



Diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido para el Laboratorio de Energías Renovables.

Molina Anchatuña, Anthony David

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Jiménez León, Mario Polibio

20 de agosto de 2021



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA CON ALMACENAMIENTO HÍBRIDO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES**” fue realizado por el estudiante **Molina Anchatuña, Anthony David** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 23 de agosto de 2021



Firmado electrónicamente por:
**MARIO
POLIBIO**

.....
Ing. Jiménez León, Mario Polibio

C. C: 0501519326

Reporte de Verificación Urkund

Document Information

Analyzed document	Tesis Molina Anthony_HESS.pdf (D111475218)
Submitted	8/19/2021 8:24:00 PM
Submitted by	
Submitter email	admolina1@espe.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	mpjimenez.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	TESIS_OLA_SALAS.docx Document TESIS_OLA_SALAS.docx (D62102018)	 14
W	URL: http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/12185.pdf Fetched: 1/19/2021 7:54:30 AM	 2
W	URL: http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10651/2/04%20MEL%20096%20TRABAJO%20GRADO.pdf Fetched: 12/15/2020 10:34:13 AM	 1
W	URL: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/download/12489/13093/ Fetched: 7/6/2020 5:46:22 PM	 1
W	URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor Fetched: 8/19/2021 8:25:00 PM	 1
W	URL: http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9469/3/AC-MCT-ESPE-048203.pdf Fetched: 8/19/2021 8:25:00 PM	 1



Firmado electrónicamente por:

MARIO
POLIBIO



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Molina Anchatuña, Anthony David**, con cédula de ciudadanía n° 0503870255, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA CON ALMACENAMIENTO HÍBRIDO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga 20 de agosto de 2021

Molina Anchatuña, Anthony David

C.C.: 0503870255



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Autorización de la Publicación

Yo **Molina Anchatuña, Anthony David** con cédula de ciudadanía n° 0503870255, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA CON ALMACENAMIENTO HÍBRIDO PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga 20 de agosto de 2021

Molina Anchatuña, Anthony David

C.C.: 0503870255

Dedicatoria

A Orlando mi padre:

Por la vida, las alas y raíces.

A Eugenia mi madre:

Por la vida, amor y cariño.

A Gabriela mi hermana:

Por su bondad y valentía.

A mis familiares

Por lo que tan generosamente me han enseñado.

A mis amigos

Por la fraternidad.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por la oportunidad de la vida y por haberme ayudado a culminar una etapa más en mi vida. A mis padres y hermana que me han alentado y apoyado, para que yo pueda cumplir con esta meta. A mis familiares que siempre he encontrado en ellos la unidad y solidaridad.

Afortunadamente este camino no se ha recorrido en solitario he tenido la suerte de recorrerlo con amigos.

A todos los profesores de la Carrera de Ingeniería Electromecánica quienes fueron el pilar de mi formación académica.

A mi tutor Ing. Mario Jiménez por haberme apoyado y guiado durante la elaboración de este proyecto, con su paciencia y conocimiento, que contribuyeron para la culminación de este trabajo.

A todos ustedes, desde mi corazón, mi gratitud y mi inmenso cariño.

Tabla de Contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de Verificación Urkund	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de la Publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de Contenidos	8
Índice de Figuras	15
Índice de Tablas	18
Resumen	20
Abstract.....	21
Problemática.....	22
Planteamiento del problema	22
Antecedentes	23
Justificación e Importancia	25
Objetivos	25
<i>Objetivo General</i>	25
<i>Objetivos Específicos</i>	26
Fundamentación Teórica	27
Energía solar fotovoltaica	27
Tipos de sistemas de generación fotovoltaica	27
<i>Sistema fotovoltaico aislado</i>	27
<i>Sistema fotovoltaico de conexión a red</i>	29
Sistemas con almacenamiento híbrido	30

<i>Topología pasiva</i>	30
<i>Topología semi activa</i>	31
<i>Topología activa</i>	32
Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo en fuentes de energías renovables.	34
Elementos de un sistema fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido pasivo	36
<i>Paneles fotovoltaicos</i>	36
Policristalino	36
Monocristalino	36
Comparación entre paneles fotovoltaicos	37
<i>Reguladores de carga</i>	38
Regulador modulador de ancho de pulsos PWM	38
Técnicas de seguimientos de punto de máxima potencia	
MPPT	39
Comparación entre los reguladores de carga	39
<i>Almacenamiento</i>	40
Baterías	42
<i>Modelo equivalente</i>	43
<i>Carga – Descarga</i>	44
Supercapacitor	44
<i>Modelo Equivalente</i>	44
<i>Carga y Descarga a resistencia constante</i>	45
<i>Carga y Descarga a corriente constante</i>	46
<i>Carga y Descarga a potencia constante</i>	46
<i>Inversores fotovoltaicos</i>	47

Sistema de medición.....	48
Dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido pasivo	49
Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica aislada.....	49
Estimación del consumo (<i>LMD. CA, LMD. DC</i>)	50
Cálculo de la energía diaria media consumida (<i>LMD</i>)	50
Consumo total anual (<i>LT</i>)	51
Determinación de la tensión nominal de la instalación (<i>VN</i>)	51
Dimensionamiento del generador fotovoltaico.....	52
Cálculo del almacenamiento por baterías.....	53
Dimensionamiento del regulador de carga (<i>IGFV.SC</i>)	55
Dimensionamiento del inversor (<i>SINV</i>)	55
Dimensionamiento del almacenamiento por supercapacitores.....	56
Número de supercapacitores conectados en serie (<i>Nc.S</i>)	57
Resistencia del banco de supercapacitores (<i>Rc</i>).....	57
Capacidad total de los supercapacitores (<i>C</i>).....	58
Modelo matemático de un HESS en una topología pasiva	58
Corriente en estado estable.....	62
Requerimientos del sistema.....	63
Hipótesis	65
Variables de la investigación	65
Variable independiente	65
Variable dependiente	65
Metodología	66
Antecedentes de la investigación.....	66

Modalidad de la investigación	68
Tipo de investigación	68
<i>Investigación bibliográfica</i>	68
<i>Campo de investigación</i>	69
<i>Despliegue de la función de la calidad (QFD)</i>	69
Diseño de la investigación	69
Nivel de la investigación	70
<i>Exploratoria</i>	70
<i>Descriptiva</i>	70
<i>Investigación explícita</i>	70
Población y muestra.....	71
Técnicas de recolección de datos	72
<i>Observación en laboratorio</i>	72
<i>Instrumentos</i>	72
<i>Técnica de análisis de datos</i>	72
<i>Técnicas de comprobación de hipótesis</i>	72
Análisis de los resultados de la investigación.....	74
Análisis de resultados.....	75
<i>Simulación del sistema fotovoltaico aislado</i>	75
<i>Implementando un BAS</i>	76
<i>Implementando un HESS Pasivo</i>	77
<i>Análisis de la simulación</i>	79
Casa de la calidad.....	80
<i>La voz del cliente</i>	80
<i>La voz del ingeniero</i>	80
<i>Desarrollo de la matriz QFD</i>	80

La voz del cliente en el desarrollo del módulo	80
La voz del ingeniero en el desarrollo del módulo.....	81
<i>Conclusión de la matriz QFD</i>	81
<i>Comprobación de la hipótesis</i>	82
Hipótesis nula	82
Hipótesis alternativa.....	82
<i>Estadístico de la prueba</i>	82
Propuesta.....	84
Tema de la propuesta	84
Datos informativos	84
Beneficiarios	84
Objetivos	84
<i>Objetivo General</i>	84
<i>Objetivos Específicos</i>	85
Justificación del problema.....	85
Fundamentación de la propuesta	85
Diseño de la propuesta.....	86
<i>Resumen</i>	86
Demanda de consumo de energía	86
Estandarización y selección de equipos.....	86
Comunicación con la aplicación.....	87
Resultado	87
Arquitectura del proyecto	87
Requerimientos para la construcción del módulo	88
Dimensionamiento y selección de los dispositivos	89
Procedimiento de cálculo.....	89

<i>Estimación del consumo (LMD.AC)</i>	89
<i>Cálculo de la energía diaria media consumida (LMD)</i>	90
<i>Determinación de la tensión nominal de la instalación (VN)</i>	90
<i>Estandarización de paneles solares</i>	90
<i>Dimensionamiento del generador fotovoltaico (EDMF)</i>	91
<i>Cálculo del almacenamiento por baterías (CD)</i>	93
<i>Estandarización de la batería solar</i>	94
<i>Estandarización del supercapacitor</i>	96
<i>Dimensionamiento del almacenamiento por supercapacitores</i>	97
<i>Corriente en estado estable</i>	98
<i>Requerimientos de energía del módulo</i>	101
<i>Requerimientos al interconectar supercapacitores</i>	102
<i>Dimensionamiento del regulador de carga (IGFV.SC)</i>	102
<i>Estandarización del regulador de carga</i>	103
<i>Dimensionamiento del inversor (SINV)</i>	104
<i>Estandarización del inversor</i>	105
Selección de los instrumentos de medida	105
Selección del software	107
Interfaz	107
<i>Pestaña local</i>	107
<i>Información básica</i>	108
Regulador de carga MPPT 100/20 Victron.....	108
Inversor Phoenix Victron 12/500 120 V.....	109
Smart Shunt Victron	110
Metodología para la ejecución del proyecto	110

<i>Diseño del módulo del proyecto</i>	110
<i>Conexión del sistema fotovoltaico</i>	112
<i>Configuración del sistema fotovoltaico</i>	113
Configuración inicial	113
<i>Regulador de carga MPPT 100/20 Victron</i>	114
<i>Inversor Phoenix Victron 12/500 120 V</i>	115
<i>Smart Shunt Victron</i>	115
Metodología de trabajo	116
Implementación del sistema de generación fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido	116
Pruebas de funcionamiento	117
<i>Prueba del BAS en un sistema fotovoltaico aislado</i>	117
Carga del BAS.....	117
Descarga del BAS.....	118
<i>Prueba del HESS pasivo en un sistema fotovoltaico aislado</i>	120
Carga del HESS pasivo	121
Descarga del HESS pasivo.....	125
<i>Comparación de valores medidos y calculados</i>	132
Conclusiones y Recomendaciones.....	133
Conclusiones	133
Recomendaciones	135
Bibliografía.....	136
Anexos	140

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema de un sistema solar aislado</i>	29
Figura 2 <i>Esquema de un sistema solar conectado a red</i>	30
Figura 3 <i>Topología pasiva HESS</i>	31
Figura 4 <i>Topología semi activa HESS</i>	32
Figura 5 <i>Topología activa HESS en paralelo</i>	33
Figura 6 <i>Topología activa HESS en cascada</i>	34
Figura 7 <i>Sistemas de energías renovables aisladas con un sistema de almacenamiento híbrido de energía pasivo</i>	35
Figura 8 <i>Diagrama de Ragone</i>	41
Figura 9 <i>Circuito simplificado de una batería</i>	43
Figura 10 <i>Circuito simplificado de un supercapacitor</i>	45
Figura 11 <i>Carga a resistencia constante, descarga a resistencia constante</i>	46
Figura 12 <i>Carga y descarga del supercapacitor a corriente constante</i>	46
Figura 13 <i>Carga y descarga del supercapacitor a potencia constante</i>	47
Figura 14 <i>Ejemplo de los actuales inversores de carga con Bluetooth Smart - Bluetooth Smart Ready</i>	49
Figura 15 <i>Circuito equivalente simplificado</i>	59
Figura 16 <i>Circuito en dominio de la frecuencia</i>	59
Figura 17 <i>Circuito equivalente Thévenin</i>	60
Figura 18 <i>Esquema para el diseño de un HESS en una topología pasiva para sistemas fotovoltaicos aislados</i>	64
Figura 19 <i>Esquema del circuito a simular en MatLab/Simulink</i>	76
Figura 20 <i>Simulación del sistema fotovoltaico autónomo con un BAS</i>	77
Figura 21 <i>Simulación del sistema fotovoltaico autónomo con un HESS pasivo</i>	78
Figura 22 <i>Esquema del proyecto</i>	87

Figura 23 Lista de dispositivos a monitorear en el módulo.....	108
Figura 24 Información de VictronConnect para el regulador de carga MPPT 100/20 Victron.....	109
Figura 25 Información de VictronConnect para el Phoenix 12/500 120 V de Victron...	109
Figura 26 Información de VictronConnect para el SmartShunt de Victron.....	110
Figura 27 Montaje de los equipos en sus respectivos paneles frontales.....	111
Figura 28 Estructura del panel solar del proyecto.....	112
Figura 29 Diagrama de conexiones con los dispositivos del proyecto.....	112
Figura 30 Conexión entre los dispositivos del módulo fotovoltaico y el dispositivo receptor.....	113
Figura 31 Ajuste del controlador de carga MPPT para los módulos de almacenamiento.....	114
Figura 32 Configuración de la salida de carga del controlador MPPT.....	115
Figura 33 Configuración del inversor para la puesta en marcha dentro del módulo	115
Figura 34 Diagrama unifilar del módulo didáctico	116
Figura 35 Prueba de carga del BAS conectado a un panel solar monocristalino de 230 W.....	118
Figura 36 Prueba de descarga del BAS con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC.....	119
Figura 37 Prueba de descarga del BAS con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC	120
Figura 38 Prueba de carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W.....	121
Figura 39 Prueba de carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W.....	122

Figura 40 Prueba de descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC	126
Figura 41 Voltaje en la barra DC durante la descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC	127
Figura 42 Prueba de descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/CA	129
Figura 43 Voltaje en la barra DC durante la descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC	130

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Características de células fotovoltaicas monocristalinas y policristalinas</i>	37
Tabla 2 <i>Características de controladores de carga PWM y MPPT</i>	40
Tabla 3 <i>Comparación de las tecnologías de almacenamiento</i>	41
Tabla 4 <i>Características físicas de los sistemas acumulación de baterías y supercapacitores</i>	42
Tabla 5 <i>Variables eléctricas e indirectas de los dispositivos inteligentes de un sistema fotovoltaico</i>	48
Tabla 6 <i>Preguntas</i>	71
Tabla 7 <i>Variables de la investigación</i>	83
Tabla 8 <i>Cuestionario de las variables de la investigación</i>	83
Tabla 9 <i>Especificaciones de las demandas de energía para la práctica en el laboratorio</i>	88
Tabla 10 <i>Selección del panel solar para el módulo didáctico</i>	91
Tabla 11 <i>Selección de la batería</i>	94
Tabla 12 <i>Selección del supercapacitor</i>	96
Tabla 13 <i>Selección del regulador de carga para el proyecto</i>	103
Tabla 14 <i>Selección del inversor para el proyecto</i>	105
Tabla 15 <i>Datos del monitor para los sistemas de acumulación</i>	106
Tabla 16 <i>Variables que medirán los dispositivos seleccionados del proyecto</i>	106
Tabla 17 <i>Registro de datos durante la carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W</i>	123
Tabla 18 <i>Registro de datos durante la carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W</i>	124
Tabla 19 <i>Registro de datos durante la descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V</i>	128

Tabla 20 Registro de datos durante la descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V.....	131
Tabla 21 Comparación de lo medido con lo calculado en la prueba de descarga del HESS pasivo en la descarga con la demanda motor de 150 W.....	132

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva basada en baterías y supercapacitores para el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El proyecto incluye instrumentos de medida que ayudan a cuantificar el aporte de energía durante la carga y descarga en los almacenamientos de energía.

El módulo implementado funciona con potencias que permitan manejarse dentro del laboratorio de Energías Renovables, el módulo cuenta con un panel fotovoltaico que produce la energía eléctrica para ser acumulada en los almacenamientos ya sea solo en la batería o en el almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva, un regulador de carga para prevenir sobre cargas en los sistemas de acumulación. Se realizan dos pruebas de descarga para cargas resistivas e inductivas mediante un inversor de carga, la primera prueba será con un almacenamiento solo por baterías, la segunda prueba es empleado el sistema de almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva observando que los supercondensadores complementan a las baterías mejorando la gestión de energía en los sistemas fotovoltaicas aislados.

Palabras claves:

- **HÍBRIDO**
- **ALMACENAMIENTO**
- **PASIVO**
- **FOTOVOLTAICO**

Abstract

The present project aims to design and implement a didactic module of isolated photovoltaic generation with hybrid energy storage in a passive topology based on batteries and supercapacitors for the Renewable Energy Laboratory of the University of the Armed Forces ESPE. The project includes measurement instruments that help quantify the energy input during loading and unloading in energy stores.

The implemented module works with powers that allow it to be handled within the Renewable Energy laboratory, the module has a photovoltaic panel that produces electrical energy to be accumulated in storage either only in the battery or in the hybrid energy storage in a topology passive, a charge regulator to prevent overloads in accumulation systems. Two discharge tests are carried out for resistive and inductive loads by means of a load inverter, the first test will be with a storage only by batteries, the second test is used the hybrid energy storage system in a passive topology observing that the supercapacitors complement the batteries improving energy management in isolated photovoltaic systems.

Keywords:

- **HYBRID**
- **STORAGE**
- **PASSIVE**
- **PHOTOVOLTAIC**

Capítulo I

1. Problemática

1.1. Planteamiento del problema

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga cuenta con laboratorios en cada uno de sus departamentos, como el laboratorio de Energías Renovables el mismo que se encuentra en proceso de implementación. La importancia de estudiar los sistemas híbridos de acumulación de energía basados en supercondensadores y baterías dentro de los sistemas de generación fotovoltaica. Los sistemas de almacenamiento de energía por baterías son dispositivos que no pueden capturar picos de alta potencia en la carga ni proporcionarlos durante la descarga lo que repercute negativamente en su vida útil lo cual genera un considerable aumento en los costos del sistema, además que no puede gestionar altas densidades de potencia por lo tanto, los supercondensadores ayudan a homogeneizar y rentabilizar en el caso de cargas que requieren respuestas rápidas de potencia o de demanda variable (GIL, 2016).

Los capacitores han sido usados como un componente fundamental para la compensación en sistemas eléctricos, sin embargo, recientemente se ha desarrollado una nueva clase de capacitores como elementos almacenadores de energía como los supercapacitores, con muchas más ventajas sobre sus predecesores. Su ventaja al ser empleados es compensar la variabilidad de la potencia de salida de plantas eólicas y solares inyectando potencia eléctrica durante cortos periodos de tiempo (alta densidad de potencia, pero baja densidad de energía) por lo que lo hace limitado en aplicaciones de soportar largos periodos de demanda. Por lo general se emplean junto con baterías para ampliar el espectro de las aplicaciones que pueden ser manejadas con estas dos tecnologías.

Al contar con un módulo que cuantifique los sistemas de almacenamiento híbrido durante su carga-descarga, permitirá a los estudiantes tomar un nuevo enfoque práctico de los sistemas de acumulación híbridos. Dentro de las prácticas que se realizan en el área de energías renovables se debe contar con un módulo didáctico que permita comprender los sistemas de acumulación híbridos, para fortalecer el proceso enseñanza-aprendizaje y ampliar la formación integral para los futuros profesionales de Ingeniería Electromecánica.

1.2. Antecedentes

El almacenamiento de energía es una parte esencial de un sistema fotovoltaico teniendo ciclos de vida cortos, estos acumuladores aumentan el costo operativo de los sistemas de energía solar. Los sistemas de almacenamiento de energía híbrido han sido propuestos para extender el ciclo de vida de las baterías mitigando el estrés de carga-descarga debido a la energía fluctuante (Fahmi et al., 2015).

Lo primordial de los sistemas de acumulación de energía eléctrica dependen de los requerimientos para conservar la calidad de energía suministrada a las cargas. En la actualidad están diferentes tecnologías que permiten la acumulación de energía eléctrica, como volantes de inercia, baterías, condensadores y supercapacitores. Los sistemas de acumulación de aire comprimido, térmico y el bombeo de agua; habitualmente requieren un lugar considerable para la instalación mientras que los supercapacitores son dispositivos de almacenamiento compactos, pero de corta duración utilizados especialmente en aplicaciones de calidad de potencia (Guacaneme et al., 2014).

Dentro de las estrategias de gestión para el almacenamiento de energía; los sistemas híbridos de energía muestran claramente que la combinación híbrida entre supercondensadores y baterías tiene grandes beneficios, logran superar el problema cuando la batería suministra corriente pico frente a una alta demanda de carga

reduciendo el estrés actual en las baterías, mejorando su vida útil, costos de operación y mantenimiento del sistema (GIL, 2016). Los supercondensadores actúan como un buffer aliviando la batería de las demandas de alta potencia. (Seim, 2012) señala que los supercondensadores demostraron que tiene suficiente energía para los requisitos de potencia pico en un corto período de tiempo y la batería suministra a la carga potencia continua a una tasa normal durante un período más largo de tiempo.

Por lo expuesto anteriormente, la consideración de utilizar un sistema de almacenamiento híbrido para la acumulación de energía proveniente del sol, en los sistemas fotovoltaicos aislados han aumentado en los últimos años esto se debe a que esta tecnología ha madurado; los sistemas de acumulación puede ser la parte de mayor valor económico del sistema y su valor se eleva al tratar de adquirir un almacenamiento de bajo impacto ambiental.

Los acumuladores más implementados actualmente son las baterías, existen diversos tipos como las de plomo ácido, níquel-cadmio y litio, dichas baterías presentan una alta densidad de energía, diseñadas para aguantar un número limitado de ciclos siendo su reutilización no sostenible, con el avance de la tecnología los supercondensadores son capaces de soportar altas corrientes, disponen de una alta densidad de potencia y un ciclo de vida prolongado, pero no son capaces de entregar una alta densidad de energía razón por la cual este almacenamiento no se ha utilizado.

Según (Mora et al., 2017) las baterías y los supercondensadores pueden complementarse y apoyarse en diversas aplicaciones por sus características contrastantes de densidad de energía y densidad de potencia. Al evaluar el efecto ambiental se debe considerar dos aspectos esenciales, el funcionamiento y la durabilidad a largo plazo en los sistemas solares fotovoltaicos.

1.3. Justificación e Importancia

Los sistemas de almacenamiento en las instalaciones fotovoltaicas autónomas tienen la función de gestionar la energía ya que deben satisfacer la demanda de las cargas y estabilizar la potencia de salida. Las baterías de un sistema solar autónomo convencional deben reemplazarse normalmente cada 500 ciclos de vida, estos ciclos pueden durar 3 o 5 años a una descarga profunda (Glavin et al., 2008).

La combinación híbrida entre supercondensadores y baterías tiene grandes beneficios. Los supercondensadores tienen suficiente energía para los requisitos de potencia en un corto período de tiempo y la batería es capaz de almacenar más energía y suministrar a la carga de energía continua a una tasa nominal durante un período de tiempo más largo. Esta combinación es ideal debido a que se reducirá el estrés en la batería y se extenderá el rendimiento en los almacenamientos aumentando la vida útil de la batería.

Será de ayuda contar con un módulo fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía para las prácticas de laboratorio, facilitando la enseñanza-aprendizaje teórico práctico, ya que no se cuenta con este módulo.

Es importante impulsar la investigación de los futuros profesionales sobre los sistemas de almacenamiento de energía dentro del área de energías renovables para así concienciar a la sociedad y mitigar los daños que produce un incorrecto aprovechamiento de los sistemas de acumulación de energía ya que al degradarse rápidamente aumentan los costos de operación, además de causar daño al medio ambiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido para el laboratorio de Energías Renovables.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido pasivo para uso didáctico.
- Implementar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido pasivo basado en supercondensadores y baterías.
- Realizar pruebas para verificar el comportamiento de la batería implementando el sistema de almacenamiento híbrido pasivo durante la carga-descarga en sistemas de generación fotovoltaica aislada.
- Evaluar la implementación del sistema híbrido pasivo para lograr superar el problema cuando la batería suministra una corriente pico frente a una alta demanda.

Capítulo II

2. Fundamentación Teórica

2.1. Energía solar fotovoltaica

Como menciona (Carta et al., 2012) la energía solar fotovoltaica se apoya en la implementación de paneles solares o paneles fotovoltaicos, fabricados con materiales semiconductores cristalinos que, por efecto fotovoltaico, generan una corriente eléctrica cuando se incide una radiación solar sobre los paneles. El silicio es la materia prima utilizada ampliamente para la fabricación de células solares como los paneles fotovoltaicos policristalinos y monocristalinos.

Las aplicaciones para la energía solar tienen como objetivo proporcionar energía eléctrica, tanto de forma aislada como de suministrar energía eléctrica en las redes eléctricas además otras aplicaciones más específicas podrían ser el suministro de energía a satélites artificiales hasta el abastecimiento de energía a vehículos.

2.2. Tipos de sistemas de generación fotovoltaica

Usualmente los sistemas fotovoltaicos suelen tener similares aplicaciones que cualquier sistema de generación eléctrica. Estos sistemas tienen cantidades de potencia y energía que están limitadas por la capacidad de generación y almacenamiento. En la práctica un sistema fotovoltaico puede generar toda la cantidad de energía como se desea; aunque desde el punto de vista económico, está limitado por el presupuesto en cuanto a la capacidad que se puede instalar. Por su aplicación, la cantidad de energía generada y el tipo de energía producida pueden clasificarse en los siguientes tipos.

2.2.1. Sistema fotovoltaico aislado

Estos sistemas fotovoltaicos son de preferencia aceptados cuando:

- No existe una probabilidad técnica o económica para que las empresas distribuidoras puedan llevar la red eléctrica habitual hasta cada uno de los hogares.
- La demanda de energía es moderada.

Si los domicilios para electrificar se ubican de forma dispersa, los sistemas fotovoltaicos aislados son la mejor solución, debido a su autonomía y modularidad, si los hogares para electrificar se localizan relativamente juntos entre sí, la elección correcta puede ser un sistema fotovoltaico aislado centralizado por la razón de la concentración de equipos y energía brindando ventajas desde el punto de vista técnico y económico.

