

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA UN TRANSPORTE TURÍSTICO
ACUÁTICO EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA, PROPULSADO POR
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Guzmán Flores Javier Antonio

Director:

MSc. Eliana Carolina Ormeño Mejía

Ibarra - Ecuador

Marzo, 2021

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

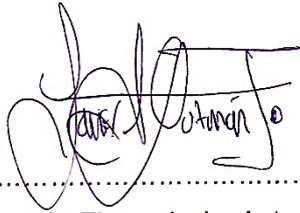
DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD	1003951074
APELLIDOS Y NOMBRES	Guzmán Flores Javier Antonio
DIRECCIÓN	San Blas, parque central/vía al salón de actos culturales
EMAIL	jaguzmanf@utn.edu.ec
TELÉFONO MOVIL	0993159699
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA UN TRANSPORTE TURÍSTICO ACUÁTICO EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA, PROPULSADO POR ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
AUTOR	Guzmán Flores Javier Antonio
FECHA	05/03/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA	Pregrado
TÍTULO POR EL QUE ASPIRA	Ingeniería En Mantenimiento Eléctrico
DIRECTOR	MSc. Eliana Ormeño

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor a terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 05 días del mes de marzo de 2021

EL AUTOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guzmán Flores', written over a horizontal dotted line.

Guzmán Flores Javier Antonio
100395107-4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Eliana Ormeño en calidad de tutor del señor estudiante, Guzmán Flores Javier Antonio certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA UN TRANSPORTE TURÍSTICO ACUÁTICO EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA PROPULSADO POR ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA”**.

Para la obtención del título de ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobado la defensa, impresión y empastado.

ELIANA CAROLINA ORMEÑO MEJIA	Firmado digitalmente por ELIANA CAROLINA ORMEÑO MEJIA Fecha: 2021.03.11 15:48:14 -05'00'
---	---

.....
MSc. Eliana Ormeño
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Esta tesis se lo dedico a mí apreciado padre Gonzalo Guzmán, por haberme ayudado a conseguir este logro académico, ya que con su esfuerzo y dedicación diaria siempre está pendiente de mí porvenir.

A mi querida madre Sandra Flores, que con su práctica de valores me enseñó a superarme día a día y luchar por mis ideales.

A mis hermanos Álvaro, Mónica y Francisco, quienes con su compañía constantemente estuvieron presentes en el transcurso de mi carrera universitaria.

A mi tía Chelita Flores, por brindarme su tiempo y todo el apoyo necesario en cada obstáculo que se me presenta.

A mis amigos cercanos, que sin esperar nada a cambio siempre compartieron cada logro o derrota durante todo este tiempo de mi carrera, ayudándome a conseguir este sueño.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Dios, quien me ha guiado durante todo este período y me ha dado las fuerzas necesarias para lograr culminar esta carrera universitaria.

A la Universidad Técnica del Norte, por haberme acogido y brindarme todo su campo científico, como son: docentes, laboratorios, etc.

De manera especial agradezco a mi tutora, MSc. Eliana Ormeño, que gracias a su excelente preparación académica supo guiarme en la ejecución de la tesis.

A toda mi familia, que continuamente estuvieron pendientes en las actividades que realizaba.

A mis compañeros de aula, que en poco tiempo aprendimos muchas cosas que nos servirán en la vida profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	I
CONSTANCIA	II
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
A.1. CONTEXTUALIZACIÓN.....	XV
A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVI
A.3. JUSTIFICACIÓN.....	XVII
A.4. ALCANCE.....	XVIII
A.5. OBJETIVO GENERAL.....	XIX
A.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIX
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO	
1.1 Energía solar fotovoltaica.....	1
1.2 Paneles solares.....	2
1.2.1 Tipos.....	2
1.2.2 Modelo matemático de un panel fotovoltaico.....	5
1.2.3 Seguimiento de punto de máxima potencia.....	7
1.3 Convertidores.....	8
1.3.1 Conversor Buck (Reductor).....	10
1.3.2 Conversor Boost (Elevador).....	12
1.3.3 Conversor Buck-Boost (Reductor-Elevador).....	14
1.4 Sistemas de almacenamiento de energía.....	19
1.4.1 Tipos.....	20

1.5 Características del barco turístico eléctrico	22
1.5.1 Tipos de motores para barcos.....	22
1.6 Sistemas fotovoltaicos para barcos eléctricos	24
1.6.1 Barco solar con convertidor Buck–Boost.....	24
1.6.2 Barco eléctrico solar.....	26
1.6.3 Barco eléctrico con paneles solares y pilas de combustible hidrógeno.....	28

CAPÍTULO II

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.1 Descripción de softwares	30
2.2 Metodología de cálculo sobre el diseño del barco turístico solar	30
2.3 Esquema del circuito propuesto	31
2.4 Fundamentos para el cálculo del sistema de propulsión	33
2.4.1 Velocidad de carena	34
2.4.2 Resistencia al avance por tonelada.....	34
2.4.3 Potencia del motor	35
2.4.4 Capacidad del sistema de almacenamiento	37
2.4.5 Fundamentos para el cálculo de paneles solares.....	38
2.4.6 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O).....	40
2.4.7 Dimensionamiento del convertor DC/DC Boost.....	41
2.4.8 Dimensionamiento del convertor DC/DC Buck-Boost.....	43
2.4.9 Parámetros del sistema de control	44
2.5 Desarrollo de cálculos para la embarcación solar	45
2.5.1 Cálculo de la potencia requerida.....	45
2.5.2 Determinación del banco de baterías.....	49
2.5.3 Cálculo de paneles solares	51
2.5.4 Cálculo del convertor DC/DC Boost.....	53
2.5.5 Dimensionamiento del convertor DC/DC Buck-Boost.....	55
2.6 Datos de radiación solar.....	56
2.7 Proceso referente al diseño del sistema en MATLAB/Simulink	58

2.7.1 Paneles solares	59
2.7.2 Conversor Boost y control MPPT	60
2.7.3 Sistema de almacenamiento	61
2.7.4 Conversor Buck-Boost	63
2.7.5 Motor de corriente continua.....	64
2.7.6 Mecanismo del sistema de control	66
2.7.7 Ajustes del sistema de control.....	67
2.8 Diseño del barco solar	69
CAPÍTULO III	
SIMULACIÓN DEL SISTEMA	
3.1 Metodología respecto a la simulación del barco turístico solar	71
3.2 Casos de estudio y resultados	72
3.2.1 Primer caso de estudio.....	72
3.2.2 Segundo caso de estudio.....	73
3.2.3 Tercer caso de estudio.....	75
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS	80
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Estructura de un sistema fotovoltaico autónomo.	1
Fig. 2 Circuito equivalente de un panel solar.....	5
Fig. 3 Sistema de un convertor DC.....	8
Fig. 4 Convertor DC/DC Buck: a) Circuito equivalente, b) Modo continuo, c) Modo discontinuo.....	11
Fig. 5 Comportamiento del V y I de la bobina en el convertor Buck.....	12
Fig. 6 Topología del convertor Elevador: a) Diagrama del circuito, b) Modo de operación encendido, c) Modo de operación apagado.	13
Fig. 7 Comportamiento del V y I del inductor en el convertor Boost.....	14
Fig. 8 Señal de conmutación de un interruptor.	14
Fig. 9 Topología clásica de un convertor Buck-Boost: a) Circuito general, b) Estado On, c) Estado Off.....	15
Fig. 10 Topología clásica de un convertor Buck-Boost: a) Circuito general, b) Estado On, c) Estado Off.....	15
Fig. 11 Circuito de un convertor Buck-Boost cuadrático: a) Circuito general, b) Interruptores en On, c) Interruptores en Off.	16
Fig. 12 Topología de un convertor Buck-Boost bidireccional.	16
Fig. 13 Topología de un convertor Buck-Boost bidireccional en modo Buck: a) Esquema general, b) S1=On – S2=Off, c) S1=Off – S2=On.....	17
Fig. 14 Topologías de un convertor Buck-Boost bidireccional en modo Boost: a) S1=Off – S2=On, c) S1=On – S2=Off.	17
Fig. 15 Diagrama del convertor Reductor-Elevador.....	18
Fig. 16 Conexiones de baterías: a) serie y b) paralelo.	19
Fig. 17 Diagrama completo (panel solar, motor y Buck-Boost).....	25
Fig. 18 Topología del barco eléctrico solar.....	27
Fig. 19 Modelo simplificado del sistema de propulsión.....	29
Fig. 20 Circuito general del sistema.	32
Fig. 21 Diseño del barco turístico solar.	33
Fig. 22 Resistencia al avance por tonelada.....	35
Fig. 23 Algoritmo del método P&O.	40
Fig. 24 Formas de onda de Delta corriente y voltaje en convertor Boost.....	42
Fig. 25 Formas de onda de Delta corriente y voltaje en convertor Buck-Boost.....	44
Fig. 26 Diagrama de flujo del ajuste de control PID.....	45
Fig. 27 Resistencia al avance por tonelada.....	46

Fig. 28 Promedio anual de Radiación solar.....	56
Fig. 29 Radiación solar diaria: a) mayor y b) menor.	57
Fig. 30 Promedio anual de temperatura.	57
Fig. 31 Temperatura diaria: a) calurosa y b) frío.....	58
Fig. 32 Circuito del panel solar.....	59
Fig. 33 Tipo de matriz: Canadian Solar C S6X-310P (1 módulo en serie y 4 en paralelo) ...	60
Fig. 34 Conversor Boost.	60
Fig. 35 Modelo de control MPPT.....	61
Fig. 36 Circuito del sistema de almacenamiento.	62
Fig. 37 Circuito del sistema de almacenamiento.	63
Fig. 38 Circuito del conversor bidireccional.	64
Fig. 39 Circuito equivalente a un motor DC fuera de borda.....	64
Fig. 40 Perfil de carga.....	65
Fig. 41 Recorrido turístico de la embarcación.....	65
Fig. 42 Control en cascada del sistema.	66
Fig. 43 Diagrama de bloques del sistema.	66
Fig. 44 Diseño de la simulación final.	70
Fig. 45 Gráficas de resultados del primer caso.	72
Fig. 46 Curvas de corrientes del primer caso.	73
Fig. 47 Cuadro de resultados del segundo caso.	74
Fig. 48 Curvas de corrientes del segundo caso.....	75
Fig. 49 Gráficas de resultados del tercer caso.	76
Fig. 50 Curvas de corrientes del tercer caso.	77

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 PARÁMETROS PRINCIPALES DE PANELES FOTOVOLTAICOS.	2
TABLA 1.2 TIPOS DE PANELES Y COMPOSICIÓN.	3
TABLA 1.3 TIPOS DE PANELES SOLARES.	3
TABLA 1.4 ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DEL MPPT.	7
TABLA 1.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CONVERTORES.	9
TABLA 1.6 MODO DE TRABAJO EN AMBOS CUADRANTES.	18
TABLA 1.7 TIPOS DE BATERÍAS.	20
TABLA 1.8 ESPECIFICACIONES DE LAS BATERÍAS.	22
TABLA 2.1 DIMENSIONES DEL BARCO TURÍSTICO.	32
TABLA 2.2 PESO DEL BARCO.	33
TABLA 2.3 DATOS DEL MOTOR.	48
TABLA 2.4 PRESTACIONES DEL BARCO TURÍSTICO.	48
TABLA 2.5 DATOS DE LA BATERÍA.	49
TABLA 2.6 DATOS DEL PANEL SOLAR.	51
TABLA 2.7 VALORES DE PID PARA EL PRIMER LAZO DE CONTROL.	68
TABLA 2.8 VALORES DE PID PARA EL SEGUNDO LAZO DE CONTROL.	69
TABLA 2.9 VALORES DE DELTA PARA EL CONTROL MPPT.	69

ABREVIACIONES Y TÉRMINOS

AC	Corriente Alterna
AGM	Material de Vidrio Absorbente (Absorbed Glass Material)
DC	Corriente Continua
FV	Paneles Fotovoltaicos
HP	Caballo de Fuerza
MPPT	Seguidor de Punto de Máxima Potencia (Maximum Power Point Tracker)
P-I-D	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Modulación por Ancho de Pulsos (Pulse-Width Modulation)
P&O	Perturbación y Observación
SOC	Estado de Carga

RESUMEN

El incremento de nuevas formas de aplicación de la energía solar, hace que esté presente en distintos ámbitos, tales como: comerciales, industriales, medios de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) y más. La Laguna de Yahuarcocha en la actualidad cuenta con lanchas turísticas, que funcionan con motores de combustión interna, albergando un problema para el lugar, puesto que este tipo de motor para su operatividad consume demasiado combustible. Por esta razón, la investigación de este documento, se realiza con la finalidad de promover el uso de la energía solar en la Laguna de Yahuarcocha, mediante el dimensionamiento de un barco turístico eléctrico solar, utilizando el software MATLAB/Simulink que se encarga de validar el funcionamiento del sistema de control. El procedimiento se ejecuta identificando una topología, tamaño y peso adecuado para el sistema general fotovoltaico de la embarcación, luego se procede a dimensionar los componentes del sistema eléctrico fotovoltaico; en el software se diseña el sistema de propulsión y control con las variables más importantes, considerando diferentes datos de radiación solar y temperatura del lugar; para finalizar, en MATLAB/Simulink se realizan pruebas del diseño propuesto. Los resultados alcanzados respecto al diseño del sistema eléctrico fotovoltaico, reflejan una potencia de generación de 1240 W por parte de la matriz fotovoltaica y una capacidad de almacenamiento de 260 A-h mediante las baterías, llegando a obtener 4880.3 Wh/día de energía, que es suficiente para operar el barco las 4 hora diarias, también se deduce que el sistema de control PID y propulsión están bien dimensionados, debido a que los paneles solares y las baterías proporcionan energía a la carga, según las condiciones climáticas que se requieran.

