luongo, «Planteamiento del plan piloto bajo en energía fotovoltaica y luminarias de bajo consumo led en la iluminación de áreas exteriores en la ucab,» Caracas, 2013.
- [18] Universidad Nacional de Educación a Distancia e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Biblioteca multimedia de las energías renovablesicono barra

herramientas,» 1998. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/materiales/biblioteca-energias.aspx>. [Último acceso: 10 octubre 2021].

[19] s/n, «Componentes de una instalación solar fotovoltaica,» [En línea]. Available: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>. [Último acceso: 25 octubre 2021].

[20] G. Bermúdez, «Especificación de un sistema de generación de energía eléctrica usando paneles fotovoltaicos y convertidores DC/AC,» Caracas, 2008.

[21] O. Perpiñán, «Energía solar fotovoltaica,» Creative Commons, España, 2020.

[22] T. Perales, «Guía del instalador d energías renovables,» Limusa, México, 2006.

[23] s/n, «Blog TECNOSOL,» s/f. [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/etapas-de-carga-de-una-bateria-solar/>. [Último acceso: 28 octubre 2021].

[24] D. Guasch, «Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos,» Barcelona, 2003.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. INSTRUMENTO DE CAMPO APLICADO A LOS ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

www.bdigital.ula.ve

CUESTIONARIO: ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LAS BATERÍAS EN UNA INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA APLICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

1. ¿Cuáles son las baterías más vendidas para su aplicación en instalaciones solares autónomas o como sistemas de respaldo doméstico (marca)?

2. ¿Qué tipo de baterías son (Gel, Plomo ácido, Litio, otras)?

3. ¿Cuáles son sus voltajes nominales?

4. ¿Qué capacidad poseen (Amperios horas)?

5. ¿Para cuantos ciclos fueron diseñadas las baterías?

6. ¿Cuánto es la duración de las baterías (vida útil en años)?

7. ¿Cuál es la temperatura de funcionamiento de dichas baterías?

8. ¿Qué costo tienen estos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica?

9. ¿Cuál es el tiempo máximo de garantía de las baterías que otorga su establecimiento comercial?

10. ¿Cuáles son las fallas más comunes reportadas por los usuarios?

11. ¿Cuál es la batería más utilizada para sistemas residenciales?

APÉNDICE 2. INSTRUMENTO DE CAMPO APLICADO A USUARIOS DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A NIVEL RESIDENCIAL



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ENCUESTA

ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LAS BATERÍAS EN UNA INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA APLICADA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Esta encuesta es realizada como parte de una investigación de un Proyecto de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. La misma está dirigida a usuarios de sistemas fotovoltaicos del sector residencial o sistemas de respaldo de energía, con el objetivo de conocer las baterías más comercializadas en el país y de esta manera estudiar su rentabilidad versus el rendimiento que poseen.


De antemano, agradecemos su tiempo y atención para responder al instrumento enviado a través de enlace o medio web disponible para la finalidad.

1. ¿Especifique el tipo de instalación de suministro de energía que posee?
 - Sistema de energía solar fotovoltaica autónomo (sistema aislado de la red eléctrica)
 - Energía solar fotovoltaica como sistema de respaldo o emergencia
 - Sistema de respaldo energético mediante inversor híbrido: inversor–cargador.
 - Otro sistema

2. ¿Puede especificar la potencia nominal del sistema de suministro de energía, ya sea como sistema autónomo o de respaldo?
 - Menor a 500 vatios (W)
 - Entre 500 W a 1 kW
 - Entre 1 a 2 kW
 - Mayor a 2 kW
3. ¿Cuántas baterías utiliza su sistema de almacenamiento de energía?
 - 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - Entre 5 y 10 unidades
4. ¿Cuál es la marca de la batería utilizada en su sistema fotovoltaico o el sistema de respaldo energético que disponga?
 - Cofive
 - Denky
 - Rolls
 - Huawei
 - Zte
 - Trojan
 - Otras
5. ¿Qué tipo de batería es?
 - Gel
 - Plomo
 - Litio
 - Otras
6. ¿Cuál es el voltaje nominal de la batería?
 - 6 V
 - 12 V
 - 24 V