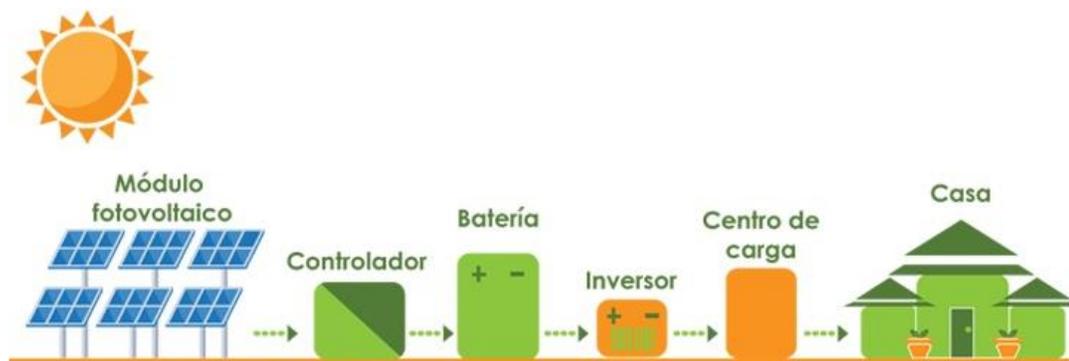
Las propiedades más destacadas del sistema fotovoltaico aislado centralizado son:

- Mejor calidad en el suministro de energía eléctrica: Los sistemas fotovoltaicos aislados centralizados proporcionan energía de alta calidad debido al empleo de inversores con un alto rendimiento.
- Mayor robustez del sistema: Los dispositivos empleados en los sistemas aislados centralizados son diseñados especialmente para soportar cargas residenciales.
- Menor costo de energía: Es cautivador desde el punto de vista económico ya que confiere energía a un valor más bajo de producción dependiendo de la cantidad de hogares a energizar.
- Menor impacto ambiental: Bajo nivel de contaminación, los sistemas de almacenamiento al final de su vida útil se deben reciclar.
- Distribución centralizada: Usualmente existirá dificultad ocasionado por una distribución no equitativa entre los usuarios.

A continuación, en la figura 1, se presentan los elementos que componen un sistema solar aislado.

Figura 1

Esquema de un sistema solar aislado



Nota. En la figura se detallan los componentes de un sistema solar aislado.

2.2.2. Sistema fotovoltaico de conexión a red

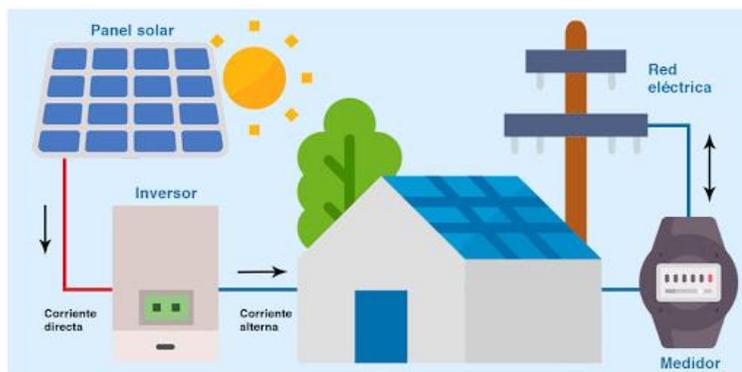
Es un sistema que tiene como función generar energía eléctrica en una calidad idónea para poder ser inyectada a la red tradicional. La energía generada por el sistema utilizará una fracción o a su vez el total de su energía en la proximidad y la energía restante se suministrará en la red para su distribución a diferentes puntos de carga. Estos sistemas de energía eléctrica son usuales para hogares urbanos que ya posean una red de distribución eléctrica. La utilidad de estos sistemas son la venta de energía eléctrica o el descuento de la facturación mensual.

La utilización de este sistema ha aumentado y alcanzado un punto aceptable en el Ecuador la agencia que regula este tipo de sistemas es la ARCONEL (La Agencia de Regulación y Control de Electricidad) el cual realizó un estudio técnico en el cual se detalla las características (ARCONEL, 2018) que deberán cumplir los consumidores para implementar sistemas de microgeneración fotovoltaica, el proceso para la disposición y el tratamiento comercial.

A continuación, en la figura 2, se presentan los elementos que componen un sistema solar conectado a la red.

Figura 2

Esquema de un sistema solar conectado a red



Nota. En la figura se detallan los componentes de un sistema conectado a red.

2.3. Sistemas con almacenamiento híbrido

Los sistemas de almacenamiento de energía híbrida (HESS) basados en baterías y supercapacitores, estos dos elementos pueden ser acoplados directamente o mediante convertidores bidireccional DC/DC. A continuación, se mencionan las diferentes conexiones de estos dispositivos de almacenamiento.

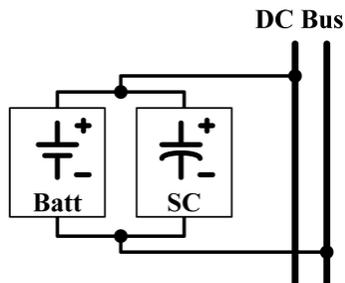
2.3.1. Topología pasiva

La conexión pasiva como se muestra en la figura 3 la batería y el supercapacitor se conectan directamente a la barra DC es la topología HESS más simple y económica. Se ha comprobado que elimina eficientemente los picos de corriente bajo cargas pulsadas y altas demandas de potencia aumentando la potencia máxima y reduciendo las pérdidas internas. Comparten un voltaje igual que dependerá del estado de carga (SOC). Siendo este sistema capaz de lograr una gran eficiencia de los dispositivos de almacenamiento, que al utilizar una sola tecnología de acumulación pese a que el HESS pasivo no tiene un sistema de control (Ma et al., 2015). Como se mencionó anteriormente el supercondensador estará conectado directamente a las baterías las cuales actuarán para entregar la energía de larga duración y los supercondensadores

ayudarán a suavizar la descarga en la batería. Esta topología cumplirá con las condiciones de balance de energía durante la carga-descarga.

Figura 3

Topología pasiva HESS



Nota. El gráfico representa la conexión híbrida pasiva entre el supercapacitor y la batería. Tomado de (Jing et al., 2016).

2.3.2. Topología semi activa

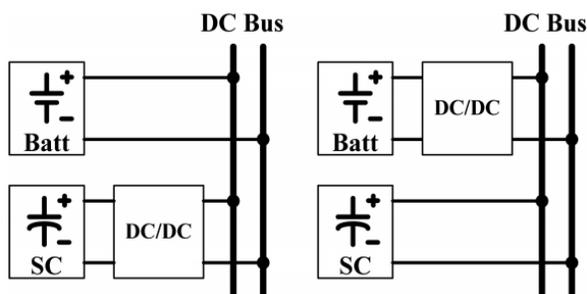
A diferencia del anterior mencionado se incluyen convertidores electrónicos de potencia en un sistema de almacenamiento y el otro sistema de almacenamiento directo a la barra de DC. Permitiendo administrar activamente la demanda en las cargas. En la topología HESS semiactiva tan solo uno de los dispositivos de almacenamiento se controla activamente.

Una topología HESS semiactiva como se muestra en la figura 4. La primera opción sería acoplar el supercapacitor a la barra DC a través de un convertidor DC/DC bidireccional apartando el supercondensador de la barra DC y del terminal de la batería. En (Jing et al., 2016) esta estructura el supercapacitor es capaz de actuar en condiciones más amplias de voltaje, lo que incrementa sustancialmente el rendimiento volumétrico. Otra alternativa sería acoplar la batería al convertidor DC/DC bidireccional por lo tanto el supercapacitor estará conectado directamente a la barra DC. A diferencia de la topología pasiva y semiactiva del supercondensador, la corriente de la batería se podrá controlar de un modo leve e independiente de la fluctuación en la demanda de

energía. En esta configuración el voltaje de la batería será igual al voltaje de la barra DC, lo que facilita una configuración, tamaño, flexibilidad y eficiencia del banco de baterías. Teniendo una mayor eficacia volumétrica.

Figura 4

Topología semi activa HESS



Nota. El gráfico representa la conexión híbrida semiactiva entre el supercapacitor y la batería. Tomado de (Jing et al., 2016).

2.3.3. Topología activa

El flujo de energía de los dispositivos de almacenamiento tanto para el supercapacitor y batería se controlan activamente por medio de convertidores DC/DC bidireccionales incrementando la flexibilidad del HESS aumentando aún más la eficiencia en el almacenamiento y vida útil en comparación a las otras dos topologías.

El HESS activo como lo muestra la figura 5 tanto la batería como el supercapacitor serán acoplados al conversor DC/DC bidireccional esta topología es frecuente utilizarlas en los sistemas de almacenamiento para la red lo que posibilita un control de los dos elementos de almacenamiento permitiendo un rendimiento, duración de la batería y la estabilidad en la barra de DC además de poder mejorar por medio de estrategias de control. Ambos elementos mejoran la gran eficiencia volumétrica del sistema de almacenamiento híbrido.

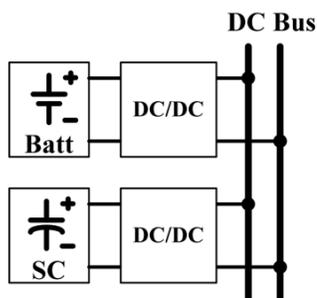
El HESS en cascada como se muestra en la figura 6 tiene dos convertidores DC/DC bidireccionales aislando la batería y el supercondensador de la barra DC. El

convertidor DC/DC bidireccional que desacopla la batería del supercapacitor gestionará un intercambio de energía suave en la batería liberando a la batería del proceso de carga y descarga. El convertidor DC/DC bidireccional que separa el supercondensador de la barra DC está controlado por el voltaje de la barra DC aportando a las altas demandas. Por lo que el supercondensador estará sujeto a su voltaje de funcionamiento. Una oscilación entre el voltaje de la barra y el supercondensador tendrá como consecuencias pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC bidireccional ya que es complicado mantener los voltajes en la barra DC puesto que a medida que se añaden conversores de potencia la eficiencia disminuye por las pérdidas en los convertidores de potencia.

La eficiencia del sistema HESS activo dependerá de la fiabilidad de los convertidores DC/DC y el sistema de control.

Figura 5

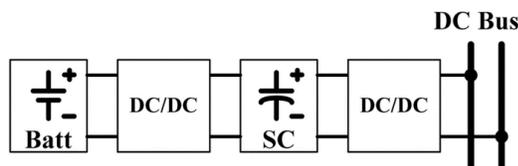
Topología activa HESS en paralelo



Nota. El gráfico representa la conexión híbrida activa en paralelo entre el supercapacitor y la batería. Tomado de (Jing et al., 2016).

Figura 6

Topología activa HESS en cascada



Nota. El gráfico representa la conexión híbrida activa en cascada entre el supercapacitor y la batería. Tomado de (Jing et al., 2016).

2.4. Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo en fuentes de energías renovables.

La hibridación de los sistemas de almacenamiento de energía puede diseñarse en una topología pasiva basado en supercapacitores y baterías estarán conectados directamente en paralelo a la misma barra DC. Para (Grün et al., 2018) las características técnicas del sistema de almacenamiento híbrido para el diseño del HESS pasivo se debe considerar el nivel de voltaje de cada tecnología de almacenamiento, lo que significa que las baterías y supercapacitores deben agregarse en serie para que coincidan con los rangos de voltaje dados además estos sistemas deberá ser seleccionados por su valor de resistencia interna donde el supercapacitor deberá tener una menor resistencia interna en comparación a la resistencia interna de la batería para que el supercapacitor pueda actuar como buffer (proporcionar energía eléctrica durante un tiempo para mejorar la calidad de energía que llegan a las cargas) frente a las cargas de alta corriente.

Estos sistemas se pueden encontrar en aplicaciones estacionarias, como sistemas fotovoltaicos y también en el sector automotriz. Tanto la topología activa como semiactiva, tienen algunas ventajas sobre los sistemas pasivos. Debido al control activo, el flujo de energía dentro de estos sistemas es optimizado y extiende aún más la vida útil de la batería. Sin embargo, los sistemas pasivos logran una mayor eficiencia

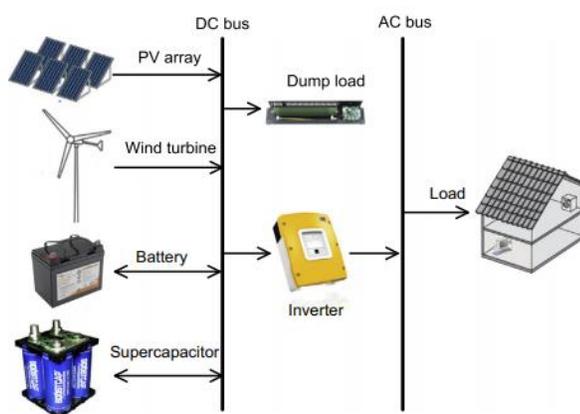
energética debido al hecho de que no se utilizan dispositivos electrónicos de potencia. Estos sistemas son también más confiables, menos costosos y sencillos de implementar debido a la falta de convertidores de potencia y sistemas de control. La densidad de potencia y densidad de energía pueden verse influidas por el tamaño de las baterías y supercapacitores.

En la figura 7 se muestra la implementación del sistema de almacenamiento híbrido pasivo con fuentes de energías renovables. Los principales dispositivos son el generador de energía renovable, inversor, el controlador de carga además de las baterías y supercapacitores que están conectados de forma pasiva.

En este sistema las baterías proporcionan la energía de larga duración y los supercapacitores suavizaran las altas demandas durante un tiempo. El sistema deberá cumplir con los requerimientos de carga y los requisitos que demanden las cargas.

Figura 7

Sistemas de energías renovables aisladas con un sistema de almacenamiento híbrido de energía pasivo



Nota. El gráfico representa la conexión de un sistema híbrido pasivo a fuentes de energías renovables. Tomado de (Ma et al., 2015).

2.5. Elementos de un sistema fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido pasivo

2.5.1. Paneles fotovoltaicos

El módulo solar está compuesto por una serie de células, interconectadas una con otras, estas células se encuentran encapsuladas y ensambladas en una estructura sólida que dé soporte al panel fotovoltaico. Suministra en su salida un voltaje DC diseñado para capacidades de voltaje concretos (6 V, 12 V, 24 V). El voltaje del panel será mayor al nominal por dos razones:

- Aminorar las posibles caídas de tensión por el incremento de la temperatura.
- Garantizar una correcta carga de la batería, el valor de voltaje definirá la tensión nominal en la cual trabajará el sistema.

La energía que suministra la célula es de un tamaño estándar por lo que es inevitable tener que agrupar varios paneles solares con la finalidad de suministrar la energía necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación.

Conforme a las necesidades de la instalación se podrá realizar las siguientes conexiones eléctricas. La configuración en serie de los paneles fotovoltaicos sumará la tensión de las células aumentando la tensión final en los extremos. La configuración en paralelo ayudará a aumentar la intensidad total del sistema fotovoltaico.

2.5.1.1. Policristalino. (Moro Vallina, 2010) Las células de silicio policristalino tienen una disposición no uniforme en su elaboración se realiza en moldes rectangulares, teniendo un coste de manufactura más barato que las células de silicio monocristalino. La actualidad del mercado está dominada por las células de silicio policristalino. El rendimiento de las células de silicio policristalino es sensiblemente más bajo que las células de silicio monocristalino.

2.5.1.2. Monocristalino. (Moro Vallina, 2010) Las células de silicio monocristalino gozan de una distribución muy uniforme la cual elaboran en forma de

cilindros que después se recortan en obleas su manufactura es gradual demandando demasiada energía en su fabricación. El aumento en el rendimiento sobre el silicio policristalino ha permitido reducir la disposición del mercado de las células de silicio monocristalino.

2.5.1.3. Comparación entre paneles fotovoltaicos. En la tabla 1 se representará una comparación entre las diferentes tecnologías.

Tabla 1

Características de células fotovoltaicas monocristalinas y policristalinas

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio (%)	Rendimiento directo (%)	Características	Fabricación
	Monocristalino	24	15-18	Es propio de esta tecnología que sean azules y homogéneas. Este panel se extiende en un área	Se obtiene de silicio puro fundido a su vez con boro. Es igual que el monocristalino
	Policristalino	19-20	12-14	compuesta por cristales contiene distintos tonos azules.	disminuyendo el número de células cristalinas.

Nota. Se compara las células policristalinas y monocristalinas, se observa un rendimiento mayor en las células monocristalinas. Tomado de (Corcobado & Rubio, 2010).

2.5.2. Reguladores de carga

Para un adecuado desempeño de la instalación fotovoltaica, es preciso disponer de un sistema de regulación en los sistemas de almacenamiento. El dispositivo que permite una correcta gestión de carga es el regulador teniendo como función principal prevenir situaciones de sobre carga y de sobre descarga de los sistemas de almacenamiento. De modo que el regulador de forma general trabaja en dos zonas. La primera zona corresponde a la carga teniendo la tarea de asegurar una carga apta al sistema de almacenamiento además de prevenir circunstancias de sobre carga, la segunda zona corresponde a la parte de la descarga, teniendo como misión garantizar el abasto eléctrico suficiente para evitar una descarga desmedida en los sistemas de acumulación.

(Corcobado & Rubio, 2010) Los paneles solares tienen un voltaje nominal mayor al de los sistemas de almacenamiento, si no hubiera un regulador podría existir sobrecargas.

Para los cálculos en el diseño de la instalación solar se llevará a cabo en condiciones meteorológicas desfavorables de energía solar.

2.5.2.1. Regulador modulador de ancho de pulsos PWM. (Moro Vallina, 2010)

El regulador PWM (Modulador por Anchos de Pulsos) de forma general en su interior únicamente se ubica un diodo por lo que los paneles solares operan en un voltaje igual al de las baterías solares.

Admite corrientes del panel solar a los sistemas de acumulación hasta llegar a su estado de carga total. Por lo tanto, empieza a conectar y desconectar los sistemas de almacenamiento del panel solar hasta llegar a su carga total. Después de que su estado de carga llegue al 100 % se desconectará completamente del sistema de acumulación. Los reguladores de carga PWM trabajan sin considerar el punto de

máxima potencia y podría estar por encima o por debajo del punto de máxima potencia según el nivel de radiación que incida sobre el panel.

Todo esto involucra que si se implementará un regulador PWM de 12 V usaremos un panel solar de 12 V y deberemos usar un almacenamiento de igual valor el cual es 12 V. Los reguladores de carga PWM actúan como interruptores entre los paneles solares y las baterías.

2.5.2.2. Técnicas de seguimientos de punto de máxima potencia MPPT.

(Moro Vallina, 2010) Los reguladores de carga MPPT (Seguidor del Punto de Máxima Potencia) o maximizadores solares, de forma general está compuesto por un diodo de protección además de un convertor DC/DC y un rastreador del punto de máxima potencia. De modo que, un regulador de carga MPPT entregará la energía de entrada a la salida del regulador de igual forma que los reguladores de carga PWM, sin embargo, el voltaje y la corriente son diferentes en la entrada y en la salida.

El regulador de carga MPPT averigua constantemente el voltaje donde el panel solar genera más energía y luego convierte esta energía por medio de un convertidor DC/DC a un voltaje apropiado para cargar la batería. Esto involucra que si se implementara un panel fotovoltaico de 24 V podremos utilizar baterías de 12 V siempre que se utilice un controlador de carga MPPT.

2.5.2.3. Comparación entre los reguladores de carga. Los reguladores de carga PWM se diseñan según la corriente máxima en los paneles solares y del voltaje en los sistemas de acumulación. Los reguladores de carga MPPT se diseñan según la potencia en los paneles solares y del nivel de voltaje en los sistemas de acumulación, averiándose cuando rebasan el voltaje nominal en la entrada del regulador de carga. En la siguiente tabla 2 se representará una comparación entre las diferentes tecnologías.

Tabla 2*Características de controladores de carga PWM y MPPT*

	PWM	MPPT
Funcionalidad	Controla el voltaje en la entrada del controlador para que coincida con los dispositivos de almacenamiento.	La tecnología empleada en el controlador MPPT permite encontrar el voltaje y corriente óptimos del panel.
Eficiencia (%)	75-85	95-99
Diferencias	No puede manejar grandes diferencias de voltaje entre el panel y la batería. La corriente de carga es semejante a la del panel solar. Las tensiones de los sistemas de acumulación y la matriz fotovoltaica deben ser iguales.	Se puede utilizar con una gran diferencia de voltajes. La corriente en la carga no es idéntica a la del panel fotovoltaico ya que la corriente que se extrae es la del voltaje en potencia máxima. El voltaje de la matriz fotovoltaica podrá ser mayor que el voltaje de la batería.
Precio	Menor.	Mayor.

Nota. Comparación entre los dos sistemas de regulación de carga en sistemas fotovoltaicos siendo el regulador MPPT más eficiente que el regulador PWM. Tomado de (Corcobado & Rubio, 2010).

2.5.3. Almacenamiento

El almacenamiento de energía, como su nombre menciona, son tecnologías que acumulan energía para después poder utilizarla cuando las demandas requieran de la energía almacenada para su funcionamiento. Esta tecnología permite aumentar la eficiencia y fiabilidad de los sistemas de energías renovables.

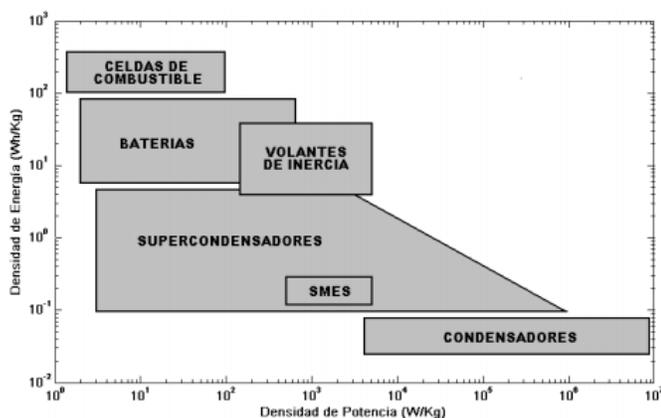
Los sistemas de almacenamiento de energía comprenden diversas tecnologías desarrolladas para poder comparar estos sistemas se revisan dos variables eléctricas

como lo es la densidad de energía y la densidad de potencia con lo que se evalúa la capacidad de almacenar energía y la facultad de poder intercambiar energía por unidad de masa.

La figura 8 representa un diagrama que se emplea para comparar y entender los acumuladores de energía. Representado el eje vertical la energía específica (Wh/kg) y el eje horizontal representa la potencia específica (W/kg).

Figura 8

Diagrama de Ragone



Nota. Se muestra el diagrama de Ragone donde se establecen las diversas tecnologías de almacenamiento en función de sus características eléctricas. Tomado de (Sundén, 2019).

En la tabla 3 el autor (Pandolfo & Hollenkamp, 2006) compara algunas características importantes de los supercapacitores y baterías.

Tabla 3

Comparación de las tecnologías de almacenamiento

Características	Condensador	Supercapacitor	Batería
Energía específica $W \cdot h \cdot kg^{-1}$	<0.1	1 - 10	10 - 100

Características	Condensador	Supercapacitor	Batería
Potencia específica $W.kg^{-1}$	>10 000	500 – 10 000	<1 000
Tiempo de descarga	10^{-6} a 10^{-3} segundos	De segundos a minutos	0.3 – 3 horas
Tiempo de carga	10^{-6} a 10^{-3} segundos	De segundos a minutos	1 – 5 horas
Eficiencia %	100	85 - 98	70 - 85
Ciclo de vida	Casi infinito	500 000	< 1 000

Nota. Se puede notar al comparar que las baterías tendrán una densidad de energía mayor que los supercapacitores, pero los supercapacitores tendrán una densidad de potencia mayor que las baterías además de ver los tiempos de carga estimados de cada uno de estos sistemas de almacenamiento.

En la tabla 4 el autor (Miller & Simon, 2008) compara algunas propiedades de los almacenamientos como es el caso de los supercapacitores y baterías.

Tabla 4

Características físicas de los sistemas acumulación de baterías y supercapacitores

Parámetro	Batería	Supercapacitor
Mecanismos de almacenamiento	Químico	Físico
Limitación de potencia	Cinética de reacción, transporte de iones.	Conductividad electrolítica
Capacidad de energía	Alto	Limitado
Tasa de carga	Limitado por la cinética	Alto, igual a la descarga

Nota. Comparación de las características físicas de los sistemas de acumulación entre baterías y supercapacitores.

2.5.3.1. Baterías. Según (Barbosa, 2017) las baterías almacenan indirectamente la energía eléctrica, las baterías son componentes aptos para convertir la energía

química en energía eléctrica. Esta acción hace inevitable emplear un sistema de acumulación de energía para escenarios en que la radiación absorbida sobre el panel fotovoltaico no esté en la capacidad de cubrir los requerimientos de las cargas. Por lo tanto, se utilizan baterías u otros sistemas de acumulación.

La operatividad en una instalación fotovoltaica es generación (Energía Eléctrica), almacenamiento (Energía Química) y consumo (Energía Eléctrica). Las funciones principales que tienen las baterías en las instalaciones fotovoltaicas son:

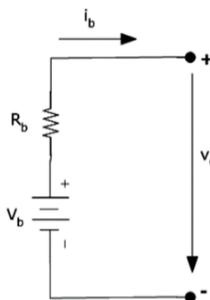
- Acumular energía a lo largo de un determinado número de días.
- Suministrar una energía cuando la carga lo demande.
- Establecer el voltaje de trabajo de la instalación fotovoltaica.

Siendo estas las características más fundamentales a considerar a la hora de seleccionar una batería a más de la densidad de energía.