Palabras claves: Energía solar, barco eléctrico solar, MATLAB/Simulink, sistema fotovoltaico, radiación solar.

ABSTRACT

The increase of new forms of application of solar energy, makes it present in different areas, such as: commercial, industrial, means of transport (land, sea and air) and more. The Yahuarcocha Lagoon currently has tourist boats, which work with internal combustion engines, harboring a problem for the place, since this type of engine consumes too much fuel for its operation. For this reason, the research in this document is carried out in order to promote the use of solar energy in the Yahuarcocha Lagoon, by sizing a solar electric tourist boat, using the MATLAB/Simulink software that is in charge of validating the operation of the control system. The procedure is carried out by identifying a suitable topology, size and weight for the general photovoltaic system of the vessel, then the components of the photovoltaic electrical system are sized; in the software, the propulsion and control system is designed with the most important variables, considering different data of solar radiation and temperature of the place; finally, MATLAB/Simulink tests the proposed design. The results achieved regarding the design of the photovoltaic electrical system reflect a generation power of 1240 W by the photovoltaic matrix and a storage capacity of 260 Ah through the batteries, reaching 4880.3 Wh/day of energy, which is sufficient to operate the boat 4 hours a day, it is also deduced that the PID control and propulsion system are well dimensioned, because the solar panels and batteries provide power to the load, according to the climatic conditions that are required.

Keywords: Solar energy, solar electric boat, MATLAB/Simulink, photovoltaic system, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

A.1. Contextualización.

Alexandre Becquerel, científico francés, descubrió en el año 1839 el efecto fotovoltaico, posteriormente, Auguste Mouchot exhibió en 1878 un motor solar que utilizaba un colector para calentar agua, sin embargo, por su alto costo no tuvo mayor acogida. Las primeras células solares datan en el año 1883, a partir de las investigaciones desarrolladas por Charles Fritts, en ese entonces, estas células presentaban una eficiencia de 1% debido a las propiedades del Selenio (López Sánchez, 2016). Hoy en día la eficiencia de las células fotovoltaicas va en aumento, “SunPower Corporation” una empresa estadounidense, fabrica paneles solares con una eficiencia de 22.7%, cumpliendo con estándares rigurosos de rendimiento y confiabilidad (SunPower, 2018).

En la actualidad, los países con mayor producción de energía solar son: China–130.4 GW, Estados Unidos–85.3 GW, Japón–63.3 GW e India–57.4 GW (Ossa, 2017). Vale recalcar que existen varios países que están aplicando medidas para fomentar el desarrollo de la energía solar, teniendo como finalidad la fabricación, distribución e instalación de esta tecnología y así, poder evitar el uso de energías no renovables.

En el año 2007, en la ciudad de New York, se da a conocer un desarrollo importante de la tecnología solar con la llegada de “Sun21”, donde esta embarcación recorrió alrededor de 11.000 km sin usar carburantes. Así mismo, en el año 2010 el barco ‘PlanetSolar”, valiéndose únicamente de la energía solar (703 paneles solares); consiguió dar la vuelta al mundo, lo que estableció un nuevo récord (Jara et al., 2013).

La primera embarcación solar en el Ecuador, se fabricó en el 2013, fue en la provincia de Galápagos y se la denominó “Solaris”, que sirve como medio de transporte turístico. Para el funcionamiento del motor dispone de 8 paneles solares, su capacidad es de 11 pasajeros y navega a una velocidad de 7 nudos(1.852km/h); su inversión se aproxima a los 15.000 dólares (Jara et al., 2013). De igual manera, en el año 2017 en la Amazonía ecuatoriana, gracias a Skoll Foundation, surge la primera canoa amigable con el medio ambiente denominada “Tapiatpia”; tiene 32 paneles solares, es una canoa tradicional de 16 m de largo y 2 m de ancho, la cual recorre 67 km diarios por los ríos Pastaza y Capahuari (BBC, 2018).

La provincia de Imbabura cuenta con 28 lagunas, entre ellas la Laguna de Yahuarcocha, uno de los lugares turísticos más visitados de la ciudad de Ibarra (Tapia, 2010). Hace 40 años

el transporte turístico acuático da servicio a los visitantes, consta de 4 lanchas a motor, 2 tienen capacidad para 50 personas y 2 pequeñas son de rescate, todas funcionan con gasolina y aceite de dos tiempos; según Rodrigo Valdiviezo propietario del lugar.

Las energías renovables y el desarrollo de nuevas formas de implementación, es un beneficio para la conservación el medio ambiente y economía de la sociedad. De este modo se trata de evitar el uso de hidrocarburos en los distintos tipos de motores que son utilizados en actividades de transporte marítimo o fluvial, teniendo como consecuencia grandes derrames de estos líquidos que afectan su entorno. Un caso extra particular se da en la selva ecuatoriana donde un galón de gasolina cuesta 5 dólares, mientras, que su precio normal es 1.45 dólares. Esto sucede, ya que en esos lugares el producto es escaso o toca transportarlo en avionetas hasta determinados pueblos (Carreira Bello & Sandoval Pina, 2010).

En el transporte acuático, se utiliza diferentes tipos de motores que operan a diésel o a gasolina, pero por cualquier error humano o de sincronización se producen derrames de estos combustibles que contaminan fácilmente los mares, lagunas, ríos, etc. y de igual manera, a las especies de animales que los habitan. Además, la emanación de hidrocarburos es clasificada en el nivel más alto de peligrosidad, por ende es muy perjudicial para el medio ambiente debido a que el humo contiene gases muy tóxicos (CO₂, CO, NO_x) que provocan cáncer en los seres humanos (Adame, 2010).

A.2. Planteamiento del problema.

El magnífico paisaje natural que rodea, la comida típica (según Blanca Narváez Presidenta de la Asociación “San Miguel de Yahuarcocha”, aprox. 100 toneladas de tilapia se consumen al mes), la organización de competencias tanto automovilísticas como acuáticas, transporte acuático y pesca deportiva, son algunos de los atractivos turísticos que nos ofrece la Laguna de Yahuarcocha (Tapia, 2010). Alrededor de 60.000 personas visitan al mes el lugar (Barreno, 2010), de las cuales cerca de 4.000 turistas utilizan la recreación del transporte acuático.

La Laguna de Yahuarcocha considerada como laguna eutrófica, es un vestigio vivo de los tiempos postglaciares (Terneus, 2014), pero en la actualidad existe peligro de que toda su naturalidad vaya desapareciendo, en vista de que soporta una fuerte presión antrópica, como: basura arrojada a orillas del lago, contaminación del agua entrante, construcciones alrededor de la laguna, funcionamiento de lanchas, canoas o motos acuáticas, etc.

Hace cuatro décadas viene funcionando una de las atracciones más llamativas del lugar, el transporte turístico acuático que a la vez su operación es peligrosa debido a que cerca de 300 galones de combustible se consumen al mes (declaró, Rodrigo Valdiviezo, propietario del lugar de recreación), que ponen en peligro la gran biodiversidad de flora y fauna que se destaca en el lugar, entre ellas cuatro variedades de peces: tilapia, carpa, lisa y espada (Tapia, 2010).

Las embarcaciones del lugar funcionan con motores de dos tiempos, estos son pequeños y livianos que tienen gran potencia, pero su rendimiento está penalizado por un elevado consumo real debido a las continuas fugas de combustible, sin quemar por la lumbrera de escape en el momento del cruce de flujos de admisión y escape (De Castro, 2000), es decir, mayor desgaste de elementos y eficiencia menor por eso es gran consumidor de aceite y combustible.

A.3. Justificación.

Hoy en día, la implementación de los paneles solares tiene varias aplicaciones tanto industriales como comerciales, esta tecnología ayuda a crear conciencia social sobre las alternativas sostenibles y, además, a disminuir los impactos ambientales causados por el consumo de combustibles fósiles.

El denominado Protocolo de Kioto, es una de las convenciones internacionales más importantes, tiene como objetivo ayudar a estabilizar la concentración de los gases del efecto invernadero, también evitar que el cambio climático impida con el desarrollo económico o comprometa la producción alimenticia (Garín, 2016).

A partir del 2020 finalizará el Protocolo de Kioto lo que dará paso al Acuerdo de París, se trata de un acuerdo histórico por los elementos que lo integran, su visión de largo plazo y está enfocado a la implementación de acciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación) (Carlino, 2016).

Según el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 "Toda una Vida", en donde el objetivo tres indica que debemos garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, que exija respeto y cuidado a las reservas naturales y ecosistemas frágiles. También el objetivo cinco nos sugiere impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria, que genere valor

agregado en los sectores productivos con enfoque a satisfacer la demanda nacional (SENPLADES, 2017).

La Universidad Técnica del Norte en conjunto con la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, tienen la misión de vincularse a la comunidad con criterios sustentables para contribuir el desarrollo social, cultural y económico. Así, se promoverá a que la calidad de vida de los ciudadanos sea apropiada para poder desempeñarse en cualquier actividad laboral, ya que por falta de conocimientos se están consumiendo muchas fuentes de recursos no renovables que a su vez destruyen al planeta.

Con las consideraciones ya mencionadas, se trata de diseñar un sistema eléctrico solar, que con la ayuda de la tecnología, se logró conseguir energía limpia por medio del potencial del sol. También esta investigación se enfoca en tener un modelo de embarcación solar que evite trabajar con motores de combustión, con la intención de ser un lugar amigable con el medio ambiente.

A.4. Alcance.

El presente trabajo de titulación de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, aplica un estudio investigativo sobre el funcionamiento del transporte turístico acuático con energía solar en Yahuarcocha, con la idea de tener un modelo conveniente y así, poder fomentar el uso de energías renovables.

Para el desarrollo del proyecto, previamente se realizará un estudio detallado del comportamiento de los tipos de paneles fotovoltaicos y motores eléctricos existentes en el mercado, para seleccionar los productos con mayor eficiencia y viabilidad.

Se efectuarán mediciones de radiación solar en el lugar de estudio, con la ayuda de base de datos, instrumentos meteorológicos o diferentes aplicaciones. Además, se realizará diferentes mediciones de una embarcación existente del lugar, ya que se podrá cuantificar la potencia que producirá este sistema; esto ayudará a determinar el número de los componentes del modelo de la embarcación a realizarse.

A continuación, se evaluará el peso que soporta la embarcación, con la finalidad de obtener un cálculo estimado sobre los equipos que integrarán el sistema eléctrico, cabe recalcar, que la potencia del motor eléctrico dependerá de la potencia que puede abastecer los paneles fotovoltaicos instalados en la cubierta. Posteriormente se proyectará la capacidad

de las baterías teniendo en cuenta que existirán dos condiciones de días, estos son: muy soleados, poco soleados. Como último paso se optará por escoger un convertidor o inversor, dependiendo del sistema eléctrico a instalarse.

Como finalidad del proyecto y considerando los requerimientos indispensables, se diseñará el sistema eléctrico con un software donde compruebe que la implementación de energías renovables (en este caso, energía solar) es adecuado para el funcionamiento del transporte acuático en la Laguna de Yahuarcocha.

A.5. Objetivo General.

Diseñar el sistema eléctrico para un transporte turístico acuático en la Laguna de Yahuarcocha propulsado por energía solar fotovoltaica.

A.6 Objetivos Específicos.