- 48 V
7. ¿Qué capacidad posee (Amperios horas)?
- Menor de 100 Ah
 - 100 Ah
 - Mayor de 100 Ah
 - No sabe o no contesta
8. ¿Para cuántos ciclos fue diseñada la batería?
- Menor de 2000
 - 2000
 - Mayor de 2000
 - No sabe o no contesta
9. ¿Cuánto es la duración de la batería (vida útil en años)?
- 3 años
 - 5 años
 - 7 años
 - 10 años o más
 - No sabe o no contesta
10. ¿Qué costo tuvo dicha batería o grupo de baterías?
- Entre 100 US\$ - 500 US\$
 - Entre 500 US\$ - 1.000 US\$
 - Más de 1.000 US\$
 - No sabe
11. ¿Cuál es el tiempo de garantía de la batería que le otorgó su establecimiento comercial?
- 3 meses
 - 6 meses
 - 1 año
 - Ninguno
12. ¿Cuál es la falla más frecuente presentada en su batería?
-

APÉNDICE 3. INFORME GENERADO POR LA HERRAMIENTA PVSOLARS




DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Para la realización de este estudio se han empleado cálculos teóricos, por lo que el funcionamiento final de la instalación puede diferir de los resultados obtenidos.

Tesis de pregrado
Mérida
Br. Luis Méndez

Universidad de los Andes Página 1 de 4



DATOS DEL SISTEMA

Nombre del propietario o proyecto:	Tesis de pregrado
Tipo de instalación:	Híbrido sin vertido a la red
Fecha del dimensionamiento:	8/4/2022
Ubicación:	Mérida
Latitud (°):	8.61
Longitud (°):	-71.14
Temp. Min (°C):	12
Temp. Actual (°C):	24
Temp. Máx (°C):	27
Área de la Vivienda (m ²):	120
Demanda máxima Dmáx (kW):	13.31
Consumo diario Total (kWh/día):	33.34
Carga de respaldo (kWh/día):	9.14
Horas solar pico HSP (kWh/m ² /día):	4.28
Sobredimensionamiento:	30%

Universidad de los Andes Página 2 de 4

RESUMEN DEL SISTEMA

Potencia Solar fotovoltaica (kWp):	2.77
------------------------------------	------

MÓDULOS SOLARES

Potencia nominal (Wp):	345
Número total de módulos:	8
Número de módulos en serie:	2
Número de módulos en paralelo:	4
Voc:	47
Isc:	9.28
Ángulo de inclinación (°):	11
Dirección de los módulos:	Sur

INVERSOR HÍBRIDO (INVERSOR-CARGADOR)

Marca:	Growatt LVM
Modelo:	SPF 3000TL LVM-48P
Potencia del inversor (kW):	3
Voltaje del banco de baterías (V):	48
Eficiencia:	93%
Potencia nominal/máx. Solar charger (kW):	4.5
Voc:	145
Isc:	90

Universidad de los Andes Página 3 de 4

El mejor banco de Baterías

Marca de Batería seleccionada por el método CAUE:	Huawei
Tipo:	Litio
Voltaje (V):	48
Capacidad nominal (Ah):	100
Nº de Ciclos:	3500
Vida útil según fabricante (años):	15
Garantía (meses):	6
Capacidad nominal del banco (Ah):	294
Número de baterías en serie (Ns):	1
Número de baterías en paralelo (Np):	2
Nº de baterías en el banco:	2
Costo de la batería por unidad (\$):	1250
Costo por Nº de Ciclos (\$/Nº de Ciclos):	0.36
Costo por Capacidad nominal (\$/Ah):	12.50
Costo Total (\$):	2500