2.5.3.1.1. Modelo equivalente. El circuito equivalente simplificado de la batería se muestra en la figura 9.

Figura 9

Circuito simplificado de una batería



Nota. Representa el circuito del modelo simplificado de una batería. Tomado de (Zhao et al., 2014).

La figura además muestra un esquema de un bloque típico de una batería. Consiste en una celda de voltaje principal (V_b) y una resistencia interna en serie

equivalente en la batería (R_b). La resistencia interna de una batería resulta del volumen propio de la batería, características químicas en el tiempo y de la temperatura además de la corriente de descarga. Por consiguiente, la diferencia de tensión medida en los extremos de los terminales de la batería es el total de la caída de voltaje en la resistencia interna y el voltaje de la celda de la batería.

2.5.3.1.2. Carga – Descarga. (Mascarós Mateo, 2015) El transcurso de carga el valor del voltaje V_0 se incrementará, a su vez que la resistencia interna R_b se aminorará. De lo opuesto que sucede durante el proceso de descarga disminuyendo el valor de voltaje V_0 aumentado el valor de la resistencia R_b .

En el proceso de carga de la batería funciona como demanda y la corriente entra por el lado positivo. El valor de voltaje en los bornes de la batería se obtiene como:

$$V_0 = V_b + R_b * I_o \quad (1)$$

Por el contrario, en el tiempo durante la descarga la batería trabajara como generador y la corriente sale por el lado positivo. El valor de voltaje en los bornes de la batería se obtiene como:

$$V_0 = V_b - R_b * I_o \quad (2)$$

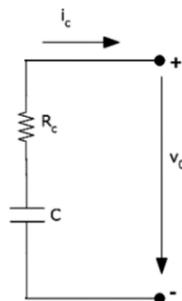
2.5.3.2. Supercapacitor. El supercapacitor es un dispositivo eléctrico que tiene como objetivo acumular energía en un campo eléctrico. Esa capacidad de acumulación de energía eléctrica se define por su capacitancia. El supercondensador acumula energía con una característica cautivadora la cual es que dispone de una alta densidad de potencia además de que los supercondensadores son formas directas de acumular energía ya que los supercondensadores almacenan energía en un campo electromagnético.

2.5.3.2.1. Modelo Equivalente. El circuito equivalente para el supercapacitor se muestra en la figura 10 las propiedades que se exponen en el circuito simplificado son

la R_c es una pequeña resistencia que representa las pérdidas óhmicas en los colectores y C la capacitancia.

Figura 10

Circuito simplificado de un supercapacitor



Nota. Representa el circuito del modelo simplificado de un supercapacitor. Tomado de (Seim, 2012).

Un supercapacitor común ideal acumula y transforma completamente la energía carente de pérdidas. Un supercapacitor normal real están presentes pérdidas por la resistencia interna además de las corrientes de fuga. Por consiguiente, al modelar el comportamiento de un condensador de este tipo, es apropiado usar el circuito equivalente presentado.

2.5.3.2.2. Carga y Descarga a resistencia constante. Utilizar una resistencia para la carga y descarga es el procedimiento más sencillo como lo indica la figura 11. El supercapacitor se carga a partir de una fuente de voltaje por medio de una resistencia de carga y se descarga igualmente por medio de la resistencia (Grbović et al., 2012).

La tensión en el supercapacitor durante la carga y descarga procede como un condensador normal que se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$u_{CO} = u_{CI} \left[1 - e^{\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right] \quad (3)$$

Donde:

u_{CI} : Voltaje inicial del capacitor.

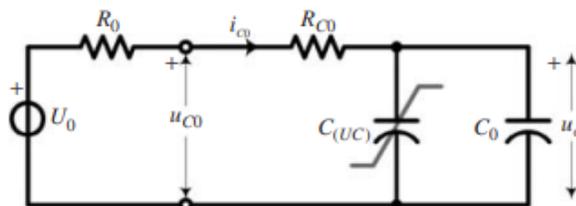
τ : Constante de tiempo del capacitor.

t : Tiempo de carga – descarga del capacitor.

La constante τ establece el tiempo de carga y descarga del supercapacitor.

Figura 11

Carga a resistencia constante, descarga a resistencia constante

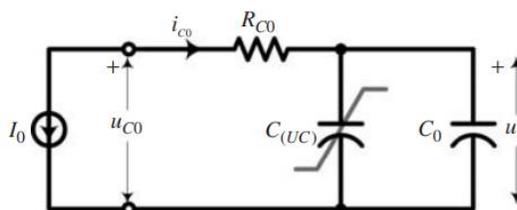


Nota. Representa los diagramas de carga y descarga de un supercapacitor a una resistencia constante. Tomado de (Grbović et al., 2012).

2.5.3.2.3. Carga y Descarga a corriente constante. El proceso de carga y descarga con una fuente de corriente constante como lo indica la figura 12, se hallan en convertidores de potencia además de cargadores regulados y motores eléctricos de par constante (Grbović et al., 2012).

Figura 12

Carga y descarga del supercapacitor a corriente constante



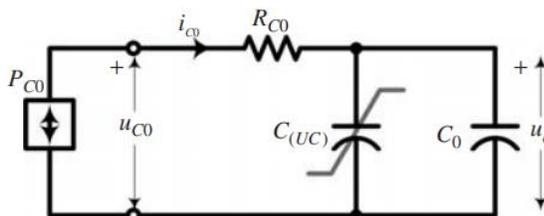
Nota. Representa los diagramas de carga y descarga de un supercapacitor a una corriente constante. Tomado de (Grbović et al., 2012).

2.5.3.2.4. Carga y Descarga a potencia constante. El proceso de carga y descarga a potencia constante como lo indica la figura 13, se lo realiza cuando se contempla cargas de potencia constante o convertidores de potencia con una salida de

tensión regulada como lo son drivers de velocidad además de convertidores DC/DC (Grbović et al., 2012).

Figura 13

Carga y descarga del supercapacitor a potencia constante



Nota. Representa los diagramas de carga y descarga de un supercapacitor a una potencia constante. Tomado de (Grbović et al., 2012).

2.5.4. Inversores fotovoltaicos

El inversor es el responsable de transformar la corriente continua del sistema en corriente alterna semejante a la utilizada en los sistemas eléctricos teniendo un nivel de voltaje y una frecuencia en su salida. Este dispositivo es imprescindible en las instalaciones fotovoltaicas tanto en los sistemas conectados a red como los sistemas autónomos especialmente para la electrificación de viviendas.

- La tarea del inversor en las instalaciones autónomas es suministrar una corriente alterna similar a la de red eléctrica con el propósito de conectar las cargas como electrodomésticos utilizados en las viviendas.
- Para las instalaciones conectadas a red el componente que suministrará una corriente alterna de las mismas características eléctricas del sistema tanto en forma senoidal, voltaje eficaz y sobre todo en frecuencia será el inversor el cual no deberá tener variaciones en estos valores para prevenir perturbaciones en el sistema de distribución.

Las especificaciones a tomar en cuenta en el inversor DC/AC para los sistemas fotovoltaicos deberá tener las siguientes características:

- Alta eficiencia para desempeñarse correctamente para un rango amplio de potencias.
- Bajo consumo en vacío.
- Protección contra cortocircuitos.
- Seguridad.
- Regulación en la tensión-frecuencia.

2.5.5. Sistema de medición

En la actualidad los dispositivos empleados en los sistemas fotovoltaicos cuentan con la tecnología Bluetooth Smart que permite supervisar a los módulos conectados, tanto las variables eléctricas como indirectas. A continuación, en la tabla 5, se detallan las variables de cada uno de los dos conjuntos ya mencionados.

Tabla 5

Variables eléctricas e indirectas de los dispositivos inteligentes de un sistema fotovoltaico

Variables eléctricas	Variables indirectas
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje en los paneles solares. • Voltaje en los almacenamientos. • Corriente durante la carga en los almacenamientos. • Corriente durante la descarga en los almacenamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia de generación solar. • Nivel de estado de carga de la batería. • Potencia de consumo en el inversor. • Amperios horas consumidos.

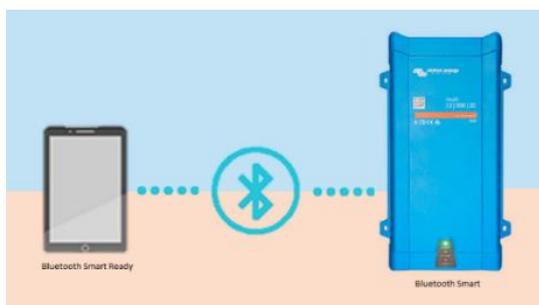
Nota. Se detallan las variables eléctricas e indirectas que miden los dispositivos inteligentes como lo son el regulador de carga, monitores de almacenamiento e inversor pudiendo ser visualizadas en un dispositivo receptor. Tomado de (Salazar & Vaca, 2014).

Bluetooth Smart es un protocolo de comunicación de limitado alcance, es utilizado en módulos específicos para compilar datos fijos para posteriormente enviarlos a una aplicación concreta de un dispositivo receptor (Muñoz, 2019).

El fin de este dispositivo en los sistemas fotovoltaicos es recopilar la información del regulador de carga, dispositivos de almacenamiento e inversor, es esencial que estos dispositivos inteligentes recopilen información para ser enviada a otro dispositivo compatible actuando como un centro para recibir y visualizar la información del sistema fotovoltaico. La figura 14 representa esta conexión.

Figura 14

Ejemplo de los actuales inversores de carga con Bluetooth Smart - Bluetooth Smart Ready



Nota. Se emplea un inversor Smart el cual enviará las variables eléctricas como indirectas a un dispositivo inteligente para visualizar dentro de una aplicación específica.

2.6. Dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido pasivo

2.6.1. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica aislada

El procedimiento para el dimensionamiento se fundamenta en efectuar una serie de cálculos en base al proceso definido por la bibliografía revisada de (Carta et al., 2012) en el cual se detalla un proceso concreto y preciso para el dimensionamiento de sistemas solares autónomos o aislados.

2.6.1.1. Estimación del consumo ($L_{MD,CA}, L_{MD,DC}$). El objetivo de dimensionar apropiadamente la instalación de generación fotovoltaica es prevenir intermitencias durante el abastecimiento de energía por tal motivo es necesario estimar el consumo de la demanda de energía. En una instalación fotovoltaica se pueden encontrar diferentes consumos energéticos. La energía eléctrica diaria consumida deberá ser entregada por el sistema de energía solar y se diferenciará el tipo de consumo energético a utilizar que podrá ser DC o AC.

$$L_{MD,DC} = \sum \# Equipos * Horas * P_{Eq} \quad (4)$$

El cálculo de la estimación del consumo para equipos en DC se puede determinar utilizando la ecuación 4 donde:

$\# Equipos$: Número de equipos de similares propiedades.

$Horas$: Número de horas estimadas para el funcionamiento del equipo.

P_{Eq} : Potencia nominal de la carga en DC.

$$L_{MD,AC} = \sum \# Equipos * Horas * P_{Eq} \quad (5)$$

El cálculo de la estimación del consumo para equipos en AC se puede determinar utilizando la ecuación 5 donde:

$\# Equipos$: Número de equipos de similares propiedades.

$Horas$: Número de horas estimadas para el funcionamiento del equipo.

P_{Eq} : Potencia nominal de la carga en AC.

2.6.1.2. Cálculo de la energía diaria media consumida (L_{MD}). Este dimensionamiento requiere calcular la energía total necesaria a generar analizando las pérdidas de los dispositivos del sistema fotovoltaico. Las ecuaciones ya propuestas ayudarán a la estimación de la energía media diaria consumida en la instalación ya que se considerarán los rendimientos de los dispositivos como los son la batería, inversor y

en los conductores. La energía o consumo medio diario L_{MD} está dada por la siguiente ecuación.

$$L_{MD} = \frac{L_{MD,CC} + \frac{L_{MD,AC}}{n_{INV}}}{n_{BAT} * n_C} \quad (6)$$

La ecuación 6 se refiere al cálculo de la energía media consumida teniendo en cuenta los rendimientos donde:

$L_{MD,CA}$: Consumo energético AC.

$L_{MD,CC}$: Consumo energético DC.

n_{INV} : Rendimiento del inversor.

n_{BAT} : Rendimiento de la batería.

n_C : Rendimiento de los conductores que representa las pérdidas por efecto

Joule.

2.6.1.3. Consumo total anual (L_T). Es la producción media diaria de consumo y la cantidad de días de consumo a lo largo del año.

$$L_T = L_{MD} * N_D \quad (7)$$

La ecuación 7 se refiere al cálculo de la energía media consumida teniendo en cuenta los rendimientos donde:

N_D : Número de días de consumo a lo largo de un año.

L_{MD} : Energía o consumo medio diario de la instalación.

2.6.1.4. Determinación de la tensión nominal de la instalación (V_N). El voltaje nominal de operación de la instalación se puede determinar a partir de la potencia de la instalación, que lógicamente está relacionada con la energía consumida. Se suele emplear un voltaje estándar: 12 V, 24 V, 48 V o 120 V.

En general se recomienda:

- 12 V para potencias inferiores a 1.5 kW.

- 24 V o 48 V para potencias superiores a 1.5 kW e inferiores a 5 kW.
- 48 V o 120 V para potencias superiores de 5 kW.

2.6.1.5. Dimensionamiento del generador fotovoltaico. El generador fotovoltaico está compuesto por la asociación de módulos fotovoltaicos. En general el proceso de dimensionamiento del generador fotovoltaico se basa en su capacidad para suministrar la energía media diaria necesaria considerando el mes más crítico. El sistema fotovoltaico autónomo deberá garantizar el suministro energético si el gasto diario es constante a lo largo de todos los meses del año.

Energía diaria producida por el módulo (E_{DMF}). Siendo el regulador de carga MPPT más eficiente que el regulador PWM se empleara dicho regulador (MPPT). El procedimiento se detalla a continuación. La energía producida diariamente por el dispositivo fotovoltaico será en las condiciones del mes más crítico esta energía calculada nos ayudará a determinar el número total de paneles fotovoltaicos necesarios para cubrir la demanda. Calculando la energía diaria producida de la siguiente manera.

$$E_{DMF} = P_{MOD.STC} * HSP * PR \quad (8)$$

La ecuación 8 se refiere al cálculo de la energía diaria producida teniendo en cuenta las pérdidas en el panel fotovoltaico y el HSP en el peor mes del año donde:

$P_{MOD.STC}$: Potencia máxima del módulo fotovoltaico.

HSP : Horas solares pico diarias en el mes más crítico.

PR : Coeficiente de las pérdidas en el módulo fotovoltaico. También sirve para la degradación de potencia en el tiempo.

Número de paneles necesarios (N_T). La cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios es el cociente entre el consumo medio diario y la energía diaria entregada por un módulo durante el mes más crítico.

$$N_T = \frac{L_{MD}}{E_{DMF}} \quad (9)$$

La ecuación 9 se refiere al número de paneles necesarios para cubrir la demanda diaria del sistema donde:

L_{MD} : Energía o consumo medio diario de la instalación.

E_{DMF} : Energía diaria producida por el módulo.

Número de paneles en serie (N_S). La cantidad de módulos solares en serie se determina dividiendo el voltaje nominal de la instalación entre el voltaje de un módulo en circuito abierto

$$N_S = \frac{V_N}{V_{MOD.MPP} - 3V} \quad (10)$$

La ecuación 10 la cual será el número de paneles en serie para obtener el voltaje nominal del sistema donde:

V_N : Tensión nominal de la instalación.

$V_{MOD.MPP}$: Tensión de un módulo en circuito abierto.

Ramas de paneles conectadas en paralelo (N_P). El número de ramas conectadas en paralelo se calcula dividiendo el número total de paneles sobre el número de paneles en serie.

$$N_P = \frac{N_T}{N_S} \quad (11)$$

La ecuación 11 calcula el número total de paneles para satisfacer la demanda, así como la configuración en serie para llegar el voltaje nominal donde:

N_T : Número de paneles necesarios.

N_S : Número de paneles en serie.

2.6.1.6. Cálculo del almacenamiento por baterías. El banco de baterías tendrá que abastecer la energía de la carga cuando no esté presente la irradiación o sea baja. Deberá almacenar la energía requerida para la carga, y se debe de tomar en cuenta los

días de autonomía. Para determinar la capacidad del banco de baterías se necesita definir los siguientes parámetros.

Las baterías deberán tener la energía suficiente para suministrar energía sin llegar a una profundidad máxima de descarga diaria tolerada. Por tal motivo el dimensionamiento de la capacidad nominal de la batería será en función de la descarga máxima calculando de la siguiente manera.

$$C_D = \frac{L_{MD}}{PD_D * V_N} \quad (12)$$

La ecuación 12 calculará la capacidad de energía máxima diaria que deberá disponer tomado en cuenta la profundidad de descarga donde:

C_D : Capacidad máxima diaria.

L_{MD} : Cálculo de la energía diaria corregida.

PD_D : Profundidad de descarga máxima.

V_N : Voltaje nominal del sistema.

Para las ocasiones en que no exista la energía solar durante los días de autonomía para la instalación fotovoltaica la energía deberá ser suministrada por la batería sin que su profundidad de descarga exceda a la permitida.

Cantidad de baterías en serie (N_{BS}). La cantidad de baterías en serie deberá ser en función del voltaje nominal del sistema para el voltaje nominal de las baterías.

$$N_{b.s} = \frac{V_N}{V_b} \quad (13)$$

La ecuación 13 describe el número de baterías conectadas en serie donde.

V_N : Voltaje nominal del sistema.

V_b : Voltaje nominal de la batería.

Cantidad de baterías en paralelo ($N_{b,p}$). Las ramas en paralelo se calcularán al dividir la capacidad nominal calculada para la capacidad nominal de la batería.

$$N_{b.P} = \frac{C_N}{C_b} \quad (14)$$

La ecuación 14 describe el número de ramas en paralelo de las baterías donde.

C_N : Capacidad nominal.

C_b : Capacidad nominal de la batería.

Cantidad de baterías total ($N_{b.T}$). El total de baterías del sistema de acumulación se calculará de la siguiente manera.

$$N_{b.T} = N_{b.S} * N_{b.P} \quad (15)$$

La ecuación 15 describe el número total de las baterías para cumplir los requerimientos de la demanda, así como los del voltaje nominal del sistema.

$N_{b.S}$: Número de baterías conectadas en serie.

$N_{b.P}$: Número de ramas conectadas en paralelo.

2.6.1.7. Dimensionamiento del regulador de carga ($I_{GFV.SC}$). El regulador se conecta en serie con los módulos solares, por lo que circula por él una corriente proveniente de los paneles solares. De acuerdo a las normas de diseño. la corriente nominal del regulador de carga se debe seleccionar con un factor de 1.20 a 1.25 de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) entregada por el conjunto de paneles solares.

$$I_{GFV.SC} = 1.25 * I_{MOD.SC} * N_P \quad (16)$$

La ecuación 16 calculará la corriente que deberá soportar en la entrada del regulador de carga.

$I_{MOD.SC}$: Corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico.

N_P : Número de ramas conectadas en paralelo.

2.6.1.8. Dimensionamiento del inversor (S_{INV}). La potencia del inversor está definida en función de la potencia de las cargas de consumo en AC, el rendimiento de las cargas y la simultaneidad de uso en las cargas.

$$S_{INV} \geq 1.25 * \sum S_{CA} \quad (17)$$

La ecuación 17 calculará la potencia que deberá soportar el inversor donde.

S_{INV} : Potencia aparente total demandada por las cargas de forma simultánea.

Cálculo de la potencia aparente total (Q_{AC}). Para el determinar la potencia del inversor se deberá realizar cálculos previos como lo es la potencia reactiva total de las cargas para las prácticas.

$$Q_{AC} = \sum P_{Eq} * \tan(\arccos(FP)) \quad (18)$$

La ecuación 18 calculará la potencia reactiva de las cargas a conectar en donde:

P_{Eq} : Potencia nominal de cada equipo para AC.

FP : Factor de potencia de las cargas a conectar.

Además de la potencia aparente total de las cargas

$$S_{AC} = \sqrt{\sum P_{Eq}^2 + Q_{AC}^2} \quad (19)$$

La ecuación 19 describe la potencia aparente total de las cargas a conectar.

$\sum P_{Eq}$: Suma de potencias de las cargas a conectar.

Q_{AC} : Potencia reactiva total de las cargas.

2.6.2. Dimensionamiento del almacenamiento por supercapacitores

Como se menciona en el artículo (Ma et al., 2015) de las tres topologías de los sistemas de almacenamiento híbrido ya mencionadas la topología pasiva es la más sencilla y a su vez la más económica además pudiendo mejorar el aprovechamiento del sistema que tan solo utilizar un almacenamiento de energía como lo son las baterías aun cuando el flujo de energía del sistema de almacenamiento híbrido pasivo no es controlado. El supercapacitor se conectará en paralelo con la batería directamente a la barra DC en los sistemas de generación fotovoltaica las baterías suministrarán energía

de forma prolongada mientras que los supercondensadores servirán para suavizar los picos de la demanda.

2.6.2.1. Número de supercapacitores conectados en serie ($N_{c.S}$). La tensión nominal del paquete de supercapacitores para conectar en paralelo con las baterías como menciona (Grün et al., 2018) es necesario que coincida con el rango de voltaje nominal del sistema y de la batería por lo que se tomara en cuenta el voltaje nominal del sistema fotovoltaico.

$$N_{c.S} = \frac{V_N}{V_c} \quad (20)$$

La ecuación 20 calculará el número de supercapacitores necesarios para obtener el voltaje nominal del sistema donde:

V_N : Voltaje nominal del sistema.

V_c : Voltaje nominal del supercapacitor.

2.6.2.2. Resistencia del banco de supercapacitores (R_c). Debido a que esta topología no estará acoplada a ningún dispositivo que controle los sistemas de acumulación (Seim, 2012) será necesario que la resistencia interna del grupo de supercapacitores sea menor a la resistencia interna del grupo de baterías. La resistencia interna del grupo de supercapacitores será menor según el supercapacitor seleccionado o por el número de ramas conectadas en paralelo (Grün et al., 2018). Debido a que la descarga inicial estará relacionada directamente con las resistencias internas en cuanto menor sea la resistencia interna del supercapacitor en comparación a la de la batería mayor será el aporte del supercapacitor actuando como buffer durante la descarga de la batería además de mejorar la calidad de energía en las cargas.

$$R_b > R_c = \frac{N_{c.S}}{N_{c.P}} * R_c \quad (21)$$

La ecuación 21 calculará la resistencia total del supercapacitor además de cumplir la relación de la resistencia del banco de baterías y el banco de supercapacitores donde:

R_b : Resistencia interna del banco de baterías.

$N_{c,S}$: Número de supercapacitores en serie.

$N_{c,P}$: Número de ramas de supercapacitores en paralelo.

R_c : Resistencia del supercapacitor.

2.6.2.3. Capacidad total de los supercapacitores (C). Entre mayor sea la capacitancia del supercapacitor podrá suministrar por mayor tiempo durante la descarga, pero tendrá un tiempo de carga mayor.

$$C = N_{c,P} * C_{c,P} \quad (22)$$

La ecuación 22 calculará la capacitancia total del banco de supercapacitores en función del número de supercapacitores en serie y de las ramas en paralelo y la capacitancia nominal del supercapacitor dónde:

$N_{c,P}$: Número de ramas de supercapacitores en paralelo.

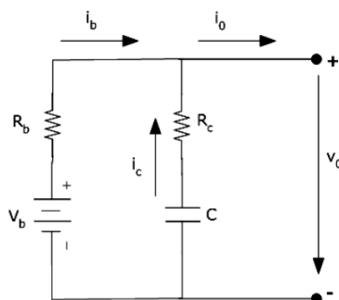
$C_{c,P}$: Capacitancia de la rama en paralelo.

2.7. Modelo matemático de un HESS en una topología pasiva

En esta sección consideraremos la topología híbrida pasiva, conectando los supercapacitores en paralelo con la batería. Para (Seim, 2012) al modelar el comportamiento del sistema de almacenamiento pasivo fue necesario realizar un análisis detallado de las propiedades eléctricas del sistema. Comenzando por el circuito equivalente simplificado, es posible encontrar un modelo matemático que describa el sistema eléctrico de los acumuladores.

Figura 15

Circuito equivalente simplificado

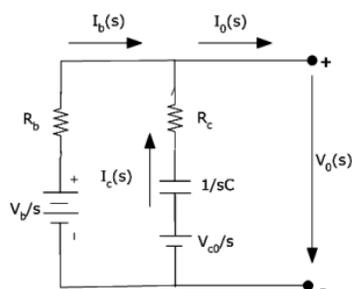


Nota. Representa el circuito equivalente del sistema de almacenamiento híbrido pasivo. Tomado de (Seim, 2012).

Para el análisis conviene transformar el circuito en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada de Laplace. El circuito transformado se muestra en la figura 16, generalmente la corriente i_c que fluye a través de un supercapacitor, se puede transformar en el dominio de la frecuencia dado un voltaje inicial al supercapacitor V_0 :

Figura 16

Circuito en dominio de la frecuencia



Nota. Representa el circuito equivalente del sistema de almacenamiento híbrido pasivo en el dominio de la frecuencia. Tomado de (Seim, 2012).