1. Estudiar posibles topologías eléctricas, considerando sistemas fotovoltaicos para la propulsión de un barco turístico.
2. Dimensionar el sistema eléctrico y la instalación solar fotovoltaica que permita el funcionamiento del transporte acuático.
3. Simular en un software específico el funcionamiento del sistema eléctrico con los datos conseguidos.

CAPÍTULO I

Marco teórico

El capítulo 1 tiene como objetivo presentar los conceptos básicos referentes a sistemas fotovoltaicos. Se define los componentes que forman parte del sistema y, además, se explica las topologías de interconexión existentes para barcos impulsados con energía solar.

1.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se origina desde el centro del sol, donde la actividad nuclear provoca grandes cantidades de radiación solar y a su vez, se generan los fotones que con el tiempo se precipitan a través del espacio, para finalmente llegar a unos dispositivos semiconductores llamados células fotovoltaicas (Boxwell, 2017).

Los módulos solares producen una corriente entre 2 y 4 amperios a 0.48 V, usando la radiación luminosa, pero dependiendo del voltaje o corriente que se vaya a utilizar, se puede conectar en serie o paralelo (CONELEC, 2008).

Los componentes de un sistema fotovoltaico: Generador fotovoltaico, convertidores o inversores, baterías de acumulación, regulador de carga y consumo; como se indica en la Figura 1 (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015). El número y el tipo de componentes depende de la aplicación en donde se vaya a utilizar el sistema fotovoltaico, ya sea conectado a la red o autónomos (Boxwell, 2017).

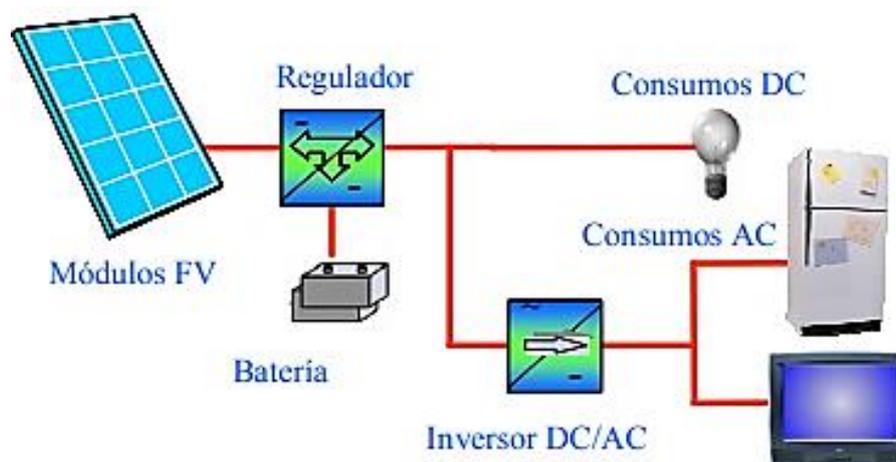


Fig. 1 Estructura de un sistema fotovoltaico autónomo.
Fuente: (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015)

1.2 Paneles solares

Según Creus Solé (2009), los paneles solares se utilizan en los sistemas de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica, en donde transforman de forma directa la radiación solar en electricidad de corriente continua. Además, no contiene partes móviles, ni consume combustibles fósiles y tampoco poluciona. El material semiconductor que se encuentra en las células solares, se utiliza para convertir la luz solar en energía eléctrica, entre los más comerciales tenemos: cristal de silicio (Si), silicio amorfo (a-Si), telurio de cadmio (CdTe), diseleniuro indico de cobre (CuInSe₂), arseniuro de galio (GaAs).

Las partes de un panel fotovoltaico son: Cubierta exterior de vidrio, encapsulante de silicona, lámina de protección exterior, marco metálico, cableado de conexión y diodo de protección (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015). Para escoger un número determinado de paneles solares, se debe tener en cuenta algunos parámetros, que se detalla en la Tabla 1.1:

TABLA 1.1
PARÁMETROS PRINCIPALES DE PANELES FOTOVOLTAICOS.

N.º	Parámetros
1	Potencia del generador
2	Peso
3	Eficiencia
4	Dimensiones
5	Materiales del marco
6	Precio

Fuente: (Carreira Bello & Sandoval Pina, 2010)

La superficie de captación o cantidad de módulos solares, el rendimiento del material semiconductor, la irradiación solar en un determinado tiempo del día y el ángulo sobre el que se proyectan los rayos del sol, son los que determinan la potencia proporcionada del sistema fotovoltaico (Tomás. Perales Benito, 2010).

1.2.1 Tipos

Se puede encontrar diferentes tipos de paneles solares, según su tecnología de composición de las células, se encuentran los más relevantes en la Tabla 1.2:

TABLA 1.2
TIPOS DE PANELES Y COMPOSICIÓN.

Tipos	Composición
Cristalinas	Monocristalinas
	Policristalinas
	Thin film
Amorfas	Capa delgada
Compuestas	Teluro de cadmio
	Cobre, Indio, Selenio
	Arseniuro de galio
Orgánicas	Polímeros

Fuente: (Tomas Perales Benito, 2012)

A continuación, en la Tabla 1.3, se detalla la eficiencia, peso y características principales de los diferentes tipos de paneles solares, que se nombraron anteriormente.

TABLA 1.3
TIPOS DE PANELES SOLARES.

Tipos	Eficiencia	Peso	Características
Monocristalinas	18%	Normal	<ul style="list-style-type: none"> • Estables y poseen una tecnología avanzada. • Fabricación costosa y existe mucho desperdicio del material. • Su fabricación se basa en purificar, fundir y cristalizar el silicio, luego son cortados en finas obleas. • Tienen una estructura ordenada en su totalidad. • Es el mejor y el más caro. • Son de color azul o negro.
Policristalinas	15%	Normal	<ul style="list-style-type: none"> • La fabricación es similar a la monocristalina, solo que se utiliza un silicio de costo menor y, además, disminuye el costo del kilovatio solar. • Son estables y tienen una tecnología moderna. • La estructura es ordenada, por regiones separadas que da resultado su forma cuadrada.
Thin film	6%	Ligero o liviano	<ul style="list-style-type: none"> • Su tecnología es muy prometedora, pero en la actualidad tiene bajas eficiencias. • La relación entre potencia y peso es ventajosa. Así, como también el costo por vatio instalado. • Células solares de capa delgada. • Su precio en el mercado es bajo.

			<ul style="list-style-type: none"> • Óptima para colocación en tejados. • Comparado con los cristalinos, son menos sensibles a las elevaciones de temperatura y a la luz difusa.
Capa delgada	<10%	Liviano	<ul style="list-style-type: none"> • Su coeficiente de absorptividad es mayor al cristalino en el espectro visible. • Se fabrican a temperaturas de deposición bajas entre 200-500°C. • Tiene un espesor menor a 1µm. • Son de capa o película delgada. • Se adaptan a cualquier entorno (relojes, radios, calculadoras). • Trabajan mejor a temperaturas ambiente muy elevadas.
Teluro de cadmio	7%	Liviano	<ul style="list-style-type: none"> • Poseen capa delgada. • Tienen un color verde oscuro. • Logran una alta captación de energía solar, pero su eficiencia es reducida. • Tienen la desventaja acerca de la toxicidad del derivado de cadmio.
Cobre, Indio, Selenio	<10%	Liviano	<ul style="list-style-type: none"> • Son de capa delgada. • Su preparación es más fácil, pero rinden menos. • Económicos y de textura homogénea negra. • Sus cristales modifican la eficiencia.
Arseniuro de galio	27% (Laboratorio)	Normal	<ul style="list-style-type: none"> • Se desarrolla mejor su eficiencia a altas temperaturas. • Presenta problemas de toxicidad de sus componentes. • Alto costo de producción por su material raro y escaso.
Orgánicas	11%	Ligero o liviano	<ul style="list-style-type: none"> • Han mejorado en los últimos años la conversión de energía y vida útil. • Película delgada y flexibilidad. • Aplicación en ventanas, edificios, ropa, maletas, en donde se puedan doblar y llevarlos con facilidad. • Al terminar su vida útil, son fáciles de reciclar.

Fuente: (Rand & Richter, 2014), (Fagua & Bernal, 2015), (Tomás. Perales Benito, 2010), (Fernández Salgado, 2010), (Fonseca, Farias, Duarte, Gonçalves, & Pereira, 2009), (Esteire, Madrid, & Madrid, 2010), (Carta González, 2013), (Urdiales Flores & Espinoza Abad, 2015), (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2010), (De Juana, 2008)

1.2.2 Modelo matemático de un panel fotovoltaico

En la Figura 2, se presenta el circuito equivalente de un panel solar, que consta de un modelo matemático de un diodo con unión p-n, que convierte la radiación solar en energía eléctrica, a esto se llama efecto fotoeléctrico. Los componentes electrónicos de este circuito son: la fuente I_{PH} es la corriente generada a una radiación solar fija, la resistencia Shunt (R_{sh}) indica la pérdida por corriente de fuga, la resistencia Serie (R_s) representa la caída de voltaje a la salida. (Granda et al., 2013)

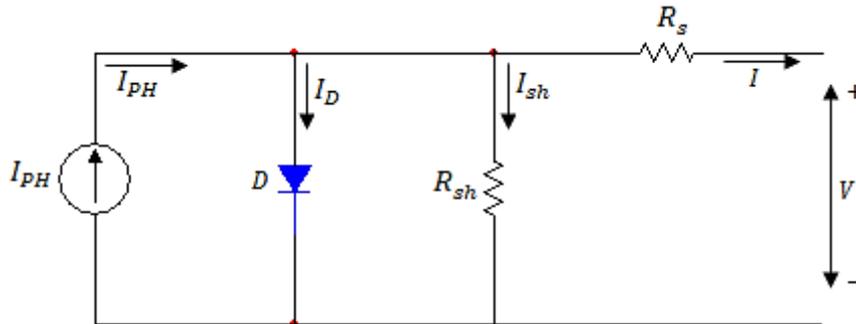


Fig. 2 Circuito equivalente de un panel solar.
Fuente: (Granda et al., 2013)

Aplicando las leyes de Kirchoff de voltaje y corriente del circuito presentado, se deducen en la Ecuación (1) y (2) conforme indica (Vera, Delgado, & Sepúlveda, 2018):

$$I = I_{PH} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I = I_{PH} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A * K * T} \right] \right\} - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

Donde:

I = Corriente de salida del panel solar

I_{PH} = Corriente producida por el panel solar

I_D = Corriente a través del diodo

I_{sh} = Corriente a través de la resistencia

q = Carga del electrón (1.6×10^{-19} C)

A = Factor de dualidad

K = Constante de Boltzmann (1.3805×10^{-23} Nm/K)

T = Temperatura de operación del panel solar

La corriente fotogenerada varía en función de la radiación solar y la temperatura de las celdas presentes, según como se indica en la Ecuación (3):

$$I_{PH} = \frac{R}{R_{ref}} [I_{lref} + U_{lsc} (Tc - Tc_{ref})] \quad (3)$$

Donde:

R = Radiación solar media instantánea

R_{ref} = Radiación solar estándar (1000 W/m²)

I_{lref} = Corriente de cortocircuito ($I_{lref} = I_{sc}$)

U_{lsc} = Coeficiente de temperatura para I_{lref}

Tc_{ref} = Temperatura de trabajo de la celda en condiciones estándar (298°K)

La Ecuación (4), describe que la corriente de saturación inversa del diodo depende también de la temperatura:

$$I_o = I_{o_{ref}} \left(\frac{Tc}{Tc_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{Tc} \right)}{A * K} \right] \quad (4)$$

Donde:

$I_{o_{ref}}$ = Corriente de saturación inversa en condiciones de referencia

E_g = Energía del semiconductor en su banda prohibida o Bandgap

La corriente de saturación inversa en condiciones de referencia, se define con la Ecuación (5):

$$I_{o_{ref}} = \frac{I_{lref}}{\exp \left[\frac{V_{oc}}{N_s * KTA} \right]} - 1 \quad (5)$$

Por lo general, las celdas solares generan 2 W a 5 V, por ello es necesario agruparles en serie o paralelo y así lograr una potencia deseada. La ecuación de una celda fotovoltaica se describe en Ecuación (2), se le agregan los coeficientes N_p (Números de módulos en paralelo) y N_s (Números de módulos en serie). Como resultado se tiene que la Ecuación (6) es de corriente-voltaje de un panel solar:

$$I_{panel} = N_p * I_{PH} - N_p * I_o \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{A * K * T} \right] \right\} - \left(\frac{V \left(\frac{N_p}{N_s} \right) + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (6)$$

La Ecuación (6) se puede reducir a la Ecuación (7), ya que la resistencia Shunt no afecta en la eficacia de una celda solar, debido a que dicha resistencia tiende a ser muy grande o infinita, por lo tanto:

$$I_{panel} = Np * I_{PH} - Np * I_o \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{A * K * T} \right] \right\} - 1 \quad (7)$$

1.2.3 Seguimiento de punto de máxima potencia

De acuerdo con Ávila (2017), el método MPPT consiste en un convertidor DC/DC, ubicado entre el generador de la matriz fotovoltaica y la carga. Este funciona con un algoritmo que fija un ciclo de trabajo con la finalidad de hacer funcionar al sistema de manera eficiente.