Universidad de los Andes Página 4 de 4

ANEXOS

ANEXO 1. TABLA DE FACTOR DE DEMANDA PARA SECADORAS Y CALENTADORES

Tabla 220-18 Secadoras y Calentadores

Número de Secadoras	Factor de Demanda (%)
1-4	100
5	85
6	75
7	65
8	60
9	55
10	50
11	47
12-22	$\% = 47 - (\text{No. de secadoras} - 11)$
23	35
24-42	$\% = 35 - [0.5 \times (\text{No. de secadoras} - 23)]$
De 43 en adelante	25

ANEXO 2. TABLA DE FACTOR DE DEMANDA PARA ALUMBRADO

Tabla 220-11 Alumbrado

Tabla 220.11 Factores de Demanda para Cargas de Iluminación

Tipo de Local	Parte de la Carga de Iluminación a la que se Aplica el Factor de Demanda (en VA)	Factor de Demanda %
Unidades de vivienda	Primeros 3000 o menos	100
	De 3001 a 120000	35
	A partir de 120000	25

ANEXO 3. FICHA TÉCNICA INVERSOR GROWATT MODELO SPF 3000TL LVM-48P

Datasheet	SPF 3000TL LVM-24P	SPF 3000TL LVM-48P
Battery voltage	24VDC	48VDC
INVERTER OUTPUT		
Rated Power	3000W/3000W	3000W/3000W
Surge Capacity	Yes	Yes
AC Voltage Regulation (Battery Mode)	120VAC \pm 5% @ 50/60Hz	120VAC \pm 5% @ 50/60Hz
Surge Power	6000W	6000W
Efficiency (Peak)	93%	93%
Inverter	Pure sine wave	Pure sine wave
Standby Time	10 ms (For Personal Computers), 20 ms (For Home Appliances)	10 ms (For Personal Computers), 20 ms (For Home Appliances)
SOLAR CHARGER		
Maximum PV Array Power	2000W	4000W
MPP Range @ Operating Voltage	30VDC - 115VDC	47VDC - 115VDC
Maximum PV Array Open-Circuit Voltage	145VDC	145VDC
Maximum Solar Charge Current	80A	80A
Maximum Efficiency	98%	98%
Standby Power Consumption	2W	2W
AC CHARGER		
Charge Current	45A	45A
AC Input Voltage	120VAC	120VAC
Workable Voltage Range	95-140 VAC (For Personal Computers); 60-140 VAC (For Home Appliances)	95-140 VAC (For Personal Computers); 60-140 VAC (For Home Appliances)
Frequency Range	50/60Hz (Auto sensing)	50/60Hz (Auto sensing)
PHYSICAL		
Dimension (DWH) in mm	133/352/455	133/352/455
Net Weight (kg)	11.5	11.5
OPERATING ENVIRONMENT		
Humidity	0% to 95% Relative Humidity (Non-condensing)	0% to 95% Relative Humidity (Non-condensing)
Operating Temperature	0°C - 50°C	0°C - 50°C
Storage Temperature	-15°C - 60°C	-15°C - 60°C

ANEXO 4. CARACTERÍSTICAS DEL PANEL ATON DE ZXP6-HLD144-345/P

		
Model Type	ZXP6-HLD144-345/P	Hazardous electricity can shock, burn, or cause death. Do not touch terminals. La tension électrique dangereuse peut causer un choc électrique, des brûlures ou la mort. Ne pas toucher les bornes. 
Maximum Power(Pmax)	345W (0-±3%)	
Maximum Power Voltage(Vmp)	38.3V	
Maximum Power Current(Imp)	9.01A	
Open Circuit Voltage(Voc)	47.0V	
Short Circuit Current (Isc)	9.28A	
Maximum System Voltage	1500V	
Maximum Series Fuse	15A	
Cell Technology	Si Poly	
Module Application	Class A	
Fire Resistance Rating	Class C	
Standard Test Condition(E=1000W/m², Tc=25°C, AM1.5) Nominal Operating Cell Temperature(NOCT) 45°C±2°C For field connections, use minimum No.12 AWG copper wires insulated for minimum 90°C		
Weight/Dimension	25.5kg/2000mm*992mm*30mm	