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \rightarrow I_c(s) = sCV_c(s) - CV_{c0} \rightarrow V(s) = \frac{I_c(s)}{sC} + \frac{V_{c0}}{s} \quad (23)$$

Es decir, un supercapacitor cargado con condiciones iniciales distintas de cero puede ser reemplazado en el dominio de la frecuencia por un supercapacitor

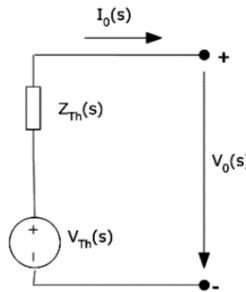
descargado en serie con una fuente de voltaje de función escalonada con amplitud V_{c0} . Las corrientes y tensiones de la batería y del supercondensador se puede encontrar usando las reglas de voltaje y corriente de Kirchoff:

$$I_0(s) = I_c(s) + I_b(s) \quad (24)$$

$$V_0(s) = \frac{V_{c0}}{s} + I_c(s)R_c + I_c(s)\frac{1}{sC} = \frac{V_b}{s} + I_b(s)R_b \quad (25)$$

Figura 17

Circuito equivalente Thévenin



Nota. Representa el circuito equivalente Thévenin del sistema de almacenamiento híbrido pasivo. Tomado de (Seim, 2012).

Para describir el voltaje de la carga a la salida, V_0 , en términos de los elementos del circuito, se debe derivar el circuito equivalente Thévenin. La salida de voltaje en el dominio de la frecuencia, $V_0(s)$, se puede encontrar analizando el circuito en condición de circuito abierto. Entonces la corriente $I(s) = I_c(s) = I_b(s)$ circula en un lazo cerrado de modo que de acuerdo con la figura 16.

$$\frac{V_b(s)}{s} - I(s)R_b - I(s)R_c - I\frac{1}{sC} - \frac{V_{c0}}{s} = 0 \quad (26)$$

$$I(s) = \frac{V_b - V_{c0}}{\left(R_b + R_c + \frac{1}{sC}\right)s} \quad (27)$$

Entonces, el voltaje equivalente de Thévenin, $V_{TH}(s)$, se puede obtener:

$$V_{TH}(s) = \frac{V_{c0}}{s} + I(s)R_c + I(s)\frac{1}{sC} \quad (28)$$

Sustituyendo las anteriores ecuaciones:

$$V_{TH}(s) = \frac{V_b - V_{c0}}{(R_b + R_c + \frac{1}{sC})s} + (R_c + \frac{1}{sC}) + \frac{V_{c0}}{s} \quad (29)$$

que se puede simplificar a:

$$V_{TH}(s) = V_b \frac{R_c}{R_b + R_c} \frac{s + \alpha}{s(s + \beta)} + V_{c0} \frac{R_b}{R_b + R_c} \frac{1}{s + \beta} \quad (30)$$

donde $\alpha = \frac{1}{R_c + C}$ y $\beta = \frac{1}{(R_b + R_c)C}$. La impedancia equivalente de Thévenin puede

determinarse mediante un cortocircuito de las fuentes de tensión:

$$Z_{Th}(s) = (R_c + \frac{1}{sC}) \parallel R_b = \frac{(R_c + \frac{1}{sC})R_b}{R_b + R_c + \frac{1}{sC}} = \frac{R_c R_b}{R_b + R_c} \frac{s + \alpha}{s + \beta} \quad (31)$$

Es posible transformar $V_{TH}(s)$ de nuevo en el dominio del tiempo, $L^{-1}\{V_{TH}(s)\}$.

$$V_{TH}(t) = V_b + \frac{R_b}{R_b + R_c} (V_{c0} - V_b) e^{-\beta t} \quad (32)$$

Una carga real $I_0(s)$ podría ser de cualquier forma. Sin embargo, muchos sistemas de energía poseen características de perfiles de carga comunes, descritas por una relación pico a promedio según los requerimientos de energía. Dichas cargas se pueden representar mediante perfiles de tren de pulsos, donde la carga cambia repentinamente de un nivel a otro con una frecuencia determinada y ciclo de trabajo. Una carga cuadrada pulsada ideal es conveniente, ya que esto simplifica el análisis y nos permite capturar las características fundamentales y el comportamiento de un sistema eléctrico. La corriente de carga pulsada con período T y relación de trabajo de pulso D puede expresarse para los primeros N pulsos como:

$$i_0(t) = I_0 \sum_{k=0}^{N-1} [\psi(t - kT) - \psi(t - (k + D)T)] \quad (33)$$

Aquí está $I_0(s)$ la amplitud de la corriente y $\psi(t)$ el paso unitario no desplazado función. En el dominio de la frecuencia esto se transforma en:

$$I_0(s) = I_0 \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{e^{-kTs}}{s} - \frac{e^{-(k+D)Ts}}{s} \right] \quad (34)$$

El valor promedio de la corriente de carga es simplemente la amplitud de la carga multiplicada por la relación de trabajo, $I_L = DI_0$. Para la forma de carga dada, la caída de voltaje interna $V_i(s)$ viene dada por:

$$V_i(s) = Z_{Th} I_0(s) \quad (35)$$

Después de realizar una transformada inversa de Laplace obtenemos:

$$v_i(t) = R_b I_0 \sum_{k=0}^{N-1} \left[\left(1 - \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-kT)} \right) \psi(t - kT) - \left(1 - \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-(k+D)T)} \right) \psi(t - (k+D)T) \right] \quad (36)$$

De la figura 17 en el equivalente Thévenin podemos ver que la tensión de salida viene dada por: $V_0(s) = V_{TH}(s) - V_i(s)$, que en el dominio del tiempo se convierte en:

$$v_0(t) = v_{TH}(t) - v_i(t) \quad (37)$$

Además, se obtienen las corrientes de la batería y el supercondensador usando $v_0(t)$:

$$i_b(t) = \frac{1}{R_b} [V_b - v_0(t)] \quad (38)$$

$$i_c(t) = i_0(t) - i_b(t) \quad (39)$$

2.7.1. Corriente en estado estable

El sistema híbrido alcanza el estado estable cuando el voltaje del supercondensador es igual al voltaje de la batería, $V_{0c} = V_b$. Al combinar las anteriores ecuaciones, da la corriente de la batería en condiciones de estado estable:

$$i_{b,ss}(t) = I_0 \sum_{k=0}^{N-1} \left[\left(1 - \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-kT)} \right) \psi(t - kT) - \left(1 - \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-(k+D)T)} \right) \psi(t - (k+D)T) \right] \quad (40)$$

Además, se combinarán las anteriores ecuaciones:

$$i_{c,ss}(t) = \frac{R_b I_0}{R_b + R_c} \sum_{k=0}^{N-1} \left[(e^{-\beta(t-kT)}) \psi(t - kT) - (e^{-\beta(t-(k+D)T)}) \psi(t - (k+D)T) \right] \quad (41)$$

La interacción entre carga aplicado cuando $k = 0$, se puede ver en la ecuación que en el momento en que se aplica la carga de pulso en $t = 0$, la corriente de la batería será:

$$i_{b,ss}(0) = I_0 - \frac{R_b I_0}{R_b + R_c} \quad (42)$$

La corriente en el supercapacitor será:

$$i_{c,ss}(0) = \frac{R_b I_0}{R_b + R_c} \quad (43)$$

2.8. Requerimientos del sistema

Las siguientes condiciones ayudarán a verificar que el sistema sea adecuado (Zhang et al., 2015).

La energía requerida para el proceso de descarga debe ser menor que la suma de la capacidad energética de las baterías y supercapacitores. Para la carga la suma de la capacidad energética de las baterías y supercapacitores deberá ser menor que la capacidad energética del panel solar.

$$E_{requerida.D} \leq E_b + E_c \quad (44)$$

$$E_{requerida.C} \geq E_b + E_c \quad (45)$$

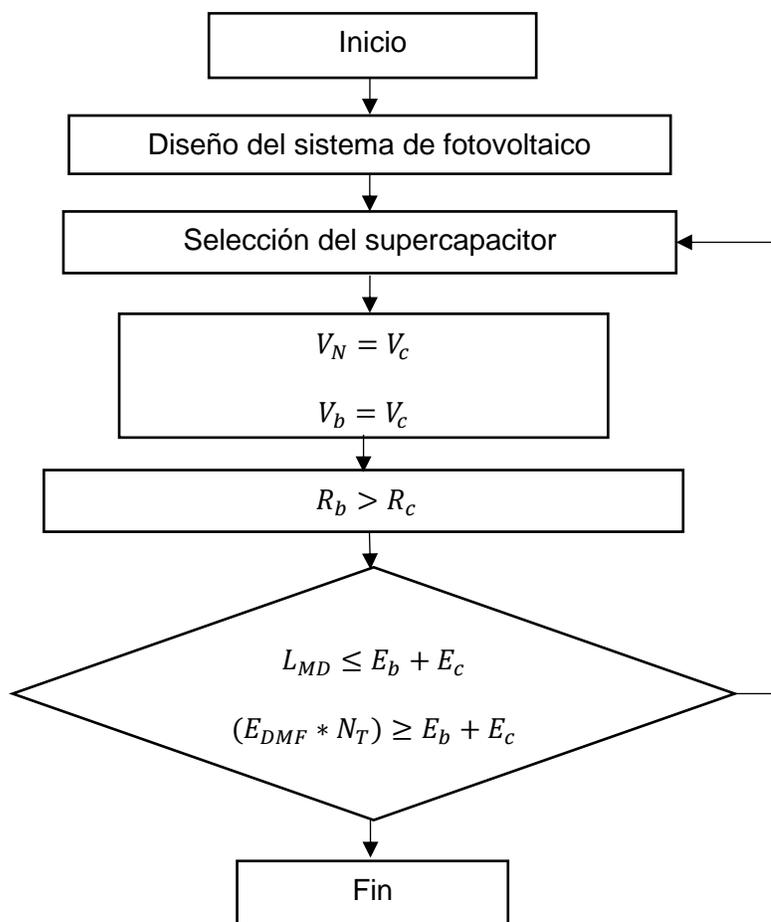
El trabajo realizado por (Smith et al., 2002) tiene otras consideraciones muy importantes que deberán ser tomadas en cuenta al conectar supercapacitores en serie.

La consideración de utilizar resistencias de equilibrio como primera opción ya que ayudará cuando se coloque supercapacitores en serie permitiendo mantener el equilibrio de voltaje entre los supercapacitores. La segunda opción es utilizar una celda de supercapacitores elaboradas por un fabricante el cual garantice una alta confiabilidad.

Después de revisar todas las ecuaciones se presenta el esquema para realizar el diseño del sistema de almacenamiento híbrido pasivo.

Figura 18

Esquema para el diseño de un HESS en una topología pasiva para sistemas fotovoltaicos aislados



Nota. Diagrama de los requerimientos que se deberá tomar en cuenta para el diseño del módulo fotovoltaico aislado con un almacenamiento híbrido pasivo.

2.9. Hipótesis

¿El diseño e implementación de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo basado en baterías - supercondensadores en plantas fotovoltaicas aisladas permitirá superar el problema cuando la batería suministra corriente pico a una alta demanda, actuando como un búfer al aliviar la batería de las demandas de alta potencia?

2.10. Variables de la investigación

2.10.1. Variable independiente

Diseñar e implementar un módulo didáctico de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo.

2.10.2. Variable dependiente

Los sistemas de almacenamiento híbrido pasivo permiten superar el problema cuando la batería suministra corriente pico de una alta demanda o de demandas de alta potencia.

Capítulo III

3. Metodología

3.1. Antecedentes de la investigación

El progreso en los sistemas de almacenamiento de energía ha obtenido avances a medida que se incrementan los requerimientos de energía para cargas móviles. Las ciencias aplicadas actuales de acumulación de energía proporcionan grandes densidades de potencia o grandes densidades de energía. Por supuesto es necesario encontrar aspectos adicionales como lo son costo, peso, ciclo de vida además de garantizar seguridad de la tecnología implementada. En la actualidad las baterías de iones de litio son ampliamente utilizadas dentro de las energías renovables además de los dispositivos móviles ya que disponen de una gran capacidad de almacenamiento, el declive de esta tecnología se debe a varios factores como lo son los ciclos de vida cortos por las altas corrientes de carga o descarga (Ning et al., 2003). Únicamente los supercapacitores son capaces de tener un ciclo de vida prolongado además logran soportar corrientes altas durante la carga y descarga, pero no pueden almacenar grandes cantidades de energía (Seim, 2012).

Dentro de las topologías ya revisadas la topología pasiva presenta ventajas frente a las demás topologías como lo son la semiactiva y la activa debido a que no se encuentran acoplados a dispositivos de electrónica de potencia teniendo una mayor eficiencia este sistema optimiza la vida útil de la batería además estos sistemas son más sencillos de llevar a cabo y menos costosos.

El estudio realizado por (Ma et al., 2015) realizó una simulación la cual ayudó a comprender el sistema de almacenamiento híbrido pasivo basado en baterías y supercapacitores el modelo fue realizado en Matlab/Simulink en el estudio se planteó mediante un análisis teórico y una simulación. Se observó y verificó que la batería

gestionará la energía a largo plazo mientras que el supercapacitor será para una regulación dinámica y rápida de energía.

La hibridación de los sistemas de acumulación como lo es el almacenamiento híbrido pasivo basado en supercapacitores y baterías conectadas directamente en paralelo entre estos dos sistemas a la barra DC será necesario considerar en el diseño el nivel de voltaje y la resistencia interna de cada una de las tecnologías conectadas. Por consiguiente, el voltaje nominal del sistema híbrido se verá restringido por el nivel de voltaje de los demás dispositivos (Grün et al., 2018).

En el artículo publicado por (Fahmi et al., 2015) presentó la implementación de un sistema fotovoltaico aislado con un sistema de almacenamiento híbrido pasivo este sistema se llevó a cabo en la Universidad de Nottingham en Malasia teniendo resultados alentadores ya que la hibridación ayudó a la dificultad que tuvieron las baterías al suministrar corriente pico durante las altas demandas. Los supercondensadores actuaron como un buffer ya que aligeraron las demandas de potencia que debía afrontar la batería. El sistema implementado tiene una potencia instalada de 2 kW.

El proyecto realizado por (Echever & Naranjo, 2016) implementó un módulo didáctico de generación fotovoltaica con conexión a red para el laboratorio de la Universidad. El módulo tiene una potencia instalada de 230 W el cual cuenta con un sistema de monitoreo registrando las magnitudes de voltaje potencia y frecuencia del sistema permitiendo gestionar los recursos energéticos. Además, dispone de un sensor de radiación solar observando la disponibilidad de la energía proveniente del sol.

La virtud de llevar a cabo la hibridación de los sistemas de almacenamiento de energía en una topología pasiva radica en que permitirá aumentar la densidad de potencia del sistema (Grün et al., 2018). Las aplicaciones de HESS pasivo como ya se mencionó anteriormente fue implementado en un sistema fotovoltaico aislado para

aumentar los ciclos de vida de las baterías aligerando los picos de demanda, además de su aplicación en vehículos eléctricos.

El estudio experimental realizado por (Smith et al., 2002) se implementó un conjunto de cinco baterías de litio de 3.6 V con una capacidad de 600 mAH conectadas en paralelo a capacitores de 380 mF y 80 m ohms donde se ejecutaron 6 pruebas 3 con el capacitor y 3 sin el capacitor se obtuvieron resultados positivos ya que se extendió la duración durante la descarga un 14 % más al utilizar capacitores, del mismo modo se extendió el voltaje en un 305 % a 3.5 V y un 33 % a 3.3 V. Todas estas descargas fueron realizadas a una corriente de 2 A.

3.2. Modalidad de la investigación

Para delimitar el actual proyecto se establece hacer el uso de las categorías de investigación las cuales ayuden a conseguir excelentes resultados para diseñar e implementar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía para el laboratorio de Energías Renovables, se comenzó con una investigación bibliográfica y de una simulación para poder comprender a los sistemas de almacenamiento híbrido, para determinar los requisitos imprescindibles para el diseño y posteriormente la implementación del módulo. Lo cual nos permitirá alcanzar los objetivos planteados.

3.3. Tipo de investigación

3.3.1. Investigación bibliográfica

El proyecto a realizar comienza con la búsqueda y recopilación del fundamento teórico desde un punto de vista de la hibridación de los sistemas de almacenamiento de energía en una topología pasiva para sistemas fotovoltaicos aislados, el cual se investigará y estará sustentado en libros, tesis y artículos científicos con la finalidad de comprender el comportamiento y los requisitos para un funcionamiento adecuado para el desarrollo de un método de diseño e implementación de un módulo didáctico de

generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía pasivo dentro del laboratorio de Energías Renovables de la Universidad.

3.3.2. Campo de investigación

Esta investigación se encuentra dentro del área de Energías Renovables el proyecto se desarrolló en la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE en el campus Belisario Quevedo el cual cuenta con el laboratorio de Energías Renovables en donde se realizarán todas las pruebas ya que posee los instrumentos necesarios además del espacio adecuado. Se realizó el estudio de almacenadores de energía con un enfoque en los HESS en una topología pasiva para sistemas fotovoltaicos autónomos.

3.3.3. Despliegue de la función de la calidad (QFD)

El empleo de la casa de la calidad para la elaboración de este proyecto, garantizará cumplir con los requerimientos del laboratorio (usuario), por consiguiente, se realizará la recopilación de información de los requisitos y exigencias del laboratorio para comenzar con el diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía para asegurar el desempeño, seguridad, confiabilidad y durabilidad del proyecto realizado. Se reconocerán las características de los equipos que se utilizan en las prácticas del laboratorio y los módulos didácticos de energías renovables disponibles en el mercado para así satisfacer y cumplir con las expectativas del laboratorio.

3.4. Diseño de la investigación

El proyecto está orientado en el diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con un almacenamiento híbrido de energía para el laboratorio de Energías Renovables, se ha tomado como cargas las que se utilizan dentro de los trabajos en el laboratorio y un tiempo estimado para la práctica para así cuantificar la demanda de energía que requerirá el módulo didáctico para llevar a cabo la práctica y así poder dimensionar los equipos del módulo como el panel fotovoltaico,

regulador de carga, sistemas de almacenamiento además del inversor y los requerimientos necesarios para conectar en paralelo el supercapacitor con la batería a la misma barra DC para que pueda tener una correcta interacción entre los dos sistemas de almacenamiento y cubrir las demandas de carga que se ocupan en las prácticas del laboratorio.

3.5. Nivel de la investigación

3.5.1. Exploratoria

Para iniciar el diseño se deberá revisar las cargas utilizadas y el tiempo disponible para realizar la práctica de laboratorio además de la irradiación del lugar de la instalación. Es importante investigar las consideraciones que se deberán tener en cuenta al conectar en paralelo los sistemas de almacenamiento de energía de forma pasiva como la batería y el supercapacitor. Esta información nos permitirá realizar un módulo fotovoltaico aislado con HESS pasivo confiable y seguro.

3.5.2. Descriptiva

En este nivel se determinará el planteamiento de la hipótesis que se abordó en el anterior nivel de investigación para poder definir el desarrollo del proyecto como el diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con un almacenamiento híbrido de energía para el laboratorio de Energías Renovables. Para cuantificar durante la descarga, el aporte máximo de corriente del supercapacitor y la energía entregada a la demanda.

3.5.3. Investigación explícita

En este nivel se buscará estudiar y entender los sistemas de HESS pasivo implementados en sistemas fotovoltaicos aislados para encontrar los beneficios que tendrá utilizar un HESS pasivo, Por lo tanto, se deben medir las variables eléctricas con el fin de cumplir los objetivos y así determinar las ventajas que ofrece instalar un HESS pasivo en sistemas fotovoltaicos autónomos entendiendo su comportamiento. Se

realizará un estudio previo el cual consiste en simular el módulo del proyecto a implementar para así determinar las variables eléctricas afectadas al conectar un supercapacitor con una batería en paralelo, determinando que la instalación de un HESS pasivo ayudará a mejorar la calidad de energía.

3.6. Población y muestra

En la tabla 6 se expone una serie de preguntas las cuales ayudarán para que el proyecto se desarrolle de la mejor manera.

Tabla 6

Preguntas

N	Preguntas	Respuestas
1	Para que	Para observar la interacción entre la batería y el supercapacitor
2	De qué personas u objetos	Sistema de almacenamiento de energía híbrido pasivo
3	Sobre qué aspecto	Obtención y visualización de variables
4	Quien Quienes	Investigadores, estudiantes
5	Cuando	2021
6	Donde	Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga
7	Cuántas veces	Una
8	Qué técnicas	Mediciones
9	Con que	Instrumentos de medición
10	En qué situación	Condiciones nominales de las cargas

Nota. Se responde las preguntas para la realización del proyecto, ayudará a que se ejecute de una mejor manera.

3.7. Técnicas de recolección de datos

3.7.1. Observación en laboratorio

Por medio de la observación se logrará identificar la información relevante para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. La observación ayudará obtener los datos necesarios para no generar ningún inconveniente permitiendo proponer un planteamiento de trabajo. Recolectando la información con el apoyo de inspecciones de campo se plantean las características indispensables para el diseño e implementación del módulo fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía.

3.7.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados para la obtención de información y análisis de datos de los parámetros almacenamiento híbrido pasivo basado en baterías y en supercapacitores en módulos fotovoltaicos autónomos será capturar y registrar los datos durante las pruebas carga-descarga para comprender el comportamiento de las variables eléctricas de la batería y el supercapacitor.

3.7.3. Técnica de análisis de datos

Después se realizará el análisis de los datos obtenidos haciendo uso de los siguientes criterios:

- Observación durante las pruebas y en los equipos.
- Captura de datos.
- Análisis de datos.
- Interpretación de datos.

3.7.4. Técnicas de comprobación de hipótesis

Con la ayuda de los datos obtenidos será necesario el uso de las siguientes técnicas:

- Interpretación de resultados.

- Comprobación de la hipótesis.
- Determinación de las conclusiones y recomendaciones según los objetivos ya planteados.

Capítulo IV

4. Análisis de los resultados de la investigación

A partir de las distintas metodologías empleadas con el fin de cumplir con los objetivos planteados, dentro de este capítulo se expone el análisis de la investigación para poder ejecutar el del diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido para el laboratorio de Energías Renovables, considerando todos los puntos expuestos en el anterior capítulo.

Las desventajas de los sistemas de energías renovables es el costo a más de la estabilidad de energía. La acumulación de energía en sistemas de almacenamiento resuelve la intermitencia de los sistemas de energías renovables, el beneficio más importante es apoyar al sistema cuando no esté disponible la energía primaria para satisfacer de forma continua las demandas.

La instalación de un sistema fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva basado en baterías y supercapacitores como menciona (Erhan et al., 2014) deberá resolver los requisitos de una alta demanda de corriente transitoria gestionando las altas descargas el supercapacitor. Por lo que las baterías en el sistema de almacenamiento híbrido no estarán expuestas a un estrés eléctrico durante las altas descargas de energía actuando el supercapacitor como un buffer.

Por otra parte (Grün et al., 2018) señala que una conexión en paralelo de las baterías y supercapacitores acopladas directamente a la barra DC es muy interesante debido a que se podrá mejorar la densidad de potencia proporcionada por el supercapacitor y densidad de energía proporcionada por la batería, comparado al utilizar solo uno de estos sistemas de almacenamiento de forma separada.

Por lo tanto, este capítulo se centrará en el análisis de resultados del sistema de almacenamiento de energía híbrido pasivo basado en las baterías y supercapacitores en sistemas fotovoltaicos autónomos, este estudio se llevará a cabo en Matlab/Simulink

con los modelos que se encuentran dentro de la librería tanto los sistemas de almacenamiento como el panel fotovoltaico. La simulación ayudará a comprobar las ventajas que ofrecen los HESS en una topología pasiva, dado que el objetivo planteado de este proyecto será la implementación del sistema híbrido pasivo para lograr superar el problema cuando la batería suministra corriente pico frente a una alta demanda, se empleó la simulación para entender el HESS pasivo permitiendo observar un comportamiento que se aproximará al que se ejecutará en este proyecto.

4.1. Análisis de resultados

Se realizaron dos simulaciones bajo dos configuraciones las cuales son: el almacenamiento de un sistema solo con batería (BAS) y un sistema de almacenamiento de energía híbrido en una topología pasiva, estas configuraciones se las conectó a un panel fotovoltaico.

4.1.1. Simulación del sistema fotovoltaico aislado

En la simulación se utilizaron los modelos de MatLab/Simulink tanto para la batería, supercapacitor y panel fotovoltaico donde se simularon bajo tres estados el primer estado será simular la carga de los sistemas de almacenamiento por medio del panel fotovoltaico bajo una radiación de 1000 W/m^2 el segundo estado será simular el comportamiento de los sistemas de acumulación al estar conectados en la misma barra el tercer estado es la descarga de los sistemas de almacenamiento la descarga será bajo una corriente constante de 4.2 A.

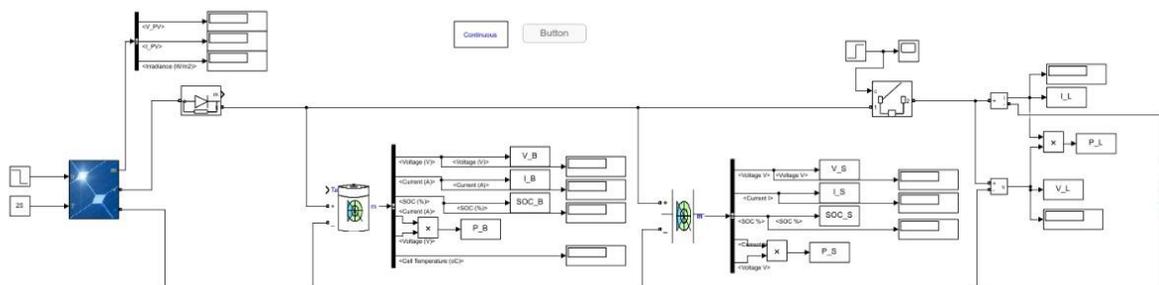
Para esta simulación se utilizó los siguientes equipos: el panel fotovoltaico de 230 W a 12 V el cual estará entregando una corriente máxima de 11.99 A a los sistemas de almacenamiento durante la carga, la batería utilizada es de 55 Ah a 12 V con una resistencia interna de 7.5 m ohms, el supercapacitor utilizado en la simulación es de 500 F con un voltaje nominal de 12V con una resistencia interna de 1.7 m ohms. Las condiciones simuladas como ya se mencionó son tres estados cada uno de ellos durará

dos minutos. Los SOC de los dispositivos de acumulación son 77.95 % para la batería y el 115 % para el supercapacitor (16.2 V voltaje máximo del supercapacitor).