Existen métodos o algoritmos que se enfocan en buscar el MPPT, algunos de estos son: Conductancia Incremental, Lógica difusa y Perturbar y Observar (P&O), Hill Climb, redes neuronales, entre otros. En la Tabla 1.4, se presentan más detalles.

TABLA 1.4
ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DEL MPPT.

Algoritmo	Características
Conductancia Incremental	<ul style="list-style-type: none"> Se basa en la siguiente ecuación: $\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$, aquí se iguala a derivada de la potencia a cero. Con la curva P-V del panel se puede afirmar que al existir una pendiente positiva hace que el punto de operación del PV se encuentre a la izquierda del MPP. Si la pendiente es negativa sucede lo contrario. Tiene una respuesta rápida en lazo cerrado, ante los cambios repentinos de radiación solar. Su costo de implementación es medio.
Perturbar y Observar	<ul style="list-style-type: none"> Se conoce como el método de P&O. Su funcionamiento se basa en la modificación del voltaje del PV y en el impacto que genere la potencia de salida. Si dicho cambio, produce aumento en la potencia, la siguiente perturbación continua en esa dirección; caso contrario la dirección la dirección de la nueva perturbación cambia de sentido. Es de baja complejidad y fácil implementación. Costo de implementación es bajo.
Hill Climb	<ul style="list-style-type: none"> Es un método derivado del P&O.

	<ul style="list-style-type: none"> • Aquí se modifica la señal de control del dispositivo semi-controlado empleado en el convertidor estático de potencia. • Presenta las mismas ventajas y desventajas del P&O.
Lógica difusa	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere un modelo matemático en el sistema. • Tiene dos entradas y una salida, la primera entrada se define como el error de la derivada de la potencia respecto al voltaje actual en relación con el momento anterior; la segunda entrada es la variación del error donde permite determinar el lugar del punto de operación del MPP; por el contrario la salida indica la señal de control que se envía al dispositivo semiconductor del convertidor estático de potencia. • Las respuestas que da este sistema es con pocas fluctuaciones en estado estable y ante cambios de radiación solar da una respuesta dinámica rápida. • Costo de implementación es medio.
Redes neuronales	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso matemático complejo, emulando a forma de pensar de los seres humanos. • Tiene como entrada de variables a la radiación solar y temperatura de ambiente. • Su desventaja es la medición de variables medioambientales. • Sus respuestas son rápidas y con menos fluctuaciones, comparado con los anteriores algoritmos. • Su precio de aplicación es alto.

Fuente: Autor

1.3 Conversores

Según Mohan, Undeland, & Robbins (2009), los conversores DC/DC se aplican en sistemas de suministro de energía DC de modo de conmutación y en aplicaciones de accionamientos motrices. En la Figura 3, explica como el voltaje DC que ingresa al convertidor es generalmente no regulado, en razón de que se adquiere de la rectificación del voltaje de línea y debido a sus cambios de magnitud, el voltaje DC tiende a fluctuar. Por eso, la utilización en los sistemas fotovoltaicos ayuda a que el voltaje de salida sea estable y las cargas mejoren su funcionamiento.

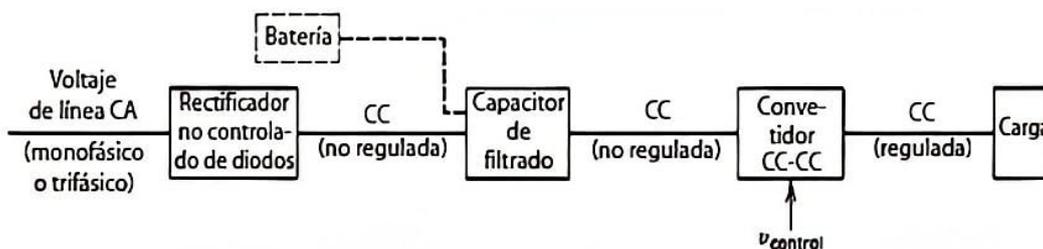


Fig. 3 Sistema de un conversor DC.
Fuente: (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015)

Los convertidores DC/DC son los encargados de transformar un voltaje de corriente continua no regulado, emitida por el panel solar en otras cantidades de voltaje de corriente continua controladas sin modificar la potencia, con la ayuda de condensadores, bobinas y equipos de conmutación. Además, los convertidores se utilizan para hacer el seguimiento del punto de máxima potencia del generador (SPMP) (De Juana, 2008).

Asimismo, para poder controlar estos convertidores, se puede aplicar el método de conmutación por modulación de anchura de pulsos (PWM), donde controla el voltaje de salida por medio de la frecuencia de conmutación y el ajuste del tiempo de duración en encendido del interruptor que controla el voltaje medio de salida (Mohan et al., 2009).

Cuando se utiliza tiristores de conmutación forzada, se puede emplear un tipo de control más general, donde la frecuencia de conmutación y el tiempo de encendido del interruptor son variados, es decir, la frecuencia de conmutación obstaculiza filtrar los componentes de ondulación en las formas de onda de entrada y salida del convertidor. (Mohan et al., 2009)

En consideración a Rashid (2004), los convertidores DC/DC se usan para controlar motores de vehículos eléctricos, tranvías, grúas marinas y elevadores, puesto que utilizan un frenado regenerativo de motores DC para retornar la energía al sistema de generación y esto permite que sistemas que manejen frenados frecuentes tengan un ahorro considerable de energía. Además, proporcionan un control uniforme de aceleración, excelente rendimiento y respuesta dinámica rápida. En la Tabla 1.5, se presentan las principales características técnicas de los convertidores que se debe considerar para su elección:

TABLA 1.5
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CONVERTIDORES.

N.º	Características técnicas	Detalle
1	Tensión nominal de entrada	Valor nominal del voltaje que se aplica al inicio del convertidor.
2	Rango de tensión de entrada	El voltaje de entrada de estar en un rango de máximos y mínimos.
3	Tensión nominal de salida	Es a la salida del convertidor, puede ser fija o ajustable con un potenciómetro.

4	Intensidad nominal de salida	Es la máxima corriente que el convertidor entrega en salida de forma continua.
5	Intensidad máxima de salida	Es el máximo pico de corriente al final del convertidor.
6	Consumo en vacío	El convertidor consume una cantidad mínima, así no haya carga a su salida.
7	Rendimiento	Es la división entre la potencia de salida y potencia de entrada.

Fuente: (Mascarós Mateo, 2016)

Entre las características físicas de los convertidores se tienen: grado de protección IP, peso, dimensiones, etc. También hay las características ambientales que constan de: rango de temperatura de trabajo, humedad, etc. (Mascarós Mateo, 2016).

En la actualidad, existen distintos tipos de convertidores con técnicas de control moderno, escasos componentes y buena eficiencia; permitiendo alterar el voltaje DC a un valor apto para el uso específico es el sistema fotovoltaico, entre los cuales se tienen:

1.3.1 Convertidor Buck (Reductor)

Según Colomo (2013), para conseguir a la salida del circuito un voltaje DC menor o igual que el de entrada, se necesita utilizar en el sistema un convertidor Reductor, que es un tipo de fuente de alimentación conmutada utilizando interruptores semiconductores y componentes donde se almacena energía (Figura 4 a).

Este tipo de convertidores, son utilizados con el propósito de regular o controlar el voltaje de salida que se emitirá a las cargas, dado que a la entrada del circuito existe un voltaje no regulado. Se aplican en los accionamientos de motores que funcionen en el primer cuadrante.

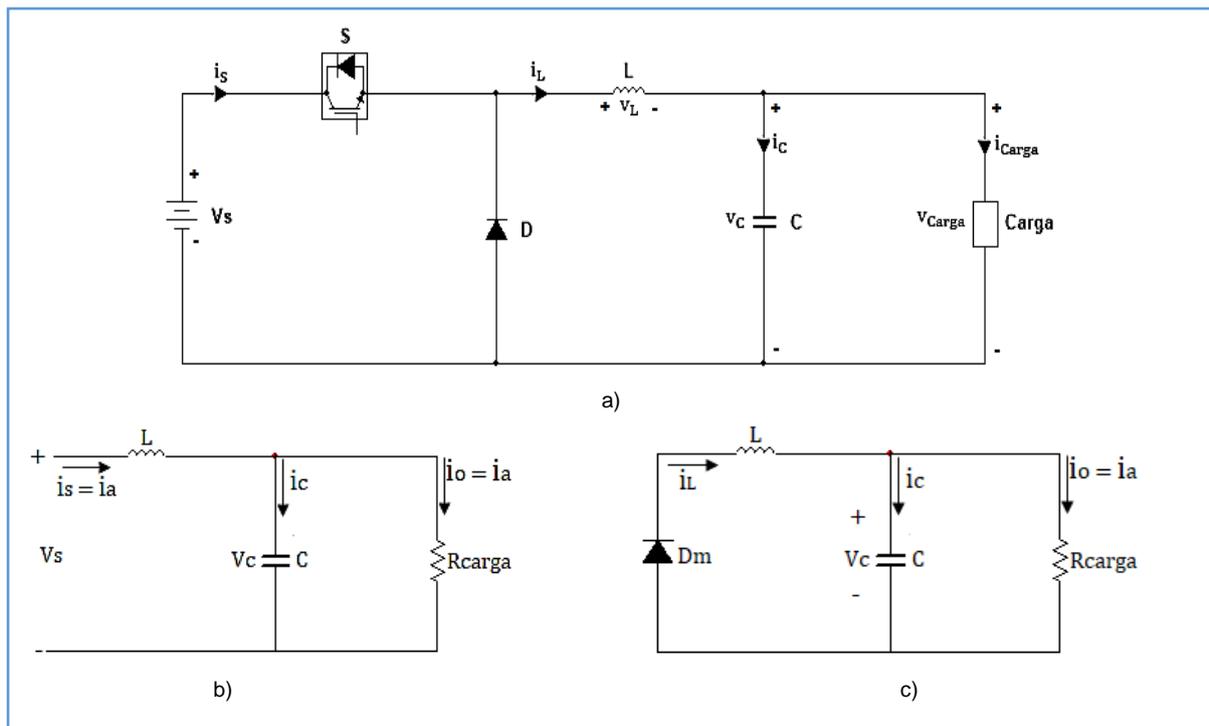


Fig. 4 Conversor DC/DC Buck: a) Circuito equivalente, b) Modo continuo, c) Modo discontinuo
 Fuente: (Mohan et al., 2009)

En cuanto a Rashid (2004), se explica el funcionamiento del conversor; cuando el interruptor está cerrado (On) el voltaje de entrada se conecta directamente a la carga, el Diodo queda bloqueado (polarizado en inversa, debido a que su voltaje es negativo), dando como resultado un voltaje positivo en el inductor (L), que causa un incremento lineal en la corriente de L , C y Carga. Por último la capacidad del capacitor debe quedar elevada para que el voltaje de salida sea constante y no exista interferencias, en el estado de conmutación (Figura 4b).

En cambio, cuando se abre el interruptor la carga se desconecta de la fuente y debido al almacenamiento de forma inductiva, el Diodo comienza a conducir por la energía que existe en el L y la corriente de L continua por L , C , Carga y el Diodo. La corriente de L decae hasta que el interruptor nuevamente se cierra y continua el ciclo (Figura 4c).

Se pueden ver las formas de ondas de voltaje y corriente en la bobina en el estado de conmutación, en la Figura 5:

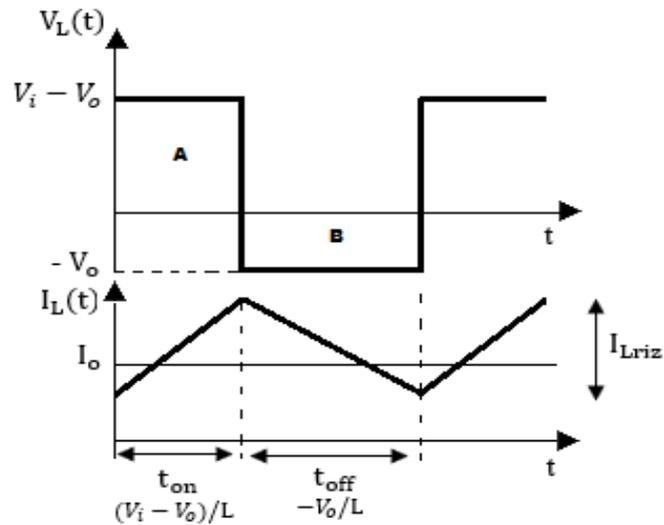


Fig. 5 Comportamiento del V y I de la bobina en el convertor Buck.
Fuente: (Mohan et al., 2009)

1.3.2 Convertor Boost (Elevador)

El circuito del convertor Boost consta de: un capacitor y un inductor; que trabajan como acumuladores de energía permitiendo elevar la corriente que llega del generador y así poder inyectarla en el condensador, con la finalidad de que el voltaje en la carga sea superior al de la fuente. Las aplicaciones de estos convertidores, se encuentran más en las primeras etapas de acondicionamiento de las fuentes de potencia en los sistemas fotovoltaicos (Valderrama, Moreno, & Vega, 2011).

De acuerdo con la Figura 6a, el interruptor es unidireccional en voltaje y corriente, controlado a On y a Off. El diodo obstruye el fenómeno de recuperación inversa ante la alta frecuencia de conmutación propia del convertor. A la salida del convertor existe un voltaje DC que está rizado en función del inductor y del capacitor, con relación a la frecuencia de conmutación.

Al momento de realizar el análisis de funcionamiento, se dictamina dos modos de conducción del convertor: modo continuo que es cuando la corriente que circula por el inductor es $i_L(t) > 0$ y modo discontinuo ocurre cuando la potencia disminuye. Aquí se realizará un análisis de conducción continua donde en el interruptor operan estados de On y Off, de acuerdo al ciclo de trabajo.

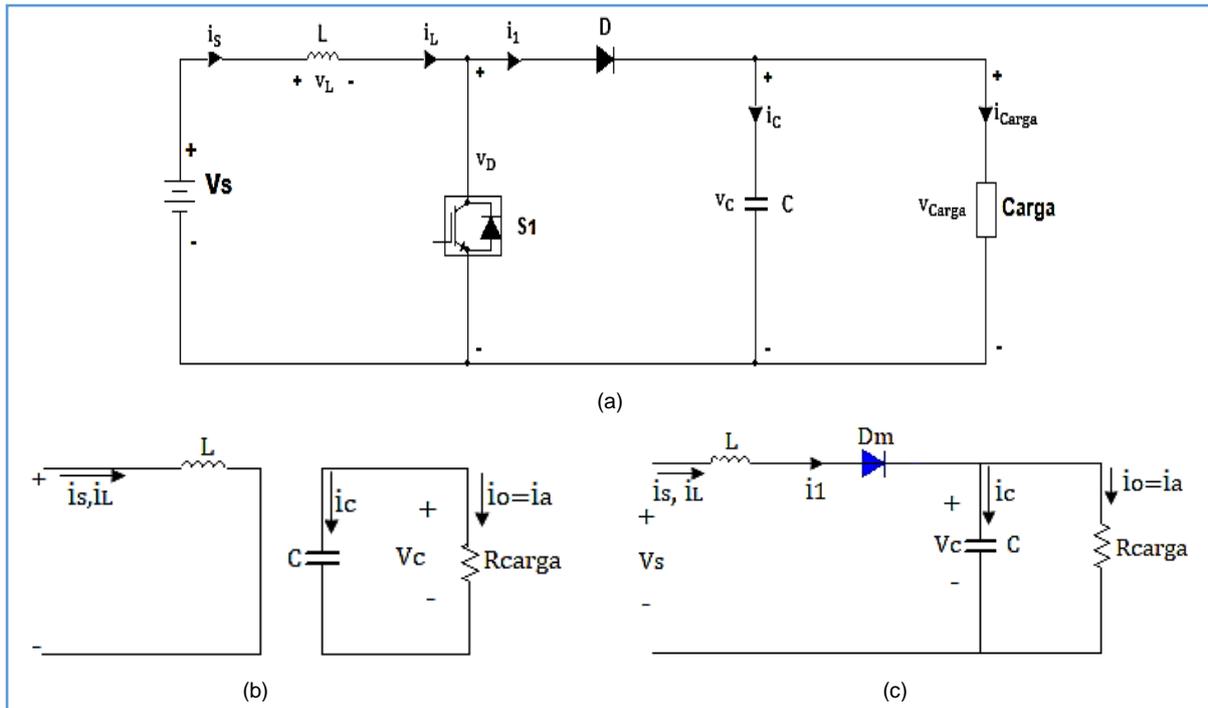


Fig. 6 Topología del convertor Elevador: a) Diagrama del circuito, b) Modo de operación encendido, c) Modo de operación apagado.
Fuente: (Mohan et al., 2009)

En el momento que el interruptor conduce (On), el diodo está polarizado en inversa y actúa bloqueado, aquí la inductancia acumula energía y el condensador mantiene el voltaje de salida; la corriente del inductor crece según la ecuación de una recta, despreciando pérdidas del semiconductor y de la bobina (Figura 6 b).

Cuando el interruptor no conduce (Off) como indica la Figura 6c, la energía almacenada en la bobina impulsa la conducción del diodo y la energía acumulada a la salida la descarga en la secuencia anterior, aquí la corriente en la inductancia disminuye con una pendiente definida porque el voltaje de entrada es menor que de salida (D'Alessio, González, & Cáceres, 2014).

En la Figura 7, se puede observar el comportamiento del voltaje y corriente del inductor tanto en On y Off, en este convertor Elevador.

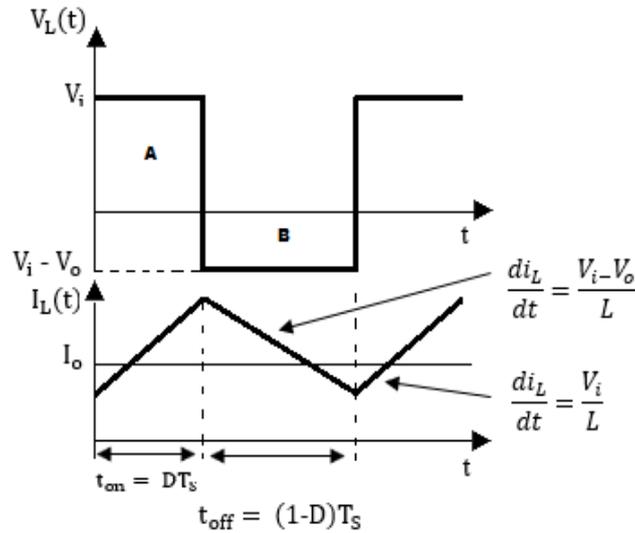


Fig. 7 Comportamiento del V y I del inductor en el convertor Boost.
Fuente: (D'Alessio et al., 2014)

1.3.3 Convertor Buck-Boost (Reductor-Elevador)

Para el análisis de operación de este tipo de convertor se define la misma metodología de los convertidores DC/DC, explicados anteriormente. De acuerdo con Rivera & Cardona (2018), aquí se puede operar en dos cuadrantes, es decir, existen dos estados de operación. El primer estado el interruptor está en modo On durante un periodo de tiempo DT ; en cambio, el segundo estado el interruptor está en modo Off durante un periodo de tiempo de $(1-D)T$. Se define a D como el ciclo de trabajo y T como periodo de conmutación. En la Figura 8, se muestra la señal de conmutación.

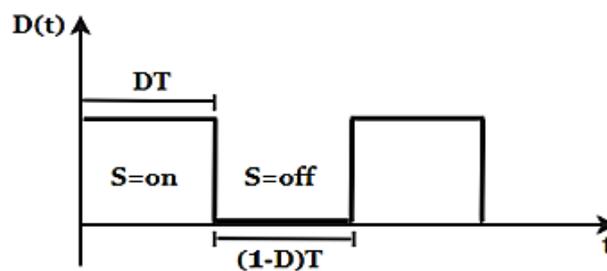


Fig. 8 Señal de conmutación de un interruptor.
Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

De acuerdo con Rivera & Cardona (2018), la topología de un convertor Buck-Boost clásico, se grafica en la Figura 9 donde se puede observar que el circuito está compuesto por elementos como: Inductor, condensador, dispositivo de conmutación, diodo, carga resistiva y fuente DC. Este modelo de convertor puede entregar a la salida un voltaje menor (Buck) o mayor (modo Boost).

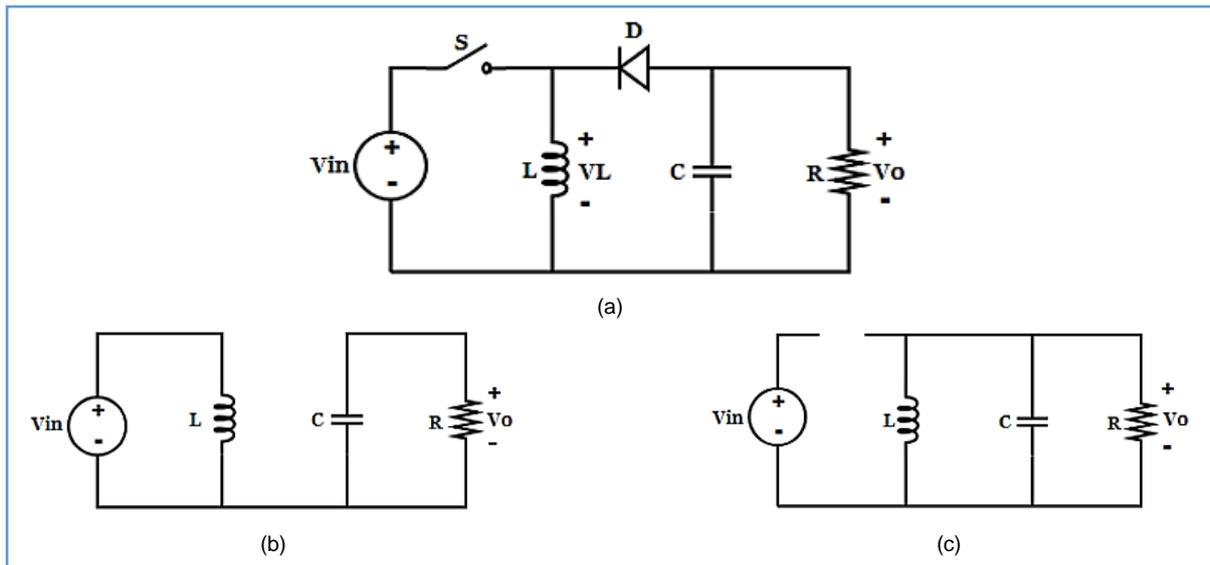


Fig. 9 Topología clásica de un convertor Buck-Boost: a) Circuito general, b) Estado On, c) Estado Off.

Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

Convertor Buck-Boost de dos interruptores, según Rivera & Cardona (2018), su circuito consta de: dos interruptores de potencia, dos diodos, un condensador, un inductor, fuente de voltaje y una carga. El convertor trabaja de forma no inversora en cuanto a la salida del voltaje, por ende siempre entrega un voltaje positivo ya sea menor o mayor al de entrada. Si el ciclo de trabajo es $D < 0.5$ operará en modo Reductor y si $0.5 < D < 1$ trabajará en modo Elevador. Se puede aplicar en diferentes tipos de: vehículos eléctricos y pilas de combustible. En la Figura 10 se indica su topología.

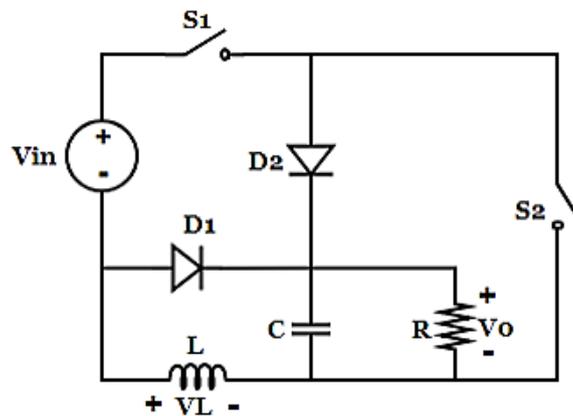


Fig. 10 Topología clásica de un convertor Buck-Boost: a) Circuito general, b) Estado On, c) Estado Off.

Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

Convertor Buck-Boost cuadrático, conforme lo indicado por (Rivera & Cardona, 2018), el circuito está formado por: dos inductores, dos condensadores, dos diodos, dos interruptores, una fuente de voltaje y una carga. Al operar con un ciclo de trabajo $D < 0.5$ su voltaje será menor referente al de entrada y si posee un $D > 0.5$ tendrá un voltaje mayor al de entrada; es

decir, según su ciclo de trabajo este convertor reducirá o aumentará el voltaje de salida, en donde los interruptores trabajan de forma simultánea ya sea en estado On u Off, se detalla en la Figura 11. Su construcción y control es accesible con el usuario. Se aplica en campos que requieran mucha ganancia de voltaje.

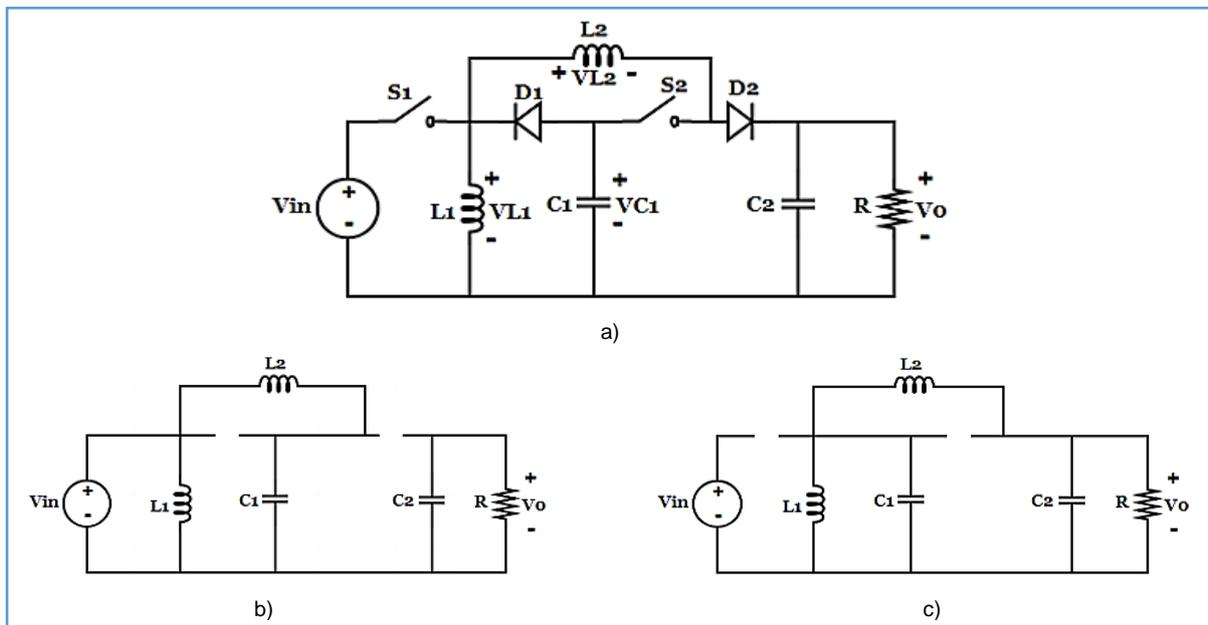


Fig. 11 Circuito de un convertor Buck-Boost cuadrático: a) Circuito general, b) Interruptores en On, c) Interruptores en Off. Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

Conforme lo señalado con Rivera & Cardona (2018), el convertor Buck-Boost bidireccional está compuesto por: un inductor, un condensador, dos interruptores de potencia y dos fuentes de voltaje. Debido a la no presencia de elementos semiconductores, este convertor asegura la circulación de flujo de energía bidireccionalmente, conforme a la Figura 12. Se hace uso en la aplicación de vehículos eléctricos.

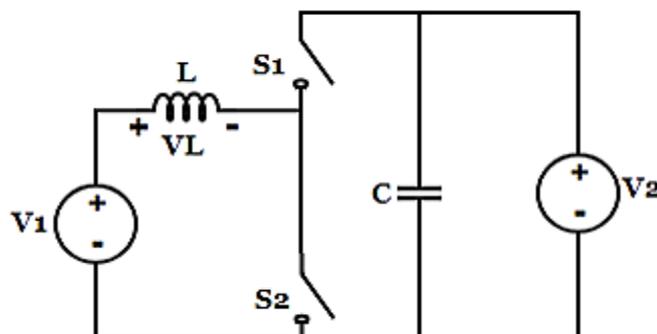


Fig. 12 Topología de un convertor Buck-Boost bidireccional. Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

Su funcionamiento se basa en dos fuentes de voltaje (V_1 y V_2), en cualquier modo de operación solo opera una fuente y la que se anula es reemplazada con una carga, en tanto los interruptores S_1 y S_2 actúan de forma complementaria.

Para el modo Reductor S_1 es el interruptor principal y S_2 auxiliar, la fuente de voltaje es V_2 y la carga se ubica en lugar de V_1 . El flujo de potencia va de derecha a izquierda y su ciclo de trabajo es de $D > 1$. Para más detalles se encuentran en la Figura 13.

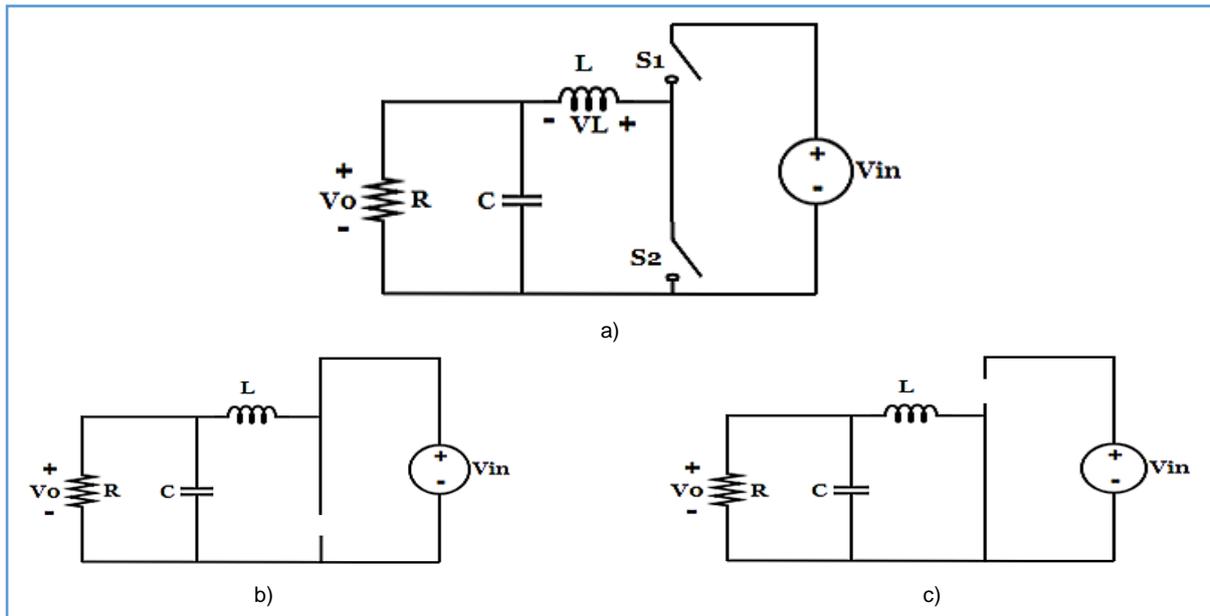


Fig. 13 Topología de un convertidor Buck-Boost bidireccional en modo Buck: a) Esquema general, b) $S_1=On - S_2=Off$, c) $S_1=Off - S_2=On$.
Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

El modo Elevador S_2 es el interruptor principal, por ende S_1 es auxiliar y la fuente de voltaje es V_1 . El flujo de potencia va de izquierda a derecha, siendo su ciclo de trabajo $D < 1$. El circuito general es similar a la Figura 12, los circuitos en sus diferentes modos de operación están en la Figura 14.

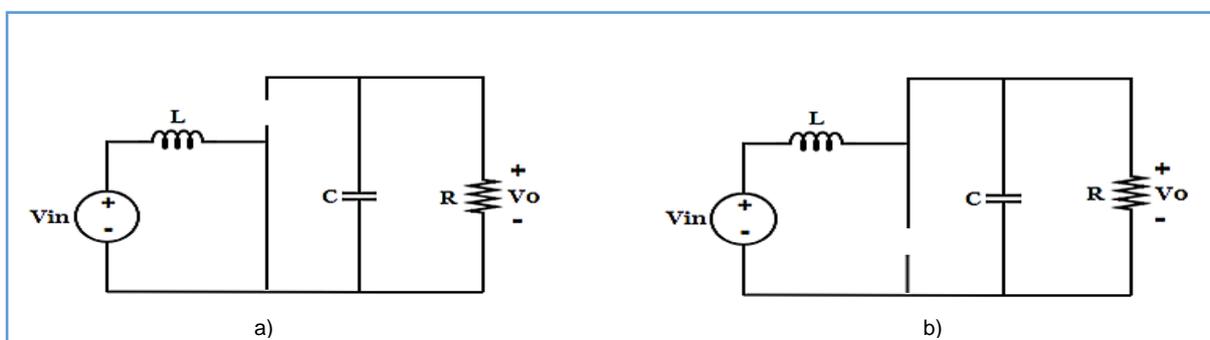


Fig. 14 Topologías de un convertidor Buck-Boost bidireccional en modo Boost: a) $S_1=Off - S_2=On$, c) $S_1=On - S_2=Off$.
Fuente: (Rivera & Cardona, 2018)

Otra explicación sobre el funcionamiento de este convertidor, se puede observar en la Figura 15, en donde el interruptor S1 y el diodo D1 pertenecen al convertidor Buck, en tanto que S2 y D2 corresponden al convertidor Boost. Hay que tener cuidado de no cerrar S1 y S2 al mismo tiempo porque la fuente estaría en cortocircuito (Aguilar, 2005).

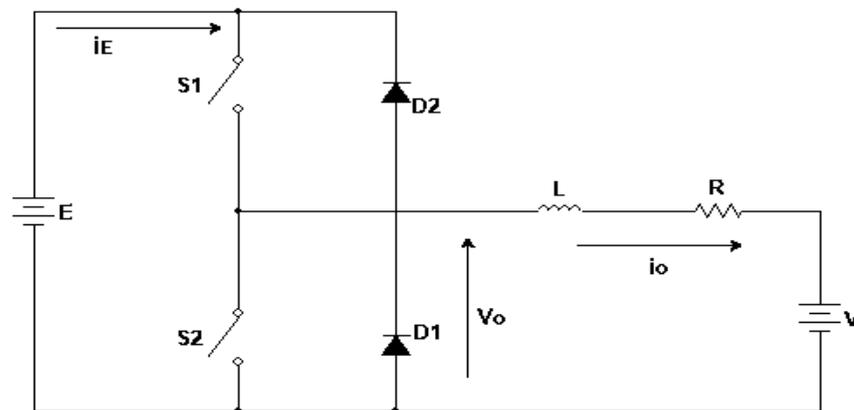


Fig. 15 Diagrama del convertidor Reductor-Elevador.
Fuente: (Aguilar, 2005)

En la Tabla 1.6, se detallan los semiconductores en cada intervalo, los circuitos que conduce la corriente i_o , durante cada ciclo de funcionamiento del convertidor.

TABLA 1.6
MODO DE TRABAJO EN AMBOS CUADRANTES.

Intervalo	Conducción	Circuito	i_o
$t_1 - t_2$	S1 (S1 cerrado y S2 abierto)	Fuente-S1-Carga	Crece exponencialmente desde 0.
$t_2 - t_3$	D1 (S1 abierto y S2 cerrado)	Carga-D1	Decrece exponencialmente hasta 0, por la energía magnética de L.
$t_3 - t_4$	S2 (S1 abierto y S2 cerrado)	Carga-S2	Negativa, forzada por la fuerza contraelectromotriz del motor.
$t_4 - t_5$	D2 (S1 cerrado y S2 abierto)	Carga-D2-Fuente	Negativa, en contra de la batería, corriente regenerativa, forzada por la energía magnética almacenada en la parte inductiva de la carga en serie con f.e.m del motor.

Fuente: (Aguilar, 2005)

1.4 Sistemas de almacenamiento de energía

De acuerdo con Boxwell (2017), los sistemas de almacenamiento de energía o también conocidos como baterías son componentes de gran ayuda en el sistema fotovoltaico, ya que genera energía constante hacia la carga, como también permite acumular dicha energía y regular su paso al momento de ser utilizada, puesto que al tener variaciones de corriente en el sistema no se pueden conectar las cargas de manera directa, porque causarían daños.