La figura 19 indica el circuito en el que se realizaron las dos simulaciones.

Figura 19

Esquema del circuito a simular en MatLab/Simulink



Nota. Tanto el panel como los acumuladores de energía y carga fueron tomados de la librería de MatLab/Simulink. Para la simulación del BAS se desconectó el supercapacitor.

4.1.2. Implementando un BAS

El análisis de la figura 20 se llevó a cabo de la siguiente forma.

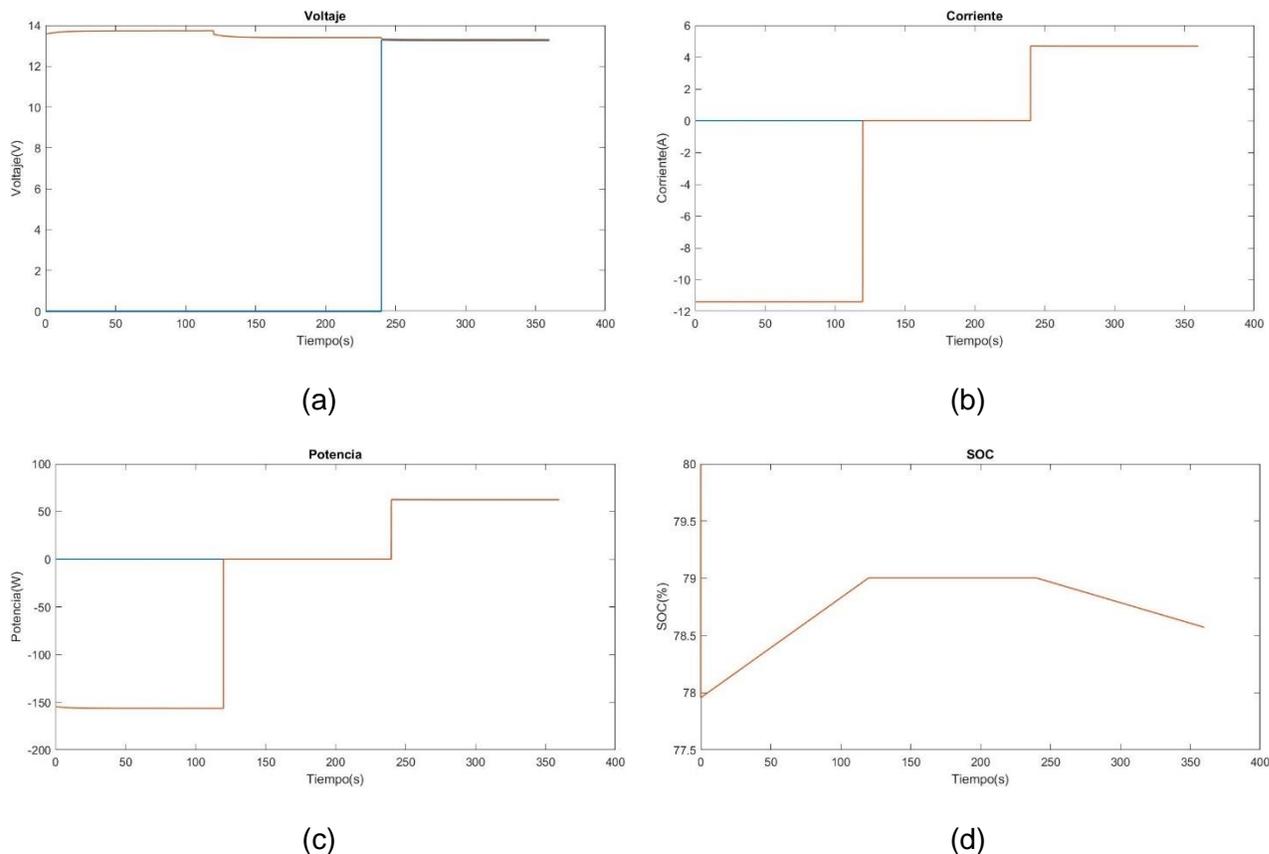
En el primer estado se observó que la batería estará siendo cargada por el panel fotovoltaico a una corriente de 11.99 A.

El segundo estado se determinó que la batería está en reposo el voltaje se ve afectado ya que la irradiación es 0 W/m².

El tercer estado mostró la descarga de la batería a una corriente constante teniendo que afrontar la batería por si sola la descarga llegando tener un estado de carga final de 78.57 %.

Figura 20

Simulación del sistema fotovoltaico autónomo con un BAS



Nota. En el gráfico se muestra cuatro gráficas la figura 20 (a) representa el voltaje en la batería y la carga; la figura 20 (b) representa la corriente en la batería y la carga; la figura 20 (c) representa la potencia en la batería y en la carga y la figura 20 (d) representa el estado de carga de la batería. La línea naranja representa la batería y la carga está representada por la línea azul.

4.1.3. Implementando un HESS Pasivo

El análisis de la figura 21 se llevó a cabo de la siguiente forma.

En el primer estado se observó que el supercapacitor estará cediendo carga a la batería durante unos segundos para igualar los voltajes en los almacenamientos, más adelante la batería se cargó a través del panel fotovoltaico a una corriente de 11.99 A

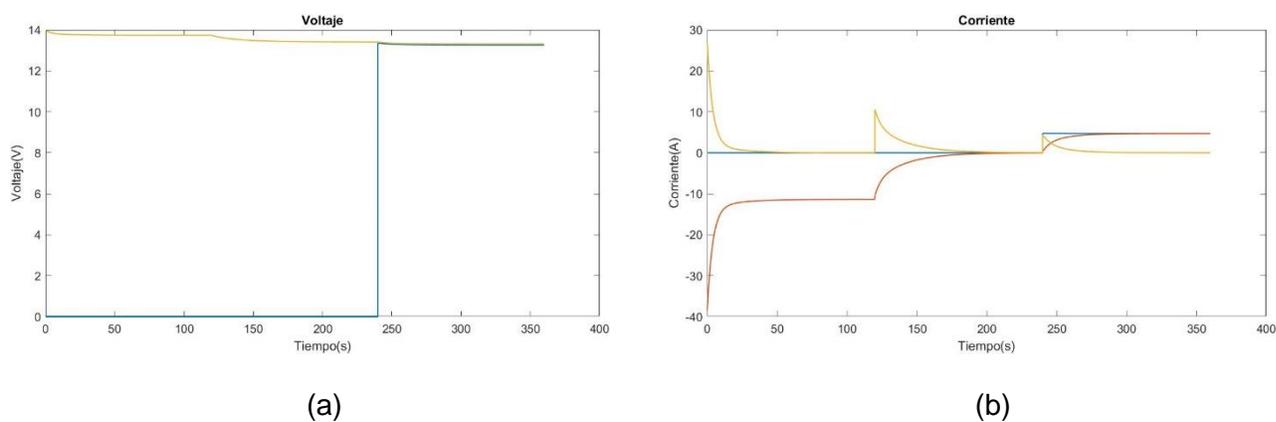
ya que el supercapacitor al estar conectado de manera directa con la batería se vio restringido por el voltaje de la batería por tanto no demandará corriente para ser cargado. La disposición final del estado de carga de los sistemas de almacenamiento fue de 114.27 % para el supercapacitor y para la batería de 79.23 %.

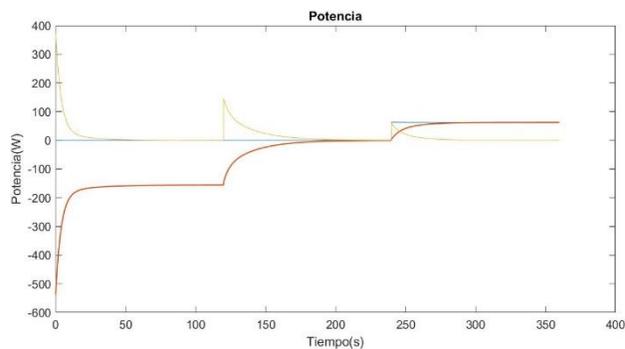
En el segundo estado se observó que al ser la irradiación de 0 W/m^2 el supercapacitor comenzó a ceder carga a la batería nuevamente con una corriente pico de 10.14 A de igual forma por unos segundos. Los voltajes de los sistemas de acumulación se estabilizaron a 13.40 V.

En el tercer estado se reconoció que el supercapacitor actuó como un buffer de energía para reducir el estrés en la batería durante la descarga ya que si no fuese por el supercapacitor la batería tendrá que afrontar toda la corriente demandada por la carga como ya se observó en la simulación del BAS. Al final de la simulación el SOC después de la descarga para el supercapacitor es 108.41% y para la batería será 78.84%.

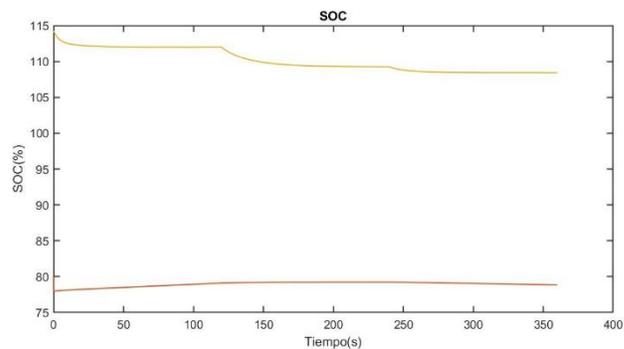
Figura 21

Simulación del sistema fotovoltaico autónomo con un HESS pasivo





(c)



(d)

Nota. En el gráfico se muestra cuatro gráficas la figura 21 (a) representa el voltaje en la batería, supercapacitor y la carga; la figura 21 (b) representa la corriente en la batería, supercapacitor y la carga; la figura 21 (c) representa la potencia en la batería, supercapacitor y en la carga y la figura 21 (d) representa el estado de carga de la batería y el supercapacitor. La línea naranja representa la batería, el supercapacitor está representado por la línea amarilla y la carga está representada por la línea azul.

4.1.4. Análisis de la simulación

El objetivo principal de esta simulación era ver el comportamiento de implementar un sistema de almacenamiento híbrido de energía en sistemas solares aislados para observar los beneficios que tiene esta conexión frente al utilizar el almacenamiento tradicional (BAS).

El análisis de la simulación demuestra que el almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva ayudará a tener un mejor almacenamiento de energía. Actuando la batería para las descargas de larga duración en el HESS pasivo y el supercapacitor como un almacenamiento auxiliar para amortiguar las corrientes de las altas demandas durante un corto tiempo aliviando a la batería de las altas descargas.

4.2. Casa de la calidad

Para el desarrollo del módulo didáctico fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido pasivo se establecerá una matriz que estará constituida para la elaboración del módulo didáctico como para la selección de componentes, instrumentos de medida y construcción del módulo. Para satisfacer la exigencia con la voz del usuario (laboratorio) y los requerimientos con la voz del ingeniero lo cual estará satisfaciendo las características técnicas demandadas

4.2.1. La voz del cliente

Esta área representará las demandas o requisitos que el cliente (laboratorio) exige que estén presentes en el diseño final del módulo.

4.2.2. La voz del ingeniero

Esta área representará los requerimientos o demandas del usuario (laboratorio) presentados en especificaciones técnicas que aportarán al desarrollo del módulo didáctico como un aporte del ingeniero.

4.2.3. Desarrollo de la matriz QFD

En esta matriz se presentan las demandas o requerimientos del usuario vinculadas con las necesidades técnicas para complacer al usuario. Para más adelante ser calificadas para verificar que el usuario ha quedado satisfecho frente a cada uno de los requerimientos planteados.

4.2.3.1. La voz del cliente en el desarrollo del módulo. Para complacer los requerimientos o demandas del usuario el módulo deberá tener las siguientes características:

- Para uso didáctico.
- De fácil montaje.
- Elementos que permitan evitar errores en la conexión.

- El módulo del proyecto se integre con los existentes en el laboratorio.
- Protección para los equipos.
- Medir las variables eléctricas del módulo didáctico.
- Interfaz gráfica minimalista.
- Fácil mantenimiento.
- La energía almacenada permita realizar la práctica.

4.2.3.2. La voz del ingeniero en el desarrollo del módulo. Los requerimientos o demandas del usuario presentados desde un punto de vista técnico mediante las siguientes características:

- Diseño ergonómico.
- Conexión sencilla entre elementos.
- Módulos con poka-yoke.
- Materiales de acuerdo a los módulos del laboratorio.
- Protecciones para los elementos del módulo didáctico.
- Instrumentos de medida para el módulo didáctico.
- Visualización de variables dentro de una aplicación.
- Los elementos se puedan encontrar en el mercado.
- Almacenamiento suficiente para realizar la práctica.

4.2.4. Conclusión de la matriz QFD

En base al desarrollo de la matriz se determinan las demandas o requisitos para cumplir con todas las características antes planteadas. Se detallan las características más importantes:

- Permitir un uso didáctico.
- Diseño modular.
- Conexiones para evitar polarizar de forma errónea.

- Seguridad para los equipos del módulo.
- Visualización de datos.
- Fácil manejo de los módulos.
- Disponibilidad de los equipos.
- De fácil mantenimiento para los equipos del módulo.
- Confiabilidad y fiabilidad del proceso.

4.2.5. Comprobación de la hipótesis

En base a la comprobación de la hipótesis del proyecto propuesto se conseguirá implementar la factibilidad del proyecto, para comprobar si el proyecto al ser ejecutado resulta ser factible.

4.2.5.1. Hipótesis nula. No es posible que un sistema de almacenamiento híbrido pasivo basado en baterías - supercondensadores en plantas fotovoltaicas aisladas permita superar el problema cuando la batería suministra corriente pico a una alta demanda.

4.2.5.2. Hipótesis alternativa. Es posible que un sistema de almacenamiento híbrido pasivo basado en baterías - supercondensadores en plantas fotovoltaicas aisladas permita superar el problema cuando la batería suministra corriente pico a una alta demanda.

4.2.6. Estadístico de la prueba

Para dar comienzo se procederá a definir las variables de la investigación como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7*Variables de la investigación*

Variables de la investigación	
Variable independiente	Diseñar e implementar un módulo didáctico de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo.
Variable dependiente	Los supercondensadores logran superar el problema cuando la batería suministra corriente pico de una alta demanda.

Nota. Se presentan las variables de la investigación del proyecto.

Después en la tabla 8 se representa en un cuestionario el cual muestra las variables ya presentadas.

Tabla 8*Cuestionario de las variables de la investigación*

Variables de la investigación	
Variable independiente	¿Existe un módulo didáctico de un sistema de almacenamiento híbrido pasivo?
Variable dependiente	¿Los supercondensadores lograrán superar el problema cuando la batería suministra una corriente pico de una alta demanda?

Nota. Se presenta el cuestionario de las variables de la investigación del proyecto.

Capítulo V

5. Propuesta

5.1. Tema de la propuesta

Diseño e implementación de un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía para el laboratorio de Energías Renovables.

5.2. Datos informativos

- **Nombre de la empresa:** Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.
- **Dirección:** Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Belisario Quevedo, Laboratorio de Energías Renovables.
- **Tipo de empresa:** Institución de Educación Superior.
- **Tamaño de empresa:** Gran empresa.

5.3. Beneficiarios

Los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga para realizar las prácticas que les permitirá comprender los sistemas de acumulación híbridos de energía en fuentes renovables, profundizar el proceso de enseñanza-aprendizaje y se amplíe la formación integral para el futuro profesional, dentro del campo se encuentra la energía solar fotovoltaica y los sistemas de almacenamiento.

5.4. Objetivos

5.4.1. *Objetivo General*

Diseñar e implementar un módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva para el laboratorio de Energías Renovables.

5.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar el módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva para uso didáctico, con rangos de potencia manejables dentro del laboratorio.
- Implementar el módulo didáctico de generación fotovoltaica aislado con un almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva basado en supercondensadores y baterías, que disponga de una interfaz de comunicación para obtener mediciones.
- Realizar pruebas para verificar el comportamiento de la batería implementando el sistema de almacenamiento híbrido pasivo durante la carga-descarga en el sistema de generación fotovoltaica utilizando cargas resistiva e inductiva.
- Evaluar la implementación del sistema híbrido pasivo para lograr superar el problema cuando la batería suministra corriente pico frente a una alta demanda, a través de una carga que demanda potencia de arranque.

5.5 Justificación del problema

La implementación del sistema de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía en una conexión pasiva permitirá desarrollar prácticas que ayuden a la enseñanza sobre los beneficios que tiene la combinación de supercapacitores y baterías, aumentando el aprendizaje sobre los sistemas de almacenamiento. Además de impulsar la investigación de los futuros profesionales sobre los sistemas de almacenamiento que podrían ser implementados dentro de las energías renovables.

5.6. Fundamentación de la propuesta

En el presente capítulo se expone la propuesta en la cual se especifica el dimensionamiento, selección e implementación de un sistema de generación

fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía basado en supercapacitores y baterías siendo los componentes principales:

- Panel solar.
- Regulador de carga.
- Baterías.
- Supercapacitor.
- Inversor.

Cuando exista la disponibilidad de energía procedente del sol, los paneles solares son los encargados de convertir en energía eléctrica a partir de la radiación solar, se conectarán al regulador de carga el cual se encargará de gestionar el proceso de carga de los sistemas de acumulación los cuales se conectarán a la salida del regulador de carga, los acumuladores son los encargados de almacenar energía para gestionar la energía almacenada durante la descarga. El regulador impedirá que los acumuladores reciban energía cuando alcance su carga máxima y evitará una sobre descarga de los almacenamientos. El sistema de almacenamiento híbrido de energía está basado en baterías y supercapacitores en una topología pasiva.

5.7. Diseño de la propuesta

5.7.1. Resumen

Se especifica el dimensionamiento además de la selección de equipos para el desarrollo del módulo didáctico.

5.7.1.1. Demanda de consumo de energía. Es necesario conocer el valor de consumo de energía de las cargas que se conectarán al módulo didáctico del laboratorio para poder iniciar con el diseño de la instalación.

5.7.1.2. Estandarización y selección de equipos. Analizando las demandas de carga a conectar en el módulo didáctico del proyecto se determina la potencia instalada

del módulo didáctico que a su vez establecerá los parámetros de los demás dispositivos en función a esta capacidad se calculará la cantidad de paneles solares necesarios, cantidad de baterías, supercapacitores, el regulador de carga para gestionar la energía de carga e los acumuladores de energía y el inversor de carga además de los dispositivos adecuados que servirán para la obtención de datos en los almacenamientos y conjunto solar.

5.7.1.3. Comunicación con la aplicación. El módulo fotovoltaico con almacenamiento híbrido de energía y la aplicación establecen comunicación vía bluetooth, usando una interfaz que podrá monitorear los dispositivos del módulo didáctico.

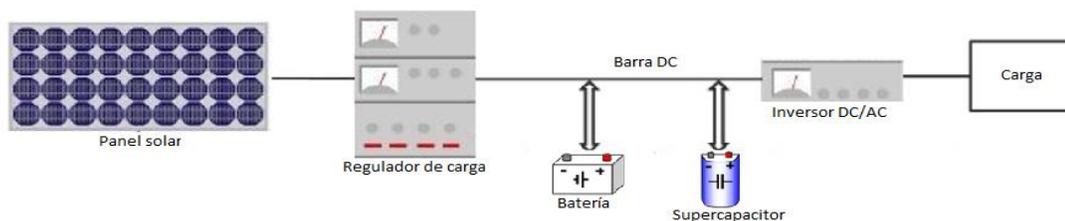
5.7.1.4. Resultado. Observación de datos de las mediciones del módulo didáctico para realizar un registro de las variables eléctricas en la batería y supercapacitor durante la carga y descarga.

5.8. Arquitectura del proyecto

En la figura 22 se exponen todos los componentes para el módulo didáctico de generación fotovoltaica aislada con almacenamiento híbrido de energía basado en baterías y supercapacitores, en una topología pasiva.

Figura 22

Esquema del proyecto



Nota. La figura representa la arquitectura del proyecto a implementar.

5.9. Requerimientos para la construcción del módulo

Los requerimientos para dimensionar el módulo didáctico con almacenamiento híbrido son principalmente variables eléctricas, una variable esencial será la energía que necesitarán las cargas para cada práctica durante el funcionamiento, además el panel solar deberá disponer de la energía suficiente para cargar los acumuladores. Este módulo no puede sobrepasar las potencias permitidas dentro del laboratorio de Energías Renovables de la Universidad, las potencias toleradas se manejan de acuerdo a la capacidad de medida de los instrumentos.

- Corriente (A): 0 – 7
- Voltaje (V AC): 0 – 240
- Potencia (W): 0 – 250

Considerando los parámetros expuestos anteriormente las cargas a conectar deberán funcionar correctamente. Se ha establecido como tiempo de uso promedio por práctica de laboratorio de 30 minutos (15 minutos con carga resistiva y 15 minutos con un motor) siendo un tiempo estimado para la práctica de 120 minutos (2 horas) con 4 grupos.

En la tabla 9 se indican las características de las cargas con las que se llevarán a cabo las prácticas en el laboratorio.

Tabla 9

Especificaciones de las demandas de energía para la práctica en el laboratorio

Tipo de carga	Potencia (W)	FP	Unidad	Voltaje (V)	Corriente (A)	Horas de funcionamiento (h/día)
Resistencia	144	1.00	1	120	1.2	1.0
Motor	150	0.62	1	120	1.9	1.0

Nota. Las cargas a utilizar se encuentran en el laboratorio de Energías Renovables.

5.10. Dimensionamiento y selección de los dispositivos

Para el dimensionamiento y selección de cada uno de los dispositivos que conforman el módulo fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía se consideró el método ya descrito anteriormente (Carta et al., 2012) además de los requerimientos y condiciones para conectar los sistemas de acumulación en una topología pasiva.

5.11. Procedimiento de cálculo

La energía necesaria para cada práctica a realizarse se calculará mediante las siguientes ecuaciones, las dos cargas se conectarán al inversor por tanto serán cargas AC.

5.11.1. Estimación del consumo ($L_{MD.AC}$)

La estimación de energía media diaria demandada por las cargas en corriente alterna se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$L_{MD.AC} = \sum \# Equipos * Horas * P_{Eq} \quad (5)$$

Resistencia de 100 ohms que se conectó en el módulo fotovoltaico aislado.

Equipos (#):1

Horas (h):1.00

P_{Eq1} (W): 144

Motor de 150 W que se conectó al módulo fotovoltaico aislado.

Equipos (#):1

Horas (h):1.00

P_{Eq2} (W): 150

Cálculo de la demanda de energía.

$$L_{MD.CA} = (1 * 1.0 h * 144 W) + (1 * 1.0 h * 150 W)$$

$$L_{MD.CA} = 294 Wh$$

5.11.2. Cálculo de la energía diaria media consumida (L_{MD})

La energía consumida por las cargas y los dispositivos del sistema fotovoltaico aislado, se tomó en cuenta las pérdidas que se producen dentro del sistema.

$$L_{MD} = \frac{L_{MD,CC} + \frac{L_{MD,CA}}{n_{INV}}}{n_{BAT} * n_C} \quad (6)$$

$L_{MD,CA}$ (Wh): 294

n_{INV} : 0.9

n_{BAT} : 0.85

n_C : 0.98

Cálculo de la energía diaria media consumida.

$$L_{MD} = \frac{\frac{294Wh}{0.9}}{0.8 * 0.9}$$

$$L_{MD} = 453.70 Wh$$

5.11.3. Determinación de la tensión nominal de la instalación (V_N)

Teniendo en cuenta las consideraciones de (Carta et al., 2012).

- 12 V para potencias inferiores a 1.5 kW.
- 24 V o 48 V para potencias superiores a 1.5 kW e inferiores a 5 kW.
- 48 V o 120 V para potencias superiores de 5 kW.

La tensión nominal del sistema será de 12 V este nivel de voltaje se fijó debido a que la energía media consumida calculada fue menor a 1.5 kW. La tensión nominal sirve para fijar el valor de los sistemas de acumulación, regulador, inversor y los paneles solares.

5.11.4. Estandarización de paneles solares

Los paneles fotovoltaicos disponibles se proponen en la tabla 10. Se seleccionará para obtener la energía necesaria para cargar los almacenamientos.

Tabla 10*Selección del panel solar para el módulo didáctico*

Selección del panel solar			
Modelo	ERA 100W 12V	CSUN 165-36M	RS7E-230M
Potencia máxima (W)	100	165	230
Tensión de trabajo (V)	12	12	12
Corriente de potencia máxima – Imp (A)	5.46	8.71	11.39
Tensión de potencia máxima – Vmpp (V)	18.3	18.95	20.39
Corriente de cortocircuito – Isc (A)	5.79	9.15	11.99
Tensión de circuito abierto – Voc (V)	22.7	22.35	24.10
Tecnología	Policristalino	Monocristalino	Monocristalino
Dimensiones (mm)	1 014x676x35	1 482x680x35	1 560x700x35

Nota. Los paneles presentados en la tabla 10 fueron seleccionados ya que se encuentran disponibles.

5.11.5. Dimensionamiento del generador fotovoltaico (E_{DMF})

El panel seleccionado para los siguientes cálculos será el panel 230 W con células monocristalinas ya que la ventaja sobre los expuestos es un mayor rendimiento y menor tamaño de emplazamiento.