De igual manera, en la conexión de los paneles solares, las baterías conectadas en serie aumentan la capacidad y el voltaje de un determinado banco de baterías y sí se conectan en paralelo aumentarán la capacidad, pero mantendrán el voltaje. En la Figura 16, se representan las conexiones.

Las baterías son dispositivos que transforman la energía química en eléctrica o viceversa. Cabe destacar que en instalaciones solares autónomas las baterías cumplen funciones, como: almacenar energía, entregar corrientes elevadas de arranque para el funcionamiento de motores y por último, estabilizar el voltaje nominal (12, 24, 48 V) (Mascarós Mateo, 2016).

Para un mejor funcionamiento del sistema fotovoltaico, es necesario usar baterías de ciclo profundo, puesto que están diseñadas para descargas regulares profundas. En cambio las baterías de arranque utilizadas en automóviles, al momento de arrancar el motor deben tener ráfagas rápidas de descarga, como también recarga inmediata (Burdick & Schmidt, 2017).

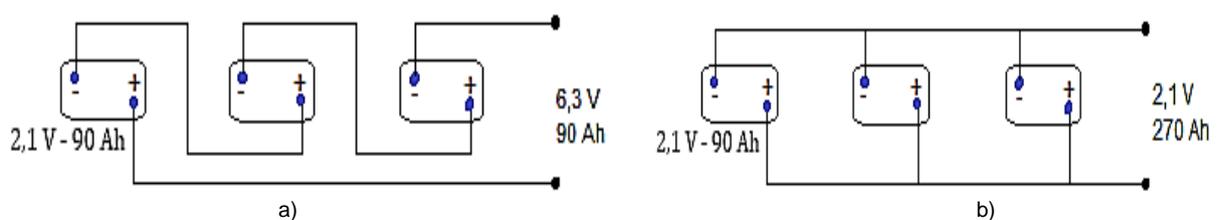


Fig. 16 Conexiones de baterías: a) serie y b) paralelo.
Fuente: (Abella, 2005)

El tiempo de vida útil de la batería, depende de los ciclos de la profundidad de descarga (normalmente son valores del 70 a 80%), es decir, las descargas profundas disminuyen su uso y las descargas superficiales la prolongan, lo mismo sucede con la temperatura.

Con relación al mantenimiento de las baterías, siempre es necesario revisar el nivel de electrolito para no afectar las placas y los terminales deben permanecer limpios y sin corrosión para no tener calentamientos y caídas de tensión (Mascarós Mateo, 2016).

1.4.1 Tipos

La Tabla 1.7, hace referencia a una comparación de los distintos tipos de baterías y que podrían ser utilizados en los sistemas fotovoltaicos.

TABLA 1.7
TIPOS DE BATERÍAS.

Tipo de batería	Ventajas	Desventajas
Plomo - Ácido	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo profundo • Pueden ser descargados y recargados varias veces. • Son de 6 o 12V, pero conectados a los paneles solares pueden crear un banco de baterías más grande. • Son baratas en el mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un peso elevado.
Plomo – Calcio	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajan mejor en niveles de baja carga. • Poco mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su deterioro es menor en el ciclado diario. • Tienen baja autodescarga. • No son buenas al momento de recargar, luego de descargas profundas. • Las descargas repetitivas acortan su vida útil. • En elevadas temperaturas, no trabajan correctamente.
Plomo – Antimonio	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajan mejor en niveles de baja carga. • El Antimonio hace que las rejillas sean más fuertes. • Son de buena profundidad de ciclado. • Su vida útil en altas temperaturas es mayor, que las de Plomo–Calcio. • Tienen elevada autodescarga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su deterioro es menor en el ciclado diario. • El sistema requiere frecuentemente mucha agua.
Litio	<ul style="list-style-type: none"> • Constan de un tamaño fijo. • Trabajan a voltajes fijos, pequeños o muy altos (300 a 500V). • Funcionan conjuntamente con un sistema conectado a la red. • Tienen su controlador individual. • Su sistema es complejo y costoso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su vida útil comienza a deteriorarse a partir de su fabricación. • En algunas condiciones de temperatura tienden a dañarse y no recargarse completamente.

<p>Níquel - Cadmio</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan en instalaciones profesionales, donde el precio no es un parámetro definitivo. • Resisten a descargas profundas (100%) y permanecen mucho tiempo en baja carga sin deteriorarse. • Las grandes sobrecargas no acortan su larga vida útil. • Fácil mantenimiento y mínima autodescarga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Son costosas comparadas con las de Plomo – Ácido. • Tiene problemas al descargarse, ya que su voltaje de salida es constante. • Existe bajo voltaje entre las celdas, por lo que se debe incorporar un mayor número.
<p>Antimonio – Calcio (Híbridas)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Su capacidad ronda los 200Ah. • Aprovecha al máximo el calcio en las placas tubulares positivas y el antimonio en placas planas negativas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vigilar los problemas de estratificación y sulfatación.
<p>Absorbed Glass Mat (AGM)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen el electrolito inmovilizado. • Suministran corrientes elevadas de arranque. • No desperdician el electrolito. • Aptas para lugares donde haya movimiento (carro, embarcaciones, aviones). 	<ul style="list-style-type: none"> • Perceptibles a los métodos de carga, voltajes de regulación y maniobras bajo temperaturas extremas. • Su costo es muy superior con las de Plomo – Ácido. • Tiende a producir descargas profundas que disminuyen su vida útil.
<p>Gel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizan un sistema que ayuda a minimizar el escape de gases y con esto evitan pérdidas de agua. • Al poseer ácido fosfórico mejoran la profundidad de descarga y evitan la oxidación de las rejillas. • Poco mantenimiento y mayor vida útil que las AGM. 	<ul style="list-style-type: none"> • En comparación con las AGM, no son buenas suministrando corrientes elevadas de arranque.
<p>Baterías herméticas (Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para consumos bajos. • La pérdida de electrolito mantenimiento es nulo. • No emiten gases. • Trabajan en cualquier posición y a temperaturas mayores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Carecen de larga vida útil (1700 ciclos a 30% de descarga).

Fuente: (Boxwell, 2017), (Abella, 2005), (Mascarós Mateo, 2016), (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015), (Carreira Bello & Sandoval Pina, 2010), (Tobajas Carlos, 2015)

Las baterías son los componentes más caros de la instalación fotovoltaica, por lo que un factor muy importante a tener en cuenta es su vida útil, que dependen por lo general de: las condiciones reales de cómo trabaja y las características de diseño. En la Tabla 1.8, se

especifica de forma directa el precio, ciclo profundo y el mantenimiento de los diversos tipos de acumuladores de energía (Mascarós Mateo, 2016).

TABLA 1.8
ESPECIFICACIONES DE LAS BATERÍAS.

Tipo	Precio	Ciclo profundo	Mantenimiento
Litio	Alto	Muy bueno	Bajo
Plomo – Ácido	Bajo	Bueno	Alto
Plomo – Antimonio	Bajo	Bueno	Alto
Plomo – Calcio	Bajo	Pobre	Medio
Antimonio – Calcio	Medio	Bueno	Medio
Gel	Medio	Muy bueno	Bajo
AGM	Medio	Muy bueno	Bajo
Níquel – Cadmio	Alto	Bueno	Bajo

Fuente: (Abella, 2005)

1.5 Características del barco turístico eléctrico

Para que la embarcación solar tenga un adecuado funcionamiento, es necesario tener en cuenta varios factores que se explican a continuación.

1.5.1 Tipos de motores para barcos

En la siguiente sección, se describen los diversos tipos de motores que son aplicados en el funcionamiento de las embarcaciones, entre ellos están:

- a) **Motor eléctrico:** Son capaces de transformar gran parte de la energía que absorbe en forma de electricidad, en energía propulsora. Los motores eléctricos poseen una cantidad de piezas móviles notoriamente inferior a los motores de combustión interna, de hecho, a grandes rasgos la única pieza móvil de un motor eléctrico es el rotor, cuya rotación ocurre, en los motores de inducción, sin requerir contacto entre el rotor y el estator, por lo tanto, sin existencia de roce.

Un tipo de pérdidas que se producen dentro de un motor eléctrico corresponden a la energía disipada en forma de calor que genera la circulación eléctrica en los

conductores. Generalmente la eficiencia de un motor eléctrico está entre 85% y 95% (Salas, Luco, & Ekdahl, 2013). Pueden ser de corriente continua o alterna:

- Motor en derivación de DC (Shunt): Sus terminales mantienen una velocidad casi constante para cualquier carga, se debe tener en cuenta el momento cuando se desgasten los cepillos en el campo, ya que hay que cambiarlos para evitar fallas.
 - Motor DC sin escobillas (Brushless): Son adecuadas para el sistema del barco solar, puesto que su velocidad se adapta a la carga del sistema de la embarcación. Comparado con el motor shunt, este motor brushless es más eficiente, menos ruidoso, su vida útil es 2 a 3 veces más y carece de residuos de polvo (Kabir et al., 2016).
 - Motor fuera de borda: Es un tipo de motor eléctrico sin escobillas. Posee un sistema de propulsión para embarcaciones, se los ubica en la popa del barco (parte posterior). Son utilizados en embarcaciones pequeñas, además, tienen la ventaja de ser accesibles en el mercado, mantenimiento a largo tiempo y pueden ser quitados fácilmente para cualquier actividad (Bigorra, 2018).
 - Motor de inducción (Asíncrono): Este tipo de motor requiere un inversor DC/AC, para transformar el voltaje de la batería y de esa manera alimentar a la carga, que en este caso es el motor. Además, se necesita otro componente para controlar su velocidad. No es aconsejable instalar en la embarcación solar, visto que tiene un alto costo y el mantenimiento de su controlador electrónico es complejo (Kabir et al., 2016).
- b) Motor a combustión interna: Se utilizan en naves pequeñas, ya sea por medio de diésel o gasolina. Su desventaja es que tiene escaso rendimiento por la relación de la energía aportada por el combustible y la entregada por la salida del motor. Los motores a diésel tienen un rendimiento de 35 al 40%, a consecuencia de que tienen muchas pérdidas de energía en forma de calor por el rozamiento de sus partes móviles, por lo que estos motores necesitan circuitos de alimentación, refrigeración y enfriamiento (Salas et al., 2013).

1.6 Sistemas fotovoltaicos para barcos eléctricos

Existen varios sistemas, circuitos o topologías de conexión acerca del funcionamiento de los barcos solares, más adelante se describe tres casos muy importantes para el diseño de la investigación.

1.6.1 Barco solar con convertidor Buck–Boost

Acorde con Das, Sadhu, & Chakraborty (2016), presenta en su estudio un sistema de electrificación de un barco basado en energía solar fotovoltaica que consta principalmente de un generador fotovoltaico independiente, además, este generador está asociado a un convertidor Buck–Boost que permite minimizar el sistema eléctrico y adquirir la potencia máxima de la fuente para poder alimentar a una carga de corriente continua en cualquier instante del tiempo.

El diseño está constituido por un motor DC de 1.5 HP suficiente para trasladar 4 pasajeros que pesan 350 kg, la eficiencia del conversor es aproximadamente del 94%, por lo que la entrada del chopper es de 1186 W. Además, se requieren 4 paneles de 300 W.

El chopper trabaja en modo Buck cuando existe voltaje muy alto en el panel solar, si está en el lado inferior el chopper funciona en modo Boost para poder aumentar el voltaje a un valor específico de salida.

La salida del motor está conectada a una hélice, de igual manera el eje del motor se encuentra conectado a otro motor primario del generador a través de acopladores; esto sirve para cuando en la noche no haya energía necesaria, ya que no presenta banco de baterías y tampoco conexión a la red.

Para la simulación en MATLAB/Simulink, los datos son: potencia de PV 300 W, voltaje de circuito abierto (V_{OC}) 44,72 V. Al ser 72 células en serie, el voltaje individual de cada célula es $44.72 \text{ V} / 72 = 0.62 \text{ V}$. La corriente de cortocircuito 8.62 A, dimensiones 77x39x1.5 mm y la insolación solar 1000 W/m^2 .

Para los bloques del subsistema, se conectan 6 células solares en serie, después en otro subsistema se añade 3 en cada serie, dando un total de 18, luego dos subsistemas de 18 se

conectan en serie, por último, se conectan dos subsistemas de 36, lo que da un módulo total de 72 células solares. La Figura 17, indica el diagrama de la simulación del sistema completo.