El cálculo del generador fotovoltaico dependerá del regulador que se instalará para este proyecto será un MPPT. El valor de H_T se tomó del “Atlas Solar del Ecuador 2018” (CONELEC, 2018) para la provincia de Cotopaxi.

$$E_{DMF} = P_{MOD.STC} * HSP * PR \quad (8)$$

$$P_{MOD.STC} (W): 230$$

$$H_T (kWh/m^2 día): 3.82$$

$$PR: 0.8$$

Se cálculo la energía producida por el módulo.

$$E_{DMF} = 230 W * 3.82 kWh/m^2 día * 0.8$$

$$HSP = \frac{H_T}{1000}$$

$$HSP = \frac{3.82 \frac{kWh}{m^2 día}}{1000W \frac{W}{m^2}}$$

$$HSP = 3.82 h$$

$$E_{DMF} = 230 W * 3.82 h * 0.8$$

$$E_{DMF} = 702.88 Wh/día$$

Número de paneles necesarios (N_T). El número de módulos fotovoltaicos indispensables para cubrir la demanda de las cargas utilizadas durante la práctica será la energía diaria media consumida para la energía producida por el panel fotovoltaico.

$$N_T = \frac{L_{MD}}{E_{DMF}} \quad (9)$$

$$L_{MD} (Wh): 453.70$$

$$E_{DMF} (Wh): 702.88$$

Se calculó el número total de paneles fotovoltaicos necesarios para cubrir la demanda.

$$N_T = \frac{453.70 Wh}{702.88 Wh}$$

$$N_T = 0.65 \approx 1$$

Número de paneles en serie (N_S). El número de paneles fotovoltaicos conectados en serie se calculó de la tensión nominal de la instalación para la tensión del panel fotovoltaico en circuito abierto.

$$N_S = \frac{V_N}{V_{MOD.MPP} - 3 V} \quad (10)$$

$$V_N (V): 12$$

$V_{MOD.MPP}$ (V): 20.39

Se calculó el número de paneles conectados en serie.

$$N_S = \frac{12 V}{20.39 V - 3 V}$$

$$N_S = 0.69 \approx 1$$

Ramas de paneles conectados en paralelo (N_P). La cantidad de ramificaciones en paralelo del módulo fotovoltaico será el total de paneles dividido para el número de paneles conectados en serie.

$$N_P = \frac{N_T}{N_S} \quad (11)$$

N_T : 1

N_S : 1

Se calculó las ramas conectadas en paralelo.

$$N_P = \frac{1}{1}$$

$$N_P = 1$$

5.11.6. Cálculo del almacenamiento por baterías (C_D)

La capacidad nominal del almacenamiento de energía con el empleo de la profundidad máxima de descarga está dada por.

$$C_D = \frac{L_{MD}}{PD_D * V_N} \quad (12)$$

L_{MD} (Wh): 453.7

PD_D : 0.75

V_N (V): 12

Se calculó la capacidad del almacenamiento en función de la profundidad de descarga diaria

$$C_D = \frac{453.7 Wh}{0.75 * 12 V}$$

$$C_D = 50.41 \text{ Ah}$$

5.11.7. Estandarización de la batería solar

En la tabla 11 se presentan dos opciones para el almacenamiento de energía del módulo didáctico. La capacidad nominal de la batería deberá ser seleccionada tomando en cuenta el cálculo ya realizado se ha optado por las baterías de AGM. La capacidad seleccionada es la de C_{100} 55 Ah con un voltaje nominal de 12 V cumpliendo con la capacidad nominal calculada además del voltaje nominal del sistema.

Tabla 11

Selección de la batería

Selección de la batería		
Modelo	6-GFM(G)-55	6-GFM-50
Voltaje nominal (V)	12	12
Capacidad de la batería (C_{100} Ah)	55	50
Número de celdas (Celdas)	6	6
Peso de referencia (kg)	17	13.2
Resistencia interna (m ohms)	7.5	9.5
Número de ciclos de carga	1 200	500

Nota. Las baterías seleccionadas se encuentran disponibles localmente.

Cantidad de baterías en serie ($N_{b,s}$). El número de baterías conectadas en serie se calculó al dividir la tensión nominal de la instalación para la tensión nominal de la batería.

$$N_{b,s} = \frac{V_N}{V_b} \quad 13)$$

$$V_N (V): 12$$

$$V_b (V): 12$$

Se calculó el número de baterías conectadas en serie.

$$N_{b.S} = \frac{12 V}{12 V}$$

$$N_{b.S} = 1$$

Cantidad de baterías en paralelo ($N_{b.P}$). La cantidad de ramas conectadas en paralelo de baterías será la capacidad nominal dividido para la capacidad C_{100} de la batería.

$$N_{b.P} = \frac{C_N}{C_b} \tag{14}$$

$$C_N (Ah): 50.41$$

$$C_b (Ah): 55$$

Se calculó el número de ramas conectadas en paralelo.

$$N_{b.P} = \frac{50.41 Ah}{55 Ah}$$

$$N_{b.P} = 0.92 \approx 1$$

Cantidad de baterías total ($N_{b.T}$). El número de baterías indispensables para cubrir la demanda de las cargas utilizadas durante la práctica.

$$N_{b.T} = N_{b.S} * N_{b.P} \tag{15}$$

$$N_{b.S}: 1$$

$$N_{b.P}: 1$$

Se calculó el número total de baterías conectadas.

$$N_{b.T} = 1 * 1$$

$$N_{b.T} = 1$$

5.11.8. Estandarización del supercapacitor

En la tabla 12, se presentan supercapacitores para 2.7 V, 3 V y 12 V. Para el sistema a implementar una alternativa sería seleccionar 5 supercapacitores de 2.7 V y conectar en serie, con lo que se obtendría 13.5 V y 600 F.

El supercapacitor seleccionado será el de 12 V por ser un elemento modular y el cual tendrá que cumplir con las condiciones ya propuestas para una correcta interacción entre los dos sistemas de acumulación y las demandas de energía.

Como menciona (Chong et al., 2017) y (Zhang et al., 2015) para que se tenga un correcto diseño el HESS deberá cumplir con las ecuaciones de balance ya establecidas. Se requiere que el supercapacitor actúe como buffer durante la descarga permitiendo suavizar la corriente de descarga que deberá hacer la batería durante el arranque del motor o de la descarga en la resistencia.

Tabla 12

Selección del supercapacitor

Selección del supercapacitor			
Modelo	XL60-2R7308T-R	XT3585-3R0567-R	XLR-16R2507-R
Voltaje nominal (V)	2.7	3	12
Capacitancia (F)	3 000	555	500
ESR (m ohm)	0.2	2.6	1.7
Peso de referencia (kg)	0.59	0.108	4.,7
Número de ciclos de carga	100 000	100 000	100 000

Nota. Se presentó dos supercapacitores y una celda de supercapacitores teniendo la celda una ventaja clara, ya que posee reguladores para una carga uniforme en cada uno de los supercapacitores internos.

5.11.9. Dimensionamiento del almacenamiento por supercapacitores

Número de supercapacitores conectados en serie ($N_{SC.S}$). El número de supercapacitores conectados en serie se calculó dividiendo la tensión nominal de la instalación para la tensión nominal de los supercapacitores.

$$N_{c.S} = \frac{V_N}{V_c} \quad (20)$$

$$V_N (V): 12$$

$$V_c (V): 12$$

Se calculó el número de supercapacitores conectados en serie.

$$N_{c.S} = \frac{12 V}{12 V}$$

$$N_{c.S} = 1$$

Resistencia del banco de supercapacitores (R_c). Una vez calculado el número de supercapacitores en serie necesarios para llegar al voltaje nominal del sistema será un requisito cumplir con la relación ya expresada de las resistencias internas en los sistemas de acumulación $R_b > R_c$. Es claro que entre mayor sean las ramas en paralelo menor será la resistencia del banco de supercapacitores.

$$R_b > R_c = \frac{N_{c.S}}{N_{c.P}} * R_{SC} \quad (21)$$

$$N_{c.P}: 1$$

$$R_b (m\ ohms): 7.5$$

$$R_c (m\ ohms): 1.7$$

$$N_{c.S}: 1$$

Se comprobó que el número de supercapacitores conectados en serie y paralelo cumpla con los requerimientos ya determinados.

$$R_c = \frac{1}{1} * 1.7\ m\ ohms$$

$$R_c = 1.7 \text{ m ohms}$$

$$7.5 \text{ m ohms} > 1.7 \text{ m ohms}$$

Al implementar este banco de supercapacitores se cumplió con los requerimientos para que el supercapacitor actúe como buffer en la descarga del HESS en una topología pasiva.

Capacitancia total de los supercapacitores (C). Para poder determinar la capacidad total del módulo se tomó en cuenta el número de supercapacitores conectados en serie indispensables para obtener el voltaje nominal y el número de ramas en paralelo.

$$C = \frac{N_{SC.S}}{N_{SC.P}} * C_{SC} \quad (22)$$

$$N_{SC.S}: 1$$

$$N_{SC.P}: 1$$

$$C_{SC} (F): 500$$

Se calculó la capacitancia total del banco de supercapacitores.

$$C = \frac{1}{1} * 500 F$$

$$C = 500 F$$

5.11.10. Corriente en estado estable

El sistema híbrido alcanza el estado estable cuando el voltaje del supercondensador es igual al voltaje de la batería, $V_{oc} = V_b$. Se calculó el aporte de corriente del supercapacitor y de la batería en el primer instante para cubrir la demanda de energía en las cargas.

El aporte de corriente de la batería durante la descarga en un HESS en una topología pasiva, entre mayor sea la resistencia de la batería y menor la resistencia del supercapacitor abra una menor contribución de la batería. A continuación, se presenta

el aporte de corriente de los almacenamientos durante la descarga conectando un motor ya que es la demanda más exigente a utilizar en el módulo.

$$I_{b,ss}(0) = I_o - \frac{R_b * I_o}{R_b + R_c} \quad (42)$$

$$I_{o-motor} (A): 14$$

$$R_b (m\ ohms): 7.5$$

$$R_c (m\ ohms): 1.7$$

El aporte de la corriente de la batería durante la descarga para el motor será de:

$$I_{b,ss}(0) = 6.3\ A - \frac{7.5\ m\ ohms * 14\ A}{7.5\ m\ ohms + 1,7\ m\ ohms}$$

$$I_{b,ss}(0) = 2.58\ A$$

El aporte de la corriente por el supercapacitor para el motor es:

$$I_{c,ss}(0) = \frac{R_b * I_o}{R_b + R_c} \quad (44)$$

El aporte de la corriente será:

$$I_{c,ss}(0) = \frac{7.5\ m\ ohms * 14\ A}{7.5\ m\ ohms + 1,7\ m\ ohms}$$

$$I_{c,ss}(0) = 11.4\ A$$

El aporte máximo del supercapacitor durante la descarga será aproximadamente de 11.4 A y para la batería será de 2.58 A, reduciendo el supercapacitor la corriente de descarga en la batería. A continuación, se verificará si la capacidad del supercapacitor seleccionado es la adecuada. Durante la descarga la corriente máxima fue 11.4 A y la corriente mínima después de la descarga es 0 A teniendo un promedio de 5.7 A donde el supercapacitor deberá proporcionar energía eléctrica durante un tiempo para aliviar la descarga en la batería siendo la mayor descarga durante el arranque. En la simulación se observó que el voltaje del supercapacitor dependerá exclusivamente del voltaje de la

batería. Según (Würth Elektronik, 2019) el tiempo de descarga para el supercapacitor se podrá calcular con la siguiente ecuación.

$$t_d = \frac{C (V_{MAX} - V_{MIN})}{i_{c,SS}} \quad (46)$$

$$C (F): 500$$

$$i_{c,p} (A): 5.7$$

$$V_{MAX} (V): 13.1$$

$$V_{MIN} (V): 11.9$$

Cálculo del tiempo de descarga.

$$t_d = \frac{500 F (13.1 V - 11.9 V)}{5.7 A}$$

$$t_d = 105.26 \text{ segundos}$$

$$t_d = 1 \text{ minuto} - 45 \text{ segundos}$$

Se verificó que el supercapacitor seleccionado será capaz de aliviar la descarga en la batería durante 105.26 segundos siendo un tiempo suficiente para gestionar la energía que demande la carga durante el arranque con un aporte máximo de corriente de 11.4 A por parte del supercapacitor este análisis se lo realizó en el régimen estable. Cabe señalar que para esta carga la corriente de arranque será mayor que la corriente nominal donde la batería tendría que gestionar por sí sola la descarga, pero al llevar a cabo un HESS pasivo el supercapacitor actuará como un buffer proporcionando energía eléctrica durante un tiempo para mejorar la calidad de energía que llegará a la carga. Permitiendo el HESS pasivo eliminar las descargas innecesarias de la batería como lo son las corrientes de arranque. La utilidad de llevar a cabo un HESS en una topología pasiva en sistemas fotovoltaicos aislados será de suprimir las altas corrientes durante la descarga.

5.11.11. Requerimientos de energía del módulo

La energía requerida para el proceso de carga-descarga de la batería y el supercapacitor deberá cumplir con las ecuaciones de balance.

Energía del supercapacitor (E_c).

$$E_c = \frac{0.5 * C * V_{MAX.c}^2}{3600} \quad (47)$$

C (F): 500

$V_{MAX.c}$ (V): 16.2

Cálculo de la energía del supercapacitor.

$$E_c = \frac{0.5 * 500 F * (16.2 V)^2}{3600}$$

$$E_c = 18.2 Wh$$

Energía de la batería (E_b).

$$E_b = C_b * V_b * PD \quad (48)$$

C_b (Ah): 55

V_b (V): 12

PD : 0.75

Calculó de la energía de la batería.

$$E_b = 55 Ah * 12 V * 0.75$$

$$E_b = 495 Wh$$

Requerimientos del sistema durante la descarga

$$L_{MD} \leq E_b + E_c \quad (44)$$

$$L_{MD} \leq 495 Wh + 18.2 Wh$$

$$453.7 Wh \leq 513.12 Wh$$

Requerimientos del sistema para la carga

$$(E_{DMF} * N_T) \geq E_b + E_c \quad (45)$$

$$702.88 Wh * 1 \geq 495 Wh + 18.2 Wh$$

$$644 Wh \geq 513.12 Wh$$

Los sistemas de acumulación elegidos podrán ser implementados ya que cumplen con las ecuaciones de balance de carga-descarga, la energía requerida en la descarga será menor a la demandada por las cargas y en la carga la energía requerida por los almacenamientos será menor que la energía proporcionada por el panel fotovoltaico. Además, que ya se comprobó que cumplen con los requerimientos de $R_b > R_c$ para ser implementados en el almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva.

5.11.12. Requerimientos al interconectar supercapacitores

Dado que se va a utilizar una celda de supercapacitores fabricada por Eaton el cual internamente posee protecciones para estabilizar el voltaje en cada uno de los supercapacitores, además garantiza una alta confiabilidad en sus supercapacitores, no será necesario utilizar resistencias que estabilicen el voltaje entre cada uno de los supercapacitores conectados dentro de la celda.

5.11.13. Dimensionamiento del regulador de carga ($I_{GFV.SC}$)

La máxima corriente derivada del módulo fotovoltaico, tomando en cuenta el número total de paneles en paralelo será de ayuda para dimensionar el regulador de carga.

$$I_{GFV.SC} = 1.25 * I_{MOD.SC} * N_P \quad (16)$$

$$I_{SC} (A): 11.99$$

$$N_P: 1$$

Se calculó la corriente mínima que deberá soportar el regulador de carga.

$$I_{GFV.SC} = 1.25 * 11.99 A * 1$$

$$I_{GFV.SC} = 14.98 A$$

5.11.14. Estandarización del regulador de carga

La tabla 13 muestra los controladores de carga, se podría seleccionar el modelo Morningstar MPPT 60A ya que posee un sistema de adquisición de datos, pero se estaría sobredimensionando y el modelo de Victron Energy MPPT 75/15 no dispone de un interfaz de comunicación. Se seleccionó el modelo Victron Energy MPPT 100/20 ya que tanto los requerimientos de voltaje y corriente corresponden a los ya calculados, dispone de una interfaz de comunicación la cual es VictronConnect para permitir observar las características eléctricas del módulo. Además de una alta eficiencia por ser un controlador de carga MPPT.

Tabla 13

Selección del regulador de carga para el proyecto

Selección del regulador de carga			
Modelo	Victron Energy MPPT 100/20	Morningstar MPPT 60A	Victron Energy MPPT 75/15
Tensión de salida del controlador (V)	12/24/48	12/24/48	12/24
Corriente de carga nominal (A)	20	60	15
Potencia FV nominal (W)	290/580/1 160	600/1 300/2 600	220/440
Tensión máxima en circuito abierto (V)	100	150	100
Máxima corriente de cortocircuito (A)	20	65	15
Interfaz de comunicación	VictronConnect	MS View	n.a.
Tecnología	MPPT	MPPT	MPPT
Eficiencia máxima (%)	98	98	98

Nota. Dentro del proyecto se pretende visualizar los parámetros eléctricos del módulo por tal razón se seleccionó equipos que tengan esa función.

5.11.15. Dimensionamiento del inversor (S_{INV})

Aplicando un factor de seguridad del 20 % la potencia aparente del inversor deberá ser mayor o igual a la calculada.

$$S_{INV} \geq 1.20 * \sum S_{CA} \quad (17)$$

Para dimensionar el inversor para el módulo se deberá realizar cálculos adicionales como lo es la potencia reactiva total y la potencia aparente total.

La potencia reactiva total se calcula con la siguiente fórmula.

$$Q_{CA} = \sum P_{Eq} * \tan(\arccos(FP)) \quad (18)$$

La resistencia al tener un factor de potencia igual a uno no posee potencia reactiva por tanto no será tomada en cuenta en los cálculos.

$$P_{Eq2} (W): 150$$

$$FP: 0.62$$

$$Q_{CA} = 150 W * \tan(\arccos(0.62))$$

$$Q_{CA} = 189.82 \text{ VAr}$$

La potencia aparente se calculó a partir de la potencia activa y reactiva

$$S_{CA} = \sqrt{(P_{Eq1} + P_{Eq2})^2 + Q_{CA}^2} \quad (19)$$

$$P_{Eq1} (W): 144$$

$$P_{Eq2} (W): 150$$

$$Q_{CA} (VAr): 189.82$$

$$S_{CA} = \sqrt{(144 W + 150 W)^2 + (189.82 \text{ VAr})^2}$$

$$S_{CA} = 349.95 \text{ VA}$$

Aplicando un factor de seguridad del 20 % la potencia aparente del inversor será de.

$$S_{INV} \geq 1.20 * 349.95$$

$$S_{INV} \geq 437.44$$

5.11.16. Estandarización del inversor

En la tabla 14 se muestra los inversores que se podrían acoplar al módulo ya que todos superan la potencia aparente que deberá tener el inversor, pero solo un inversor posee una interfaz de comunicación, todos los modelos tienen un voltaje de salida de 120 V. Se seleccionó el Victron 12/500 ya que concuerda con la potencia aparente calculada además de ofrecer una interfaz para poder observar los parámetros eléctricos del inversor y brindar una alta eficiencia del 92% además de un bajo consumo en vacío.

Tabla 14

Selección del inversor para el proyecto

Selección del inversor solar			
Modelo	Zonhan 500	Studer 450	Victron 12/500
Potencia aparente (VA)	500	450	500
Potencia máxima (W)	350	400	400/350
Rango de tensión de entrada (V)	10.8 – 15.5	10.5 - 16	9,2 - 17
Eficiencia máxima (%)	90	92	91
Tensión de salida (V)	100 – 120	100 – 120	100 – 120
Interfaz de comunicación	n.a.	n.a.	VictronConnect
Frecuencia de salida (Hz)	50/60	50/60	50/60

Nota. Dentro del proyecto se pretende visualizar los parámetros eléctricos del módulo por tal razón se seleccionó un equipo que tenga esa característica.

5.12. Selección de los instrumentos de medida

En la selección de los dispositivos para el módulo fotovoltaico autónomo con almacenamiento híbrido de energía se seleccionó tanto el regulador de carga como el

inversor de la misma casa comercial como lo es Victron Energy los cuales cuentan con la tecnología Bluetooth Smart para supervisar las variables eléctricas.

Es importante monitorear los sistemas de almacenamiento como lo es la batería y el supercapacitor por tal motivo se optó por un sistema Bluetooth Smart siendo seleccionado el modelo Smart Shunt del mismo fabricante de los demás dispositivos ya mencionados para poder observar el comportamiento del sistema durante la carga-descarga. La visualización de estas variables será a través de la misma interfaz de los dispositivos ya seleccionados. La tabla 15 indicará las características del monitor de los sistemas de acumulación.

Tabla 15

Datos del monitor para los sistemas de acumulación

Tensión de alimentación (V)	6.5 - 70
Consumo de corriente (mA)	< 1
Capacidad de energía (Ah)	1 - 9999
Interfaz de comunicación	VictronConnect

Nota. El monitor de baterías Bluetooth Smart ayudará a supervisar los sistemas de acumulación utilizando la interfaz VictronConnect.

A continuación, se detalla las variables que podrán ser visualizadas en VictronConnect dependiendo del dispositivo seleccionado.

Tabla 16

Variables que medirán los dispositivos seleccionados del proyecto

Regulador de carga	Inversor	Smart Shunt
<ul style="list-style-type: none"> • Tensión de carga. • Corriente de carga. • Potencia de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de la capacidad de potencia nominal del inversor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión en los almacenamientos. • Corriente en los almacenamientos.

Regulador de carga	Inversor	Smart Shunt
<ul style="list-style-type: none"> • Tensión en los almacenamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión de entrada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia de los almacenamientos. • Amperios horas consumidos. • Estado de carga.

Nota. Solo el regulador de carga y el Smart Shunt podrán visualizarse las mediciones en forma gráfica.

5.13. Selección del software

VictronConnect es un software que permite supervisar y obtener datos históricos ya que los dispositivos cuentan con Bluetooth Smart. Las funciones principales de este software es configurar de forma rápida los dispositivos de la instalación también permiten monitorear dichos dispositivos. Las características de este software son:

Representación gráfica en tiempo real de los datos de los dispositivos, estos datos podrán ser visualizados, pero no podrán ser guardados.

- Fácil actualización de firmware.
- Programación de alarmas y estadísticas de eventos.
- Fácil configuración.

Además de controlar y supervisar los dispositivos también se podrá controlar con facilidad el encendido o apagado del inversor y controlador de carga.

5.14. Interfaz

Las secciones que se presentan en la interfaz VictronConnect se presentan a continuación.

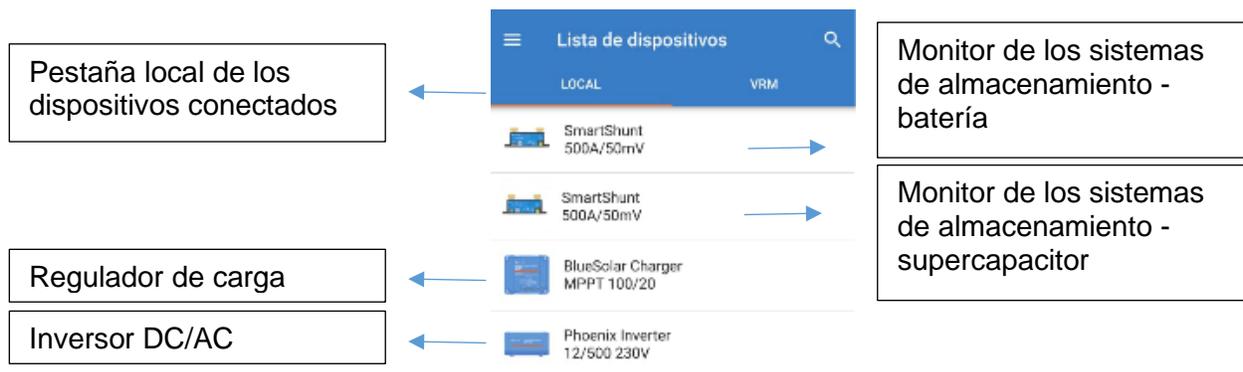
5.14.1. Pestaña local

La pestaña indica todos los dispositivos que están en el alcance del dispositivo receptor. Para que los dispositivos se visualicen dentro de la aplicación será necesario

que el receptor bluetooth del dispositivo esté activado. La figura 23 será la pantalla inicial de VictronConnect.

Figura 23

Lista de dispositivos a monitorear en el módulo



Nota. El total de dispositivos Smart serán cuatro los cuales podrán conectarse a través de la aplicación VictronConnect.

5.14.2. Información básica

Dependiendo del dispositivo seleccionado se podrá ver diferentes variables.

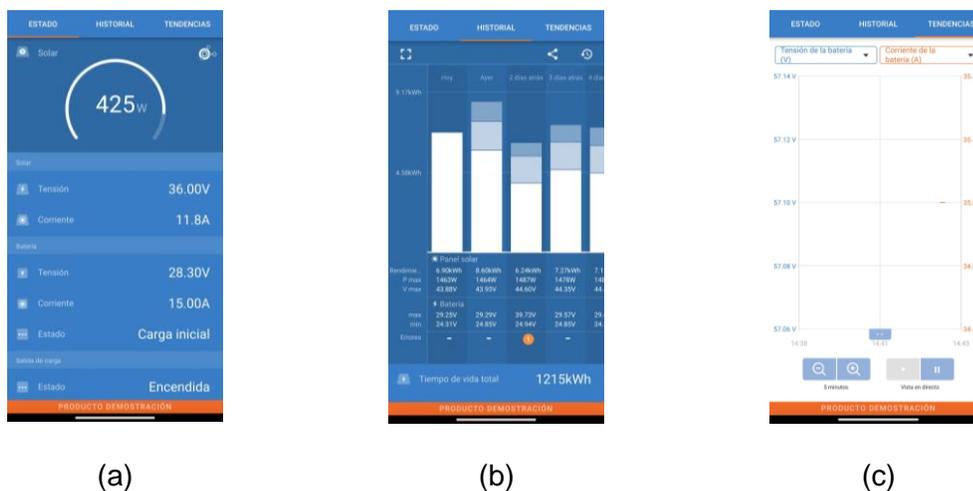
5.14.2.1. Regulador de carga MPPT 100/20 Victron. La aplicación

VictronConnect para el regulador de carga MPPT 100/20 Victron permitirá utilizarse para:

- Monitorizar el regulador solar y visualizar los datos en tiempo real del conjunto solar y de los acumuladores de energía. Figura 24 (a).
- Acceder a un historial de datos y errores hasta 30 días. Figura 24 (b).
- Permite visualizar en una gráfica los datos en tiempo real del conjunto solar y de los acumuladores de energía. Figura 24 (c).
- Configurar los ajustes del cargador solar.

Figura 24

Información de VictronConnect para el regulador de carga MPPT 100/20 Victron



Nota. La figura 24 muestra la interfaz de VictronConnect para el regulador de carga MPPT 100/20 Victron.

5.14.2.2. Inversor Phoenix Victron 12/500 120 V. La aplicación VictronConnect para el inversor Phoenix de Victron permitirá monitorizar la tensión de entrada, la tensión en la salida del inversor y el porcentaje de carga conectada al inversor, los datos se visualizarán en tiempo real. Figura 25.

Figura 25

Información de VictronConnect para el Phoenix 12/500 120 V de Victron



Nota. La figura 25 muestra la interfaz de VictronConnect para el Phoenix 12/500 120 V.

5.14.2.3. Smart Shunt Victron. La aplicación VictronConnect para el monitor de almacenamientos permitirá utilizarse para:

- Monitorizar la batería y visualizar los datos en tiempo real del almacenamiento conectado. Figura 26 (a).
- Acceder a un historial de datos en el acumulador de energía conectado. Figura 26 (b).
- Permite visualizar en una gráfica los datos en tiempo real del acumulador conectado. Figura 26 (c).

Figura 26

Información de VictronConnect para el SmartShunt de Victron



(a)



(b)



(c)

Nota. La figura 26 muestra la interfaz de VictronConnect para el SmartShunt.

5.15. Metodología para la ejecución del proyecto

5.15.1. Diseño del módulo del proyecto

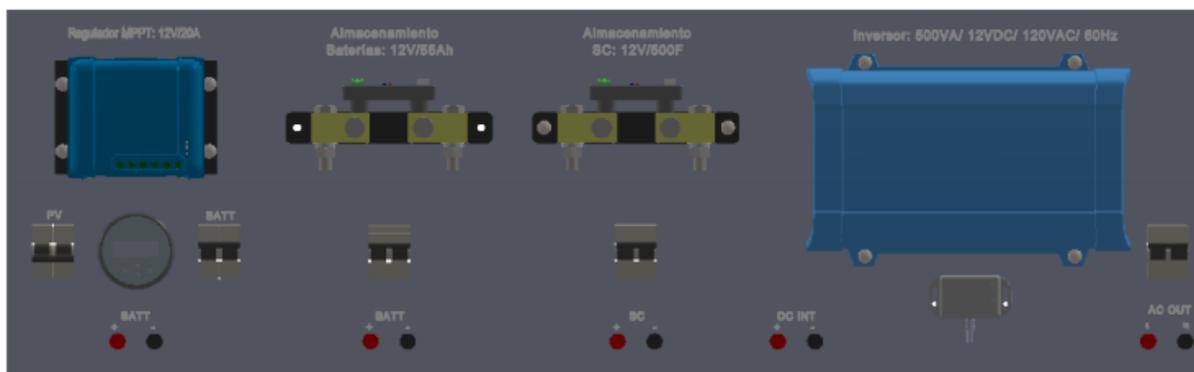
A partir del dimensionamiento y selección de los equipos para el módulo didáctico también se escogió los componentes auxiliares como son los dispositivos de medición para la instalación solar y conectores para cada uno de los dispositivos. Además de prevenir la destrucción de los dispositivos por causa imprevistas las

protecciones son indispensables para salvaguardar cada uno de los componentes del sistema.

Cada uno de los dispositivos que corresponden al módulo didáctico se implementa en bastidores A4 como los demás equipos de laboratorio, el total de módulos es cuatro. La figura 27 muestra la disposición de los equipos en sus respectivos paneles frontales.

Figura 27

Montaje de los equipos en sus respectivos paneles frontales



Nota. El diseño se ajusta a los requerimientos para ser utilizados en las mesas de trabajo de laboratorio. La estructura se detalla en el Anexo G.

El panel fotovoltaico se ensambló en un soporte móvil. La estructura cuenta con un mecanismo que permite inclinar el panel fotovoltaico para aprovechar de mejor forma el recurso solar. La figura 28 muestra la estructura en la cual se instaló el panel fotovoltaico

Figura 28

Estructura del panel solar del proyecto



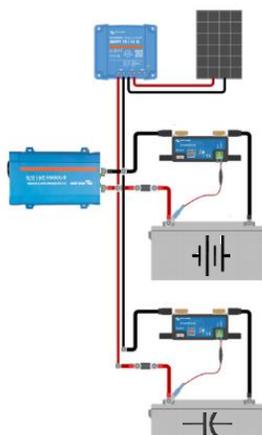
Nota. Para el mecanismo de inclinación se utilizó una media luna. La estructura se detalla en el Anexo H.

5.15.2. Conexión del sistema fotovoltaico

En la figura 29 se muestra el diagrama de conexiones de los dispositivos empleados en el sistema fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía.

Figura 29

Diagrama de conexiones con los dispositivos del proyecto



Nota. La figura muestra el diagrama de conexiones del proyecto. Este diagrama se detalla en el Anexo C con todos los equipos utilizados en la ejecución del proyecto.

5.15.3. Configuración del sistema fotovoltaico

Con la ayuda del software VictronConnect se configurarán los equipos de la instalación y se monitorizarán los parámetros de los dispositivos del sistema fotovoltaico y así comprobar su funcionalidad para poder observar la interacción del sistema de almacenamiento híbrido de energía en una conexión pasiva basada en baterías y supercapacitores. En la figura 30 se muestra la conexión entre los dispositivos emisores (regulador de carga, monitor de almacenamientos e inversor) con Bluetooth Smart y el dispositivo receptor (smartphone o computadora) con Bluetooth Smart Ready.

Figura 30

Conexión entre los dispositivos del módulo fotovoltaico y el dispositivo receptor



Nota. Se observan todos los dispositivos que enviarán los datos para ser observados en tiempo real o en una gráfica hacia el dispositivo receptor (smartphone o computadora).

5.16. Configuración inicial

Es imprescindible configurar los dispositivos con el software VictronConnect para que se ajusten a los valores característicos del sistema fotovoltaico a implementar con la finalidad de no obtener mediciones incorrectas o un mal funcionamiento del equipo. El software VictronConnect es de propiedad de la marca Victron Energy, utiliza un entorno sencillo dentro del software, se seleccionaron todos los dispositivos relevantes del mismo fabricante.

A continuación, se expondrán las configuraciones iniciales de los dispositivos relevantes para poner en marcha el sistema fotovoltaico.

5.16.1. Regulador de carga MPPT 100/20 Victron

Los principales ajustes se detectarán automáticamente en el regulador de carga, pero es necesario comprobar varios factores para un correcto funcionamiento. Lo primero será verificar el valor de la tensión en los almacenamientos el cual se podrá establecer entre (12 V / 24 V /48 V), el valor en el que se estableció en los acumuladores fue 12 V, ya que el voltaje nominal de los almacenamientos deberá coincidir con el ingresado en el regulador de carga. Además de verificar la corriente a la cual se cargarán los sistemas de acumulación, la máxima corriente que podrá enviar el panel fotovoltaico será 12 A. Esta configuración se la indica en la figura 31. Pese a no utilizar cargas en DC se muestra como configurar la salida en DC del regulador de carga el fabricante recomienda utilizar el perfil BatteryLife el algoritmo es una adaptación automática para maximizar la vida útil de los sistemas de acumulación. Esta configuración se la indica en la figura 32.

Figura 31

Ajuste del controlador de carga MPPT para los módulos de almacenamiento

The screenshot shows the 'Ajustes' (Settings) menu of a Victron MPPT controller. The settings are as follows:

Setting	Value
Tensión de la batería	12V
Corriente máxima de carga	12A
Cargador activado	On
Preajuste de la batería	Factory default
Modo experto	Off
Tensiones de carga	
Tensión de absorción	14.40V
Tensión de flotación	13.80V
Tensión de equalización	16.20V
Equalización	
Equalización automática	Desactivado
Compensación de la tensión	
Compensación por temperatura	-16.20mV/°C
Limites de la batería	
Corte por baja temperatura	Desactivado

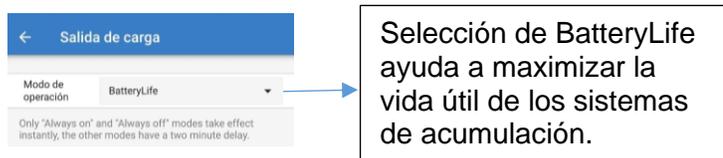
Annotations in the image:

- Left box: "Se establecerá la corriente máxima del panel fotovoltaico 12 A." (The maximum current of the photovoltaic panel will be set to 12 A.) - points to the 'Corriente máxima de carga' setting.
- Right box (top): "Verificar que el voltaje detectado sea 12V." (Verify that the detected voltage is 12V.) - points to the 'Tensión de la batería' setting.
- Right box (bottom): "Al cambiar esta posición se apagará el controlador." (When this position is changed, the controller will turn off.) - points to the 'Cargador activado' toggle.
- Bottom-left box: "Se seleccionará el ajuste predeterminado de fábrica." (The factory default setting will be selected.) - points to the 'Preajuste de la batería' dropdown.

Nota. Se muestra el voltaje establecido el cual corresponde a 12 V siendo el voltaje nominal para los sistemas de acumulación. A esta configuración se accede desde el menú del controlador de carga MPPT > configuraciones > batería.

Figura 32

Configuración de la salida de carga del controlador MPPT



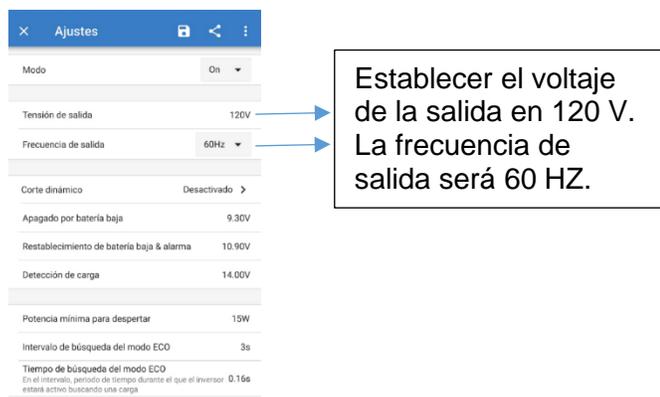
Nota. Esta será la configuración de la salida en DC del controlador de carga. A esta configuración se accede desde el menú del controlador de carga MPPT > configuraciones > salida de carga.

5.16.2. Inversor Phoenix Victron 12/500 120 V

Se configura el voltaje de salida que debe tener el inversor para el proyecto debido a que las cargas son 120 V AC se estableció en 120 V AC la salida del inversor y una frecuencia de 60 HZ. La configuración del inversor se indica en la figura 33.

Figura 33

Configuración del inversor para la puesta en marcha dentro del módulo



Nota. Se configura a una salida de 120 V a una frecuencia de 60 HZ. Para acceder a esta configuración se accede desde el menú del inversor > configuraciones.

5.16.3. Smart Shunt Victron

La configuración será automática en el Smart Shunt con los acumuladores, la sincronización será un proceso que se cumplirá cuando los sistemas de acumulación estén cargados por completo. El Smart Shunt examinará los parámetros como el voltaje,

corriente, amperios horas consumidos y estado de carga. No se deberá realizar una configuración del dispositivo de medición.

5.17. Metodología de trabajo

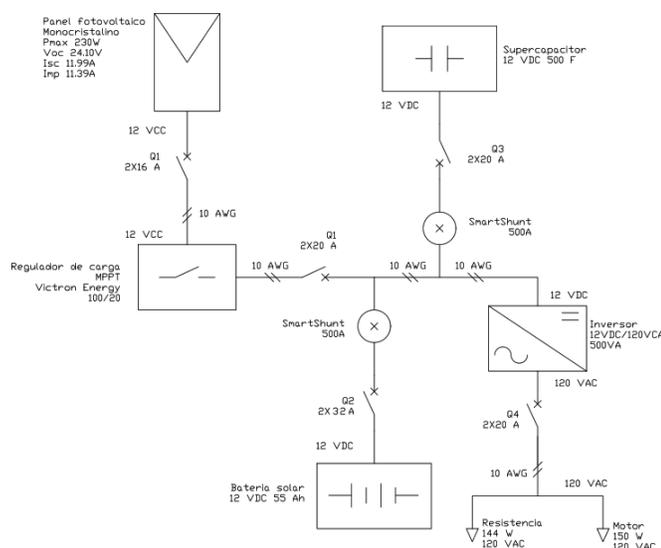
Para realizar las pruebas en el módulo didáctico será a través de los dispositivos de medida Smart Shunt los cuales nos indicarán el aporte de corriente de la batería y el supercapacitor. Además, el regulador de carga medirá el voltaje en los dispositivos de almacenamiento y los parámetros de carga de los acumuladores y el inversor medirá el voltaje de entrada del sistema.

15.18. Implementación del sistema de generación fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido

Se muestra en la figura 34 el diagrama eléctrico para la conexión del panel fotovoltaico con los dispositivos para el funcionamiento del módulo y la conexión de los equipos de medida.

Figura 34

Diagrama unifilar del módulo didáctico



Nota. Se indican todas las conexiones realizadas para llevar a cabo la puesta en marcha del módulo para las pruebas de funcionamiento.

15.19. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas a ejecutarse en esta sección comprenden la verificación del estado de funcionamiento del módulo y comunicación entre los dispositivos de medida y el dispositivo receptor (smartphone y computadora), y la comprobación de la hipótesis planteada en el primer capítulo de este trabajo.

Las pruebas se llevarán de la misma manera que la simulación siendo la primera la carga de los sistemas de acumulación y la segunda será observar el comportamiento de los sistemas de acumulación frente a las cargas conectadas.

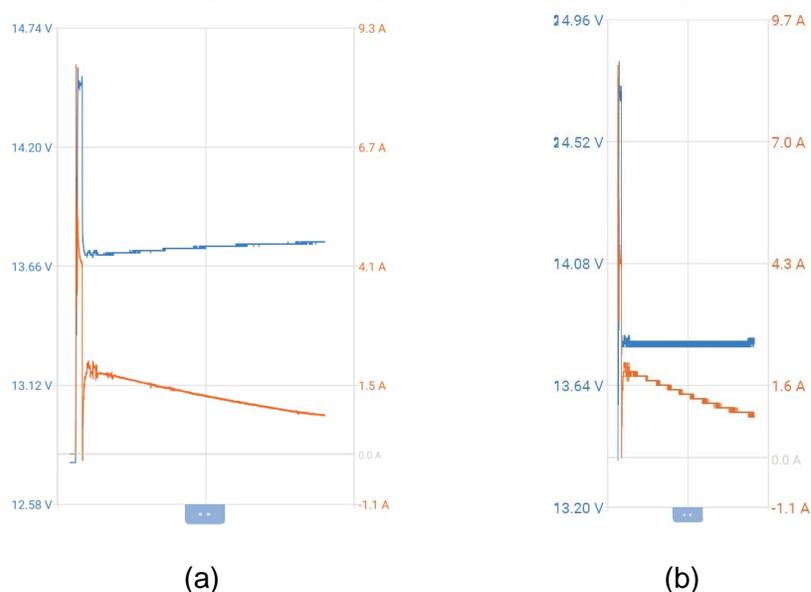
15.19.1. Prueba del BAS en un sistema fotovoltaico aislado

Las pruebas se las realizó con un voltaje inicial en la batería de 12.7 V. Las pruebas para la descarga se las realizó con un motor de 150 W a 120 V y con una carga resistiva de 144 W a 120 V, la conexión de las cargas fue a través de un inversor el tiempo de descarga es de 15 minutos para cada demanda. La carga del sistema de almacenamiento es por medio del panel solar monocristalino de 230 W por un periodo de dos horas. Las cargas son conectadas directamente al inversor.

15.19.1.1. Carga del BAS. La prueba de carga del BAS se realizó por dos horas. La corriente máxima durante la carga fue de 8 A en el primer instante de carga como lo muestra la figura 35 (a) y 33 (b) para continuar con una corriente de carga promedio de 1.5 A. El voltaje inicial de la batería fue de 12.7 V para terminar con un voltaje de carga de 13.2 V.

Figura 35

Prueba de carga del BAS conectado a un panel solar monocristalino de 230 W

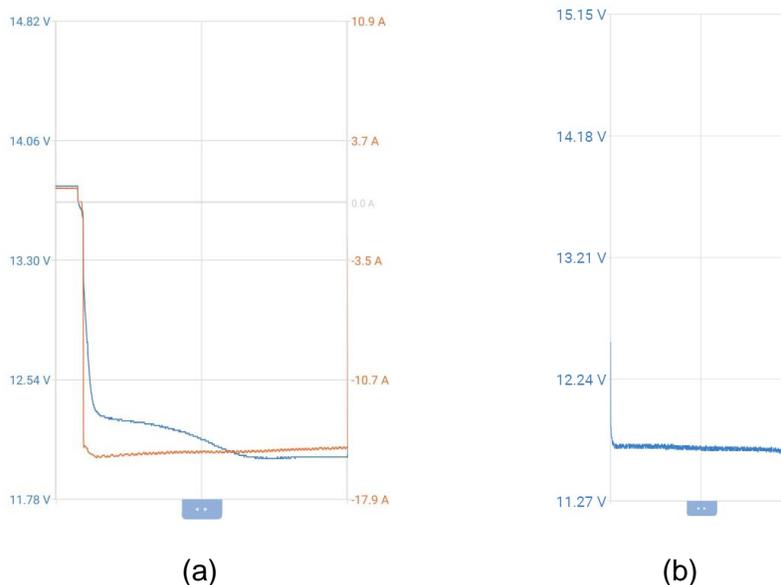


Nota. La figura 35 (a) representa la carga de la batería visto desde el Smart Shunt, la figura 35 (b) representa la carga de la batería visto desde el regulador de carga. La línea azul representa el voltaje DC del sistema y la línea naranja representa la corriente de carga de la batería.

15.19.1.2. Descarga del BAS. Una vez transcurrido la prueba de carga la batería se descargó con una carga en AC la cual fue un motor de 150 W a 120 V y posteriormente con una resistencia de 144 W a 120 V. La figura 36 muestra la descarga de la batería con el motor, se observó que la batería cubrió toda la demanda requerida por el motor, la corriente máxima en la descarga fue de 15.4 A (durante el arranque) y en condiciones estables la corriente fue de 14.8 A. Durante la descarga con el motor la batería entrega una corriente mayor para cubrir los requerimientos de la carga durante el arranque.

Figura 36

Prueba de descarga del BAS con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC



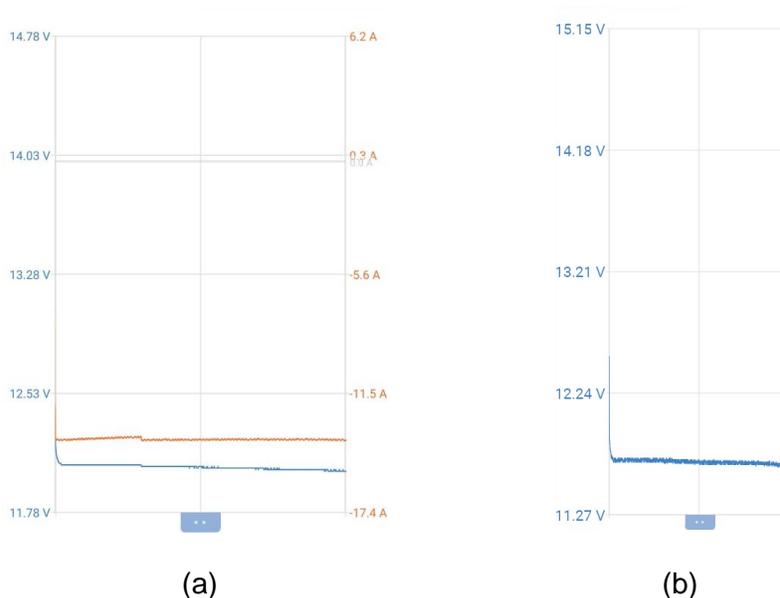
Nota. La figura 36 (a) representa la descarga de la batería visto desde el Smart Shunt, la figura 36 (b) representa el voltaje en DC del sistema visto desde el regulador de carga. La línea en color azul será el voltaje y la corriente será representada de color naranja.

La figura 37 muestra la descarga de la batería con la resistencia se observó que la batería respondió a la demanda requiriendo una corriente de 14.1 A durante la descarga. En comparación con la carga motor se observa que la carga resistiva no tendrá corrientes de arranque durante la descarga.

Los amperios hora consumidos por ambas pruebas fueron de 7 Ah (valor entregado por el Smart Shunt).

Figura 37

Prueba de descarga del BAS con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC



Nota. La figura 37 (a) representa la descarga en la batería visto desde el Smart Shunt, la figura 37 (b) representa el voltaje en DC del sistema visto desde el regulador de carga. El voltaje se muestra en color azul y la corriente está representada de color naranja.

Los amperios hora consumidos por ambas pruebas fueron de 7 Ah (valor entregado por el Smart Shunt).

15.19.2. Prueba del HESS pasivo en un sistema fotovoltaico aislado

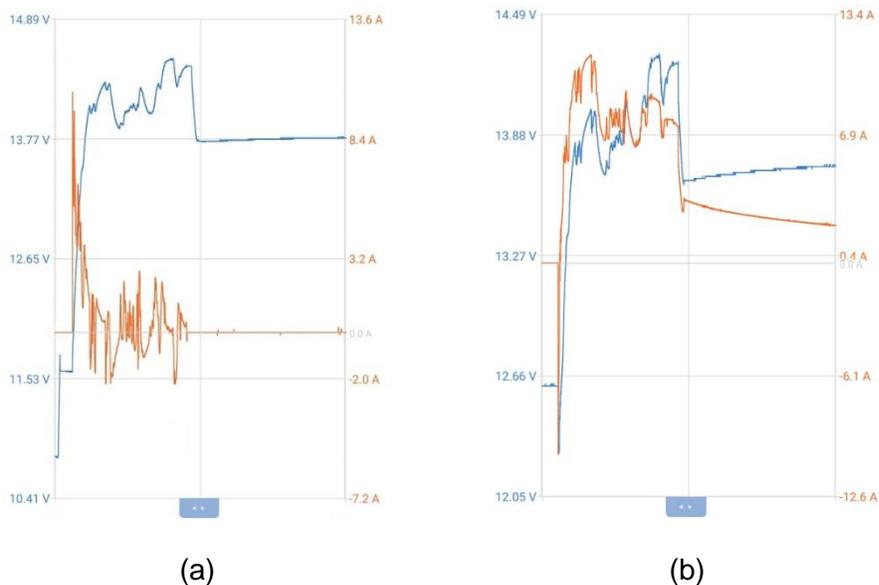
Los voltajes iniciales con los que se realizaron las pruebas fueron para el supercapacitor de 11.6 V y para la batería fue de 12.6 V. Las pruebas para la descarga se las realizó con un motor de 150 W a 120 V y con una carga resistiva de 144 W a 120 V, la conexión de las cargas fue a través de un inversor el tiempo de descarga es de 15 minutos para cada demanda. La carga de los sistemas de almacenamiento fue por medio del panel solar monocristalino de 230 W por un tiempo de dos horas.

15.19.2.1. Carga del HESS pasivo. Como lo muestra la figura 38 (a) al conectar en paralelo por primera vez el HESS pasivo al sistema fotovoltaico, el almacenamiento que tenga un mayor voltaje sea el supercapacitor o la batería tendrá que ceder carga para compensar el nivel de tensión. En este caso al tener el supercapacitor menor voltaje con respecto a la batería la batería tendrá que entregar carga al supercapacitor como se observa en la figura 38 (a) y 38 (b) respectivamente. La corriente máxima cedida por la batería fue de 9.9 A.

El voltaje del supercapacitor estará restringido por el valor de la tensión en la batería el cual no podrá superar dicho valor. El voltaje final de la prueba de carga para el almacenamiento HESS en una topología pasiva fue de 13.16 V el promedio de corriente de carga durante la prueba fue de 2 A.

Figura 38

Prueba de carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W

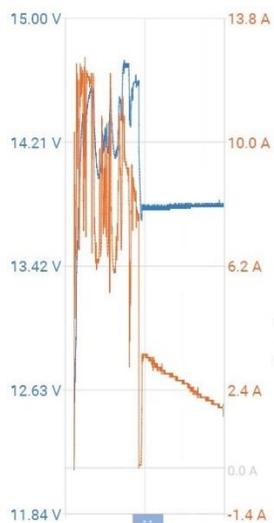


Nota. La figura 38 (a) representa la carga del supercapacitor y la figura 38 (b) representa la carga de la batería, todo esto fue medido desde los Smart Shunt. En la figura se muestra la tensión de color azul y la corriente en color naranja.

La figura 39 muestra como el regulador de carga cambia su nivel de tensión y corriente buscando siempre el punto de máxima potencia esto se debe a que se instaló en el módulo un regulador de carga MPPT.

Figura 39

Prueba de carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W



Nota. La figura 39 representa la carga del HESS pasivo medido desde el regulador de carga. En la figura se muestra la tensión del sistema de color azul y la corriente de carga de color naranja.

En la tabla 17 y 18 se registraron los datos obtenidos durante la carga del HESS. La tabla 17 muestra que desde el segundo 2 al segundo 38 la energía cedida por la batería fue de 2609.704 J y la energía almacenada por el supercapacitor fue de 2429.284 J. La diferencia de energía existente entre lo descargado y cargado en los almacenamientos es de 180.42 J siendo esta energía cubierta por el panel durante la carga en esos instantes de tiempo. A partir del segundo 38 en adelante el panel solar cargará a los almacenamientos, la energía entregada al HESS por parte del panel durante un tiempo aproximado de 30 segundos fue de 1934.112 J. Los registros

muestran que la energía que entregó el panel fotovoltaico al HESS pasivo fue de 1961.064 J.

Tabla 17

Registro de datos durante la carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W

Registro de datos durante la carga del HESS								
Supercapacitor				Batería				
Tiempo (s)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)
2	0	11.6	0.0	0.0	0	12.6	0.00	0.0
6	0	11.6	0.0	0.0	0	12.6	0.00	0.0
10	6.2	11.6	71.9	194.1	-7.8	12.4	-96.7	-223.6
14	9.5	11.8	111.9	214.7	-9.4	12.3	-115.6	-220.0
18	8.1	11.8	95.9	183.7	-7.9	12.3	-96.9	-187.7
22	6.9	11.9	82.0	159.5	-6.9	12.3	-84.6	-164.4
26	6.2	11.9	74.0	144.5	-6.1	12.3	-74.8	-144.8
30	5.6	12.0	67.1	134.3	-5.4	12.3	-66.2	-127.7
34	5.5	12.0	66.1	132.4	-4.5	12.3	-55.3	-105.7
38	7.2	12.1	87.1	196.5	-3.2	12.3	-39.4	-41.9
42	9.6	12.2	117.1	228.3	0.5	12.5	6.2	12.5
46	7.3	12.2	89.4	170.3	-0.5	12.5	-6.2	-6.2
50	7.6	12.3	93.5	182.3	0.8	12.5	10.0	18.8
54	7.2	12.4	89.0	160.7	1.1	12.5	13.7	20.0
58	6	12.4	74.4	156.5	1.1	12.5	13.7	36.4

Nota. El registro fue cada dos segundos. La tabla completa se encuentra en el Anexo F.

Los datos registrados fueron medidos por los Smart Shunt.

Tabla 18

Registro de datos durante la carga del HESS pasivo conectado a un panel solar monocristalino de 230 W

Registro de datos durante la carga del HESS				
Tiempo (s)	Regulador de carga MPPT			
	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)
2	0	0.0	0.0	0.0
6	0	0.0	0.0	0.0
10	0	0.0	0.0	0.0
14	0	0.0	0.0	0.0
18	0	0.0	0.0	0.0
22	0	0.0	0.0	0.0
26	0	0.0	0.0	2.4
30	0.4	12.1	4.9	13.4
34	1.4	12.2	17.1	42.9
38	2.1	12.6	26.4	53.1
42	9.9	12.7	125.7	237.2
46	6.1	12.6	76.7	175.3
50	8.4	12.7	106.8	215.0
54	7.1	12.7	90.3	163.7
58	8.5	12.8	108.8	216.2

Nota. El registro fue cada dos segundos. La tabla completa se encuentra en el Anexo F.

Los datos registrados fueron medidos por el controlador de carga MPPT.

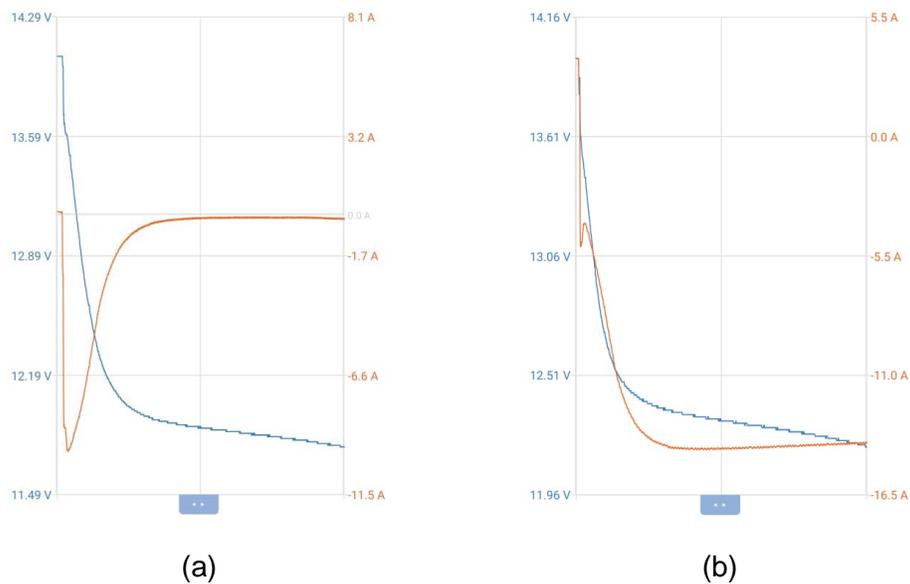
15.19.2.2. Descarga del HESS pasivo. La prueba de descarga se realizó bajo las mismas condiciones del BAS, tanto las cargas utilizadas como el tiempo de descarga fueron los mismos. Como se observa en las figuras 40 y 42 durante la descarga el supercapacitor atenuará la descarga en la batería frente a la demanda motor y la demanda resistiva. Usando las ecuaciones 42 y 43 se puede calcular la corriente de aporte en el primer instante, la resistencia dependerá exclusivamente del estado de carga.

En la figura 40 (a) se observó que la corriente con la que aporta el supercapacitor durante la descarga fue de 9.9 A. actuando como un buffer frente a la energía demandada por el motor así reduciendo la corriente de descarga durante el arranque en la batería en un 64.2 % en comparación al BAS que fue de 15.4 A.

La utilidad del HESS en una instalación fotovoltaica aislada dentro de una vivienda será de gran utilidad ya que la mayoría de hogares disponen de cargas que utilizan motores los cuales requieren una corriente de seis a siete veces la corriente nominal durante su arranque por un corto periodo de tiempo en donde la batería tendrá que cubrir las altas corrientes de descarga durante el arranque y posteriormente el funcionamiento es donde se obtendrá un mayor provecho al HESS pasivo debido a que el primero en responder a los requerimientos de las demandas será el supercapacitor el cual mitigará la descarga en la batería reduciendo estas descargas, una de las ventajas al descargarse en primer lugar el supercapacitor es capaz de soportar altas descargas de corriente sin que repercuta negativamente en su vida útil.

Figura 40

Prueba de descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC



Nota. La figura 40 (a) representa la descarga del supercapacitor y la figura 40 (b) representa la descarga de la batería, para medir se utilizó los Smart Shunt. En la figura se muestra la tensión de color azul, corriente de color naranja.

En la figura 41 se muestra el perfil de voltaje durante la descarga del HESS pasivo al conectar un motor de 150 W.

Figura 41

Voltaje en la barra DC durante la descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC



Nota. En la figura se muestra la tensión en DC del sistema.

La energía auxiliar entregada por el supercapacitor durante la prueba de descarga de un motor de 150 W con un voltaje de funcionamiento de 120 V fue de 8274.09 J. El tiempo que demoró el supercapacitor en descargarse fue aproximadamente 242 segundos, siendo un tiempo más que suficiente para cubrir la alta demanda de potencia que exige un motor durante su arranque permitiendo aliviar a la batería de esta descarga. En la tabla 19 se registró los datos durante la descarga con el motor.

Tabla 19

Registro de datos durante la descarga del HESS pasivo con un motor de 150 W y 120 V

Registro de datos durante la descarga del HESS - Motor									
Supercapacitor					Batería				
Tiempo (s)	Corriente (A)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)
0	0	0	13.16	0	0	0	13.1	0	0
16	-14.2	-9.6	12.74	-122.30	-241.87	-4.6	12.68	-58.328	-122.07
32	-14.7	-8	12.52	-100.16	-197.66	-6.7	12.6	-84.42	-171.29
48	-14.8	-6.4	12.36	-79.10	-155.67	-8.4	12.52	-105.16	-212.75
64	-14.7	-5.1	12.25	-62.47	-122.45	-9.6	12.47	-119.71	-234.06
80	-14.9	-3.9	12.16	-47.42	-92.416	-11	12.44	-136.84	-276.16
96	-14.7	-3	12.1	-36.3	-70.18	-11.7	12.42	-145.31	-294.35
112	-14.27	-2.4	12.06	-28.94	-55.454	-11.87	12.4	-147.18	-303.42
128	-14.8	-1.9	12.02	-22.83	-44.474	-12.9	12.39	-159.83	-320.90
144	-14.7	-1.4	11.99	-16.78	-32.36	-13.3	12.38	-164.64	-331.78
160	-14.8	-1.1	11.96	-13.15	-25.116	-13.7	12.37	-169.46	-340.17
176	-14.8	-0.8	11.94	-9.55	-19.104	-14	12.36	-173.04	-344.84
192	-14.7	-0.6	11.93	-7.15	-13.123	-14.1	12.36	-174.27	-349.78
208	-14.7	-0.5	11.91	-5.95	-11.91	-14.2	12.36	-175.51	-351.02
224	-14.7	-0.5	11.9	-5.95	-11.9	-14.2	12.35	-175.37	-350.74
240	-14.7	-0.5	11.89	-5.945	-11.885	-14.2	12.35	-175.37	-350.74
Total, de Energía descargada por el supercapacitor: -8274.09 J					Total, de Energía descargada por la batería: -33438.46 J				

Nota. El registro fue cada dos segundos. La tabla completa se encuentra en el Anexo F.

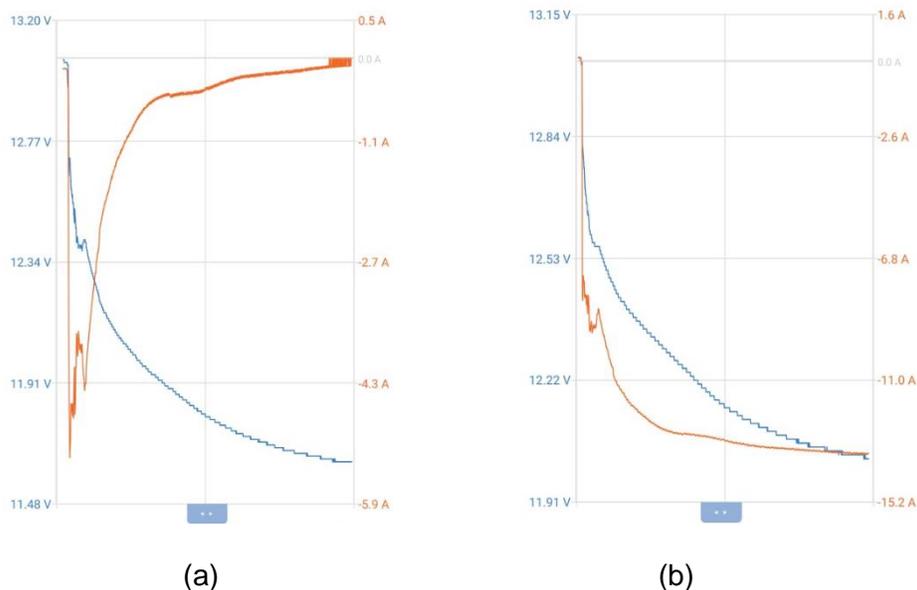
Los datos registrados fueron medidos por los Smart Shunt.

Las pruebas realizadas al conectar una carga resistiva al HESS pasivo muestran que la corriente de descarga será atenuada como ya se mostró en la anterior prueba. La

corriente máxima de descarga que realizó el supercapacitor para cubrir la demanda fue 5.2 A reduciendo en un 36.97 % en comparación a la descarga en BAS que fue de 14.1 para la misma carga.

Figura 42

Prueba de descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/CA



Nota. La figura 42(a) representa la descarga del supercapacitor y la figura 42(b) representa la descarga de la batería, para medir se utilizó los Smart Shunt. En la figura se muestra la tensión de color azul y la corriente en color naranja.

En la figura 43 se muestra el perfil de voltaje durante la descarga del HESS pasivo al conectar una resistencia de 144 W.

Figura 43

Voltaje en la barra DC durante la descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V a través de un inversor de DC/AC



Nota. La figura 43 representa la tensión en DC del sistema.

La energía auxiliar entregada por el supercapacitor durante la prueba de descarga de una resistencia de 144 W con un voltaje de 120 V fue de 9073.31 J. El tiempo que contribuyó el supercapacitor durante la descarga fue de 484 segundos. Siendo este tiempo mayor en comparación con la descarga en el motor debido a que la corriente de descarga en el supercapacitor fue menor pudiendo gestionar la energía requerida por un mayor tiempo. La corriente inicial de descarga en los almacenamientos se debe al porcentaje de carga que dispongan los almacenamientos.

Tabla 20

Registro de datos durante la descarga del HESS pasivo con una resistencia de 144 W y 120 V

Registro de datos durante la descarga del HESS - Resistencia									
Supercapacitor					Batería				
Tiempo (s)	Corriente (A)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (J)
32	-14.2	-5.3	12.6	-66.78	-277.08	-8.9	12.66	-112.67	-440.05
64	-14.2	-5.3	12.45	-65.98	-261.13	-8.9	12.58	-111.96	-460.24
96	-14.2	-4.1	12.29	-50.389	-199.01	-10.1	12.5	-126.25	-507.29
128	-14.1	-2.8	12.19	-34.13	-134.03	-11.3	12.45	-140.68	-565.23
160	-14.3	-1.9	12.12	-23.02	-89.68	-12.4	12.42	-154.00	-618.51
192	-14.1	-1.3	12.06	-15.678	-60.3	-12.8	12.4	-158.72	-639.84
224	-14.1	-0.9	12.03	-10.82	-43.29	-13.2	12.38	-163.41	-656.14
256	-14.2	-0.7	11.98	-8.386	-33.544	-13.5	12.37	-166.99	-667.98
288	-14.1	-0.6	11.94	-7.164	-26.26	-13.5	12.36	-166.86	-672.38
320	-14.2	-0.4	11.9	-4.76	-19.04	-13.8	12.35	-170.43	-681.72
352	-14.2	-0.4	11.86	-4.74	-18.97	-13.8	12.34	-170.29	-678.7
384	-14.1	-0.3	11.84	-3.55	-14.20	-13.8	12.34	-170.29	-681.16
408	-14.1	-0.3	11.82	-3.54	-14.17	-13.8	12.34	-170.29	-681.16
440	-14	-0.3	11.79	-3.53	-14.14	-13.7	12.33	-168.91	-678.15
472	-14.1	-0.3	11.76	-3.52	-14.11	-13.8	12.33	-170.15	-680.61
480	-14.1	-0.3	11.75	-3.525	-14.1	-13.8	12.33	-170.15	-680.61
Total, de Energía descargada por el supercapacitor: -9073.31 J					Total, de Energía descargada por la batería: -71126.47 J				

Nota. El registro fue cada cuatro segundos. La tabla completa se encuentra en el Anexo

F. Los datos registrados fueron medidos por los Smart Shunt.

En la figura 38 (b) y 40 (b) se observó que la corriente en la batería fue atenuada debido a utilizar el HESS pasivo, además se ve una leve mejora en la estabilidad de voltaje del sistema como se muestra en la figura 41 y figura 43 con el BAS el voltaje disminuye rápidamente.

Los amperios horas consumidos por la batería durante las pruebas fue de aproximadamente de 6 Ah. Las pruebas de descarga del HESS fueron de 15 minutos para cada uno de los casos.

15.19.3. Comparación de valores medidos y calculados

Para la comparación de lo medido con lo calculado se utilizará tanto la ecuación 42, 43 y 46 ya establecidas. Siendo la resistencia interna de la batería mayor a la del supercapacitor. A continuación, se presenta en una tabla la comparación de lo medido con lo calculado. (Anexo F).

Tabla 21

Comparación de lo medido con lo calculado en la prueba de descarga del HESS pasivo en la descarga con la demanda motor de 150 W

Comparación de lo medido con lo calculado		
Variable	Medido	Calculado
$I_{b,ss}(0)$ (A)	9.9	11.4
$I_{c,ss}(0)$ (A)	4.2	2.58
Tiempo de aporte del SC (s)	242	105.26

Nota. Esta comparación se realizó en las pruebas de descargas con la carga motor.

Al comparar lo medido con lo calculado se observó que existe una diferencia, esto se debe a que los valores de las resistencias internas en los almacenamientos fueron tomadas sin considerar el estado de carga de los almacenamientos.

Capítulo VI

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el diseño e implementación de un módulo fotovoltaico aislado con almacenamiento híbrido de energía para el laboratorio de Energías Renovables. Estudiar de manera práctica los HESS permitirán a los estudiantes ampliar sus conocimientos en los almacenamientos enfocados en sistemas fotovoltaicos aislados. El almacenamiento por baterías tiene una alta densidad de energía y el supercapacitor dispone una alta densidad de potencia complementándose entre los dos sistemas de almacenamiento.

El módulo fotovoltaico fue diseñado con un almacenamiento híbrido de energía en una topología pasiva, el mismo que consta de un panel fotovoltaico de 230 W, un regulador de carga MPPT de 12 V-20 A, un inversor de carga 12 V DC/120 AC a 60 Hz el almacenamiento está compuesto por una batería de 12 V DC - 55 Ah y un supercapacitor de 12 V DC - 500 F. El módulo cuenta con equipos auxiliares de medida para supervisar los almacenamientos y el conjunto solar.

Se implementó un HESS en una topología pasiva para un sistema fotovoltaico aislado para ser utilizado en las prácticas dentro del laboratorio de Energías Renovables. Este módulo ayudará a comprender los beneficios de combinar supercapacitores con baterías. La batería del HESS trabajará como un almacenamiento de energía primaria por tiempos de descarga prolongados y el supercondensador como una fuente de energía auxiliar para atenuar la potencia máxima durante la descarga, aliviando a la batería de las altas descargas.

La potencia extraída del supercapacitor y la batería estará determinada por sus resistencias internas debido a que la impedancia interna del supercapacitor es considerablemente menor que la de la batería, la mayor parte de la energía dinámica

demandada será cubierta por el supercapacitor. Por lo tanto, las baterías se descargarán con menos frecuencia lo que aumentará su vida útil. Debido a que el HESS está en una topología pasiva los almacenamientos estarán conectados de forma directa a la misma barra DC. El voltaje del supercapacitor está vinculado al voltaje de la batería ya que no podrá cargarse por encima de la tensión máxima de las baterías ni descargarse por debajo de la tensión mínima de las baterías. A pesar de estas restricciones, el HESS en una topología pasiva demostró durante las pruebas realizadas que puede aplicarse para mejorar la gestión de energía en los sistemas fotovoltaicos aislados.

En este estudio, se realizó pruebas de descarga en un BAS y un HESS para diferentes tipos de cargas como son: resistivas e inductivas. En la prueba de descarga del BAS, la corriente que requirió la carga se tomó solo de la batería. Para la prueba de descarga del HESS en una topología pasiva el estudio demostró que el supercapacitor actuará como una fuente de energía auxiliar de corto plazo como lo fue durante la descarga. Por lo tanto, conectar el supercondensador y la batería en una topología pasiva ayudará a prolongar la vida útil de la batería en sistemas fotovoltaicos aislados.

El estudio era evaluar si el HESS en una topología pasiva podría superar el problema de la batería al suministrar una corriente pico. El análisis experimental demostró que redujo en un 67.5 % los picos de corriente y potencia durante la descarga del motor y un 36.87 % para la demanda resistiva, en el instante en que se conectaron las cargas. Los resultados experimentales demuestran que el sistema híbrido pasivo mejora la gestión en el almacenamiento de energía para las instalaciones fotovoltaicas aisladas.

6.2. Recomendaciones

Para el caso de futuros proyectos se podría implementar un HESS en una topología semiactiva y activa, realizando una comparación entre las diferentes topologías de los HESS existentes para determinar las ventajas que le corresponden a cada una de las topologías en sistemas fotovoltaicos aislados. Ya que el análisis de los sistemas de almacenamiento de energía en sistemas fotovoltaicos aislados es sumamente amplio y de gran importancia.

En el proceso de diseño se recomienda primero dimensionar el sistema fotovoltaico aislado, para continuar con el proceso de cálculo para los supercapacitores los aspectos más importantes serán el voltaje nominal y máximo, la resistencia interna y la capacidad. Los supercapacitores son flexibles con respecto a su técnica de carga siempre y cuando no sobrepasen el voltaje máximo del mismo, siendo para este proyecto de 16.2 V como voltaje máximo del supercapacitor.

El módulo del inversor está dimensionado para tolerar potencias máximas de 350 W – 500 VA y potencias pico de 900 W si fuese necesario si se fuese a conectar cargas mayores a las definidas en el actual proyecto, será necesario adquirir un inversor de mayor potencia.

Para las mediciones será necesario que los módulos se encuentren energizados ya que ninguno de los módulos cuenta con fuentes internas de energía y los dispositivos receptores (smartphone o computadora) se encuentren cerca del módulo para evitar cortes en la comunicación.

Para llevar a cabo las prácticas en el módulo se debe tomar en cuenta las indicaciones de acuerdo al manual de operación (Anexo B) y las guías de laboratorio (Anexo D). Igualmente será de suma importancia revisar los diagramas para la conexión entre los módulos a fin de evitar errores ya que los módulos no se protegen por conexiones inversas en la polaridad.

Bibliografía

- ARCONEL. (2018). *Resolución No. ARCONEL-042/18*.
<https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/11/ARCONEL-003-18MICROGENERACION.pdf>
- Barbosa, V. E. S. (2017). *Análise da viabilidade de uso de supercapacitores em carregadores de baterias com painel fotovoltaico*.
- Carta, J. A., R, C., A, C., Castro, M., & E, C. (2012). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*.
- Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., & Isa, D. (2017). Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household. *Energy Procedia*, 107, 232–236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.135>
- CONELEC. (2018). *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA*.
- Corcobado, T. D., & Rubio, G. C. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas: CDP+ Guía Digital*. McGraw Hill.
- Echever, J. C., & Naranjo, C. L. (2016). *Diseño e implementación de un sistema didáctico de generación fotovoltaica de conexión a red, para el Laboratorio de fuentes alternativas*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Electromecánica.
- Erhan, K., Aktas, A., & Ozdemir, E. (2014). Analysis of a Hybrid Energy Storage System Composed from Battery and Ultra-capacitor. *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, 18–20.

- Fahmi, M. I., Rajkumar, R. K., Arelhi, R., & Isa, D. (2015). Study on the effect of supercapacitors in solar PV system for rural application in Malaysia. *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–5.
- GIL, I. (2016). *Diseño de un Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido Basado en Baterías y Supercondensadores para su Integración en Microredes Eléctricas*.
- Glavin, M. E., Chan, P. K. W., Armstrong, S., & Hurley, W. G. (2008). A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 1688–1695. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635510>
- Grbović, P. J., Delarue, P., & le Moigne, P. (2012). Selection and design of ultra-capacitor modules for power conversion applications: From theory to practice. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2*, 771–777. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2012.6258933>
- Grün, T., Smith, A., Ehrenberg, H., & Doppelbauer, M. (2018). Passive Hybrid Storage Systems: Influence of circuit and system design on performance and lifetime. *Energy Procedia*, 155, 336–349.
- Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Información Tecnológica*, 25(2), 175–188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020>
- Jing, W., Lai, C. H., Wong, W., & Wong, M. L. D. (2016). Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrids: A Review. *IET Renewable Power Generation*, 11. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0500>

- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2015). Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. *Applied Energy*, 153, 56–62.
- Mascarós Mateo, V. (2015). *Instalaciones generadoras fotovoltaicas*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science Magazine*, 321(5889), 651–652.
- Mora, J. A. H., García, E. E. G., Moreno, L. M. C., & others. (2017). Análisis teórico y experimental del comportamiento de supercondensadores, baterías de iones de litio y metal hidruro en un sistema solar fotovoltaico aislado. *Redes de Ingeniería*, 173–183.
- Moro Vallina, M. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (2nd ed.). Ediciones Paraninfo, SA.
- Muñoz, O. Q. (2019). *Internet de las Cosas (IoT)*. ibukku, LLC.
- Ning, G., Haran, B., & Popov, B. N. (2003). Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. *Journal of Power Sources*, 117(1–2), 160–169.
- Pandolfo, A. G., & Hollenkamp, A. F. (2006). Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 157(1), 11–27.
- Salazar, A., & Vaca, M. (2014). *DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MONITOREO DE UNA MICROCENTRAL ELÉCTRICA E LICA-FOTOVOLTAICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9469/3/AC-MCT-ESPE-048203.pdf>
- Seim, L. H. (2012). *Modeling, control and experimental testing of a supercapacitor/battery hybrid system: passive and semi-active topologies*.

- Smith, T. A., Mars, J. P., & Turner, G. A. (2002). Using supercapacitors to improve battery performance. *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No. 02CH37289)*, 1, 124–128.
- Sundén, B. (2019). *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. Academic Press.
- Würth Elektronik. (2019). *How to Use Supercapacitors? A Brief Guide to the Design-In Process*. www.we-online.com
- Zhang, C., Min, H., Yu, Y., Wang, Q., & Sun, H. (2015). A new method to optimize semiactive hybrid energy storage system for hybrid electrical vehicle by using pe function. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Zhao, L., Cao, W.-K., & He, Y.-T. (2014). Building equivalent circuit models of lithium-ion battery by means of genetic programming. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 7(3), 275–281.

Anexos