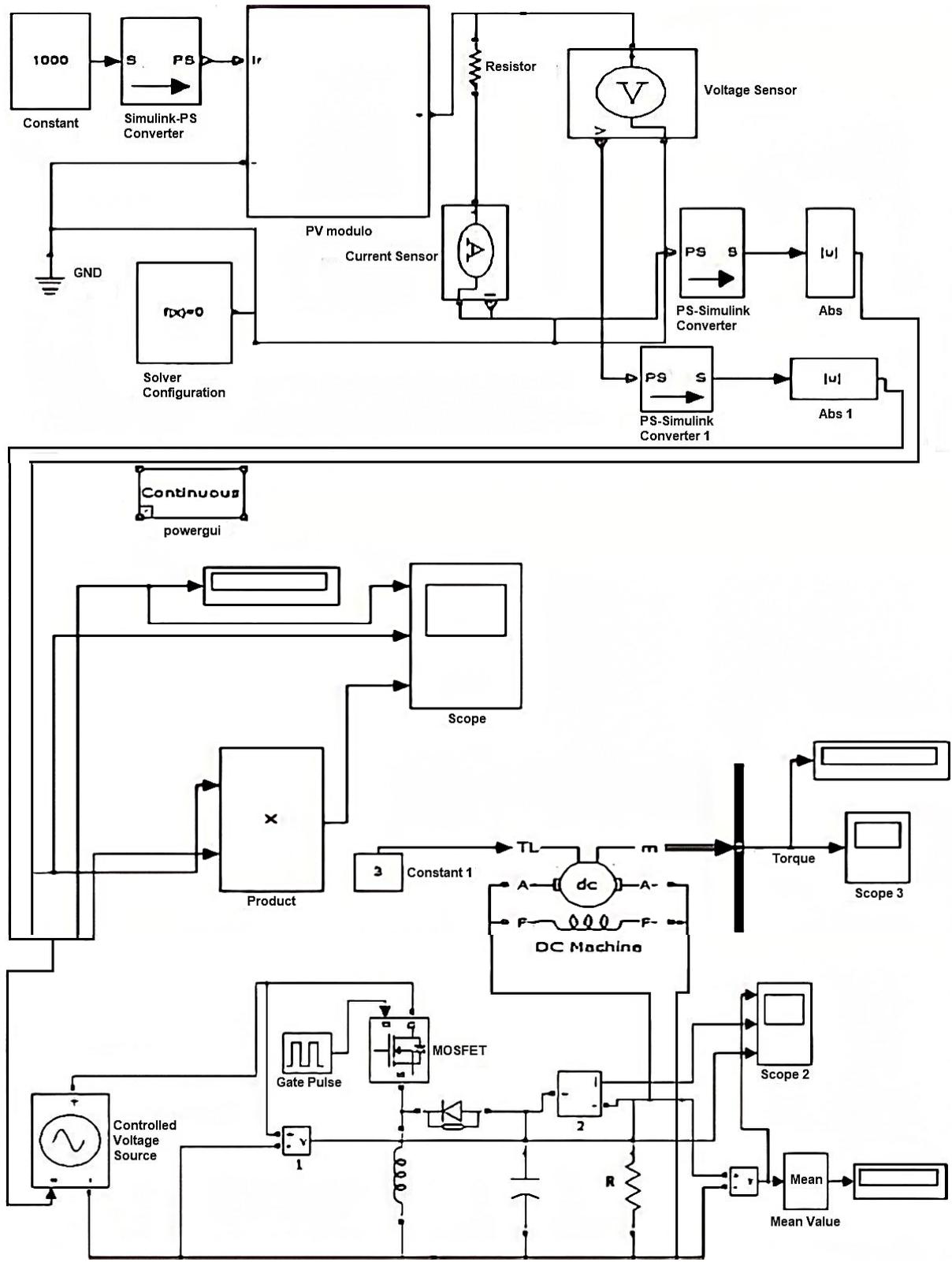


Fig. 17 Diagrama completo (panel solar, motor y Buck-Boost)
Fuente: (Das et al., 2016)

1.6.2 Barco eléctrico solar

El segundo sistema es con base en el artículo científico publicado por Spagnolo, Papalillo, Martocchia, & Makary (2012), donde indica que el barco eléctrico solar a estudiar consta de:

- 42 Paneles solares de 225 W c/u, se conectan 6 cadenas de 7 paneles en serie, voltaje de potencia máxima de salida es 304 V y la corriente de potencia máxima es 31.26 A.
- 52 Baterías de iones de litio (4 bancos) modelo Valence U27-36XP.
- 1 Convertidor Elevador.
- 1 Control de carga y descarga.
- 3 Inversores.
- 2 Motores síncronos de imanes permanentes de 8 kW c/u y sistemas de accionamiento.

Para una navegación segura, se debe considerar que la energía que recibirá la embarcación durante 5 horas es de las baterías, la capacidad de almacenamiento de estas debe ser mayor a 82 kWh, también en el tiempo de atraque se necesita cargar las baterías por lo cual se requiere una red industrial de 400 V en el muelle y de ser rectificadas dicha tensión de red se garantizaría un voltaje DC efectivo de 550 V.

El funcionamiento del sistema se basa en que los motores impulsan a la embarcación y estos son alimentados por baterías recargables. Las baterías cumplen el rol de estar completamente cargadas y en caso de que todas lo estén, el flujo de energía se envía a las cargas a través del controlador de descarga (se encarga de medir el flujo de energía entrante en las baterías) o si es adecuado se envía a la red.

Dadas las consideraciones pertinentes, se estima que la energía de los 42 paneles solares será 11 MWh aproximadamente, es decir, está dimensionado para entregar toda la energía que el barco necesite. Hay que recordar que el consumo diario a generarse en las baterías es igual a la potencia eléctrica mínima 11 kW, y la potencia máxima es 22 kW.

Para la búsqueda del punto máximo de potencia, se debe tomar en cuenta que si la potencia de salida aumenta, esta funciona a la izquierda del punto de máxima potencia y se debe continuar manteniendo la dirección de perturbación para aumentar el voltaje de salida, de lo contrario si la potencia de salida disminuye esta funciona a la derecha del punto de máxima potencia y la dirección de perturbación estará lejos del punto de máxima potencia,

por lo tanto debería cambiar la dirección de perturbación para disminuir el voltaje de salida y de esta manera ajustarlo al sistema.

La topología de este barco eléctrico solar, se indica en la Figura 18.

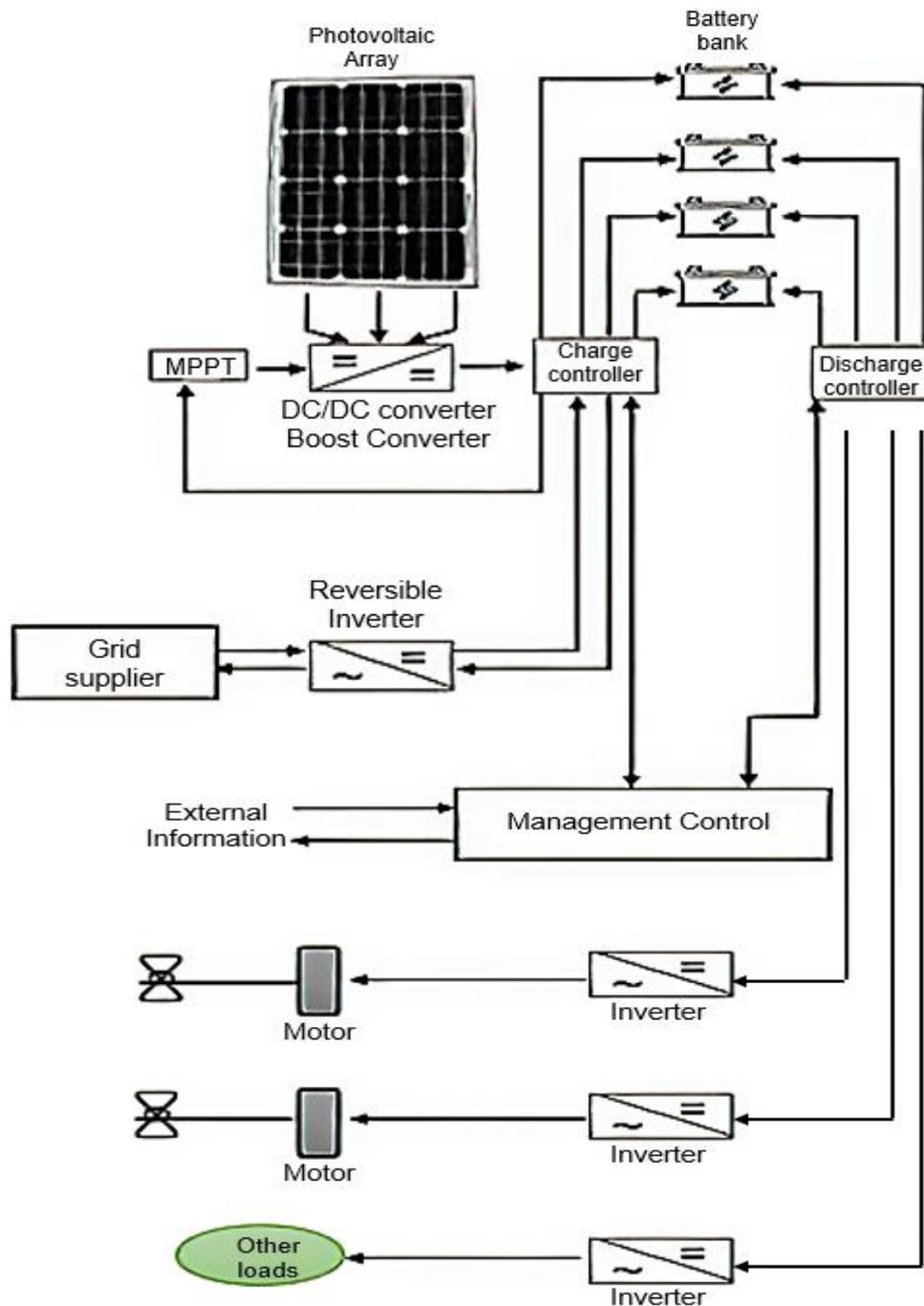


Fig. 18 Topología del barco eléctrico solar.
Fuente: (Spagnolo et al., 2012)

1.6.3 Barco eléctrico con paneles solares y pilas de combustible hidrógeno

Como tercer circuito a describir es el HIDROCAT, desarrollado por Fonseca et al. (2009), donde señala que, es un barco totalmente eléctrico que utiliza energía de tres fuentes: el hidrógeno almacenado a bordo a través de celdas de combustible, la energía solar y la energía almacenada en baterías.

El sistema de propulsión es híbrido y está compuesto por: dos motores DC de 9 kW c/u acoplado a la hélice y su sistema de control, celda de combustible de hidrógeno es de 8 kW, cilindro de presión de 350 bares para almacenar 4.4 kg de hidrógeno, los paneles fotovoltaicos (FV), el sistema de baterías de litio-ferrofosfato con capacidad de 28 kWh y un control de unidad que maneja la producción y uso de energía. La topología de este sistema de propulsión, se representa en la Figura 19.

Se utilizan dos motores eléctricos internos. Estos motores deben tener un control independiente de la velocidad que mejore las capacidades de maniobra del barco.

La pila de combustible de hidrógeno garantiza que la energía esté disponible cuando la irradiación solar es insuficiente debido al uso de los motores durante largos períodos y ayuda a mejorar la autonomía disminuyendo el peso total del sistema por la misma cantidad de energía. Al momento del reabastecimiento de combustible estas pilas son más rápidas que las baterías.

Los FV son de película delgada con una eficiencia del 7% y son utilizadas para la propulsión. Hay que considerar algunas pérdidas, como son: pérdida de potencia del 9% debido a efectos de temperatura, pérdidas del sistema (cables, PV, convertidor) del 10%, pérdida de potencia del 3,5% debido a la reflexión de los paneles. La eficiencia general del sistema es 55%.

Las baterías de litio-ferrofosfato tienen muchas ventajas, por ejemplo: la velocidad de carga es rápida, se puede descargar de forma segura al 100% (recomendable 90%), mayor durabilidad y cuando no opera, la tasa de pérdida de energía es baja. Pero su principal desventaja es su alto costo.

Los sistemas de propulsión se basan en un motor eléctrico externo o interno alimentado por un banco de baterías. En algunos casos, se instalan paneles fotovoltaicos para contribuir a las necesidades energéticas.

Para que el barco pueda navegar de forma ideal, ayudando así a trasladarse a 42 personas en un tiempo de 8 horas y a 8 nudos de velocidad se debe necesitar una potencia de 9700 W, suponiendo que la eficiencia de los motores es el 85%. Al operar con viento adverso la potencia puede subir un 30%, por eso el sistema de propulsión debe tener una reserva de energía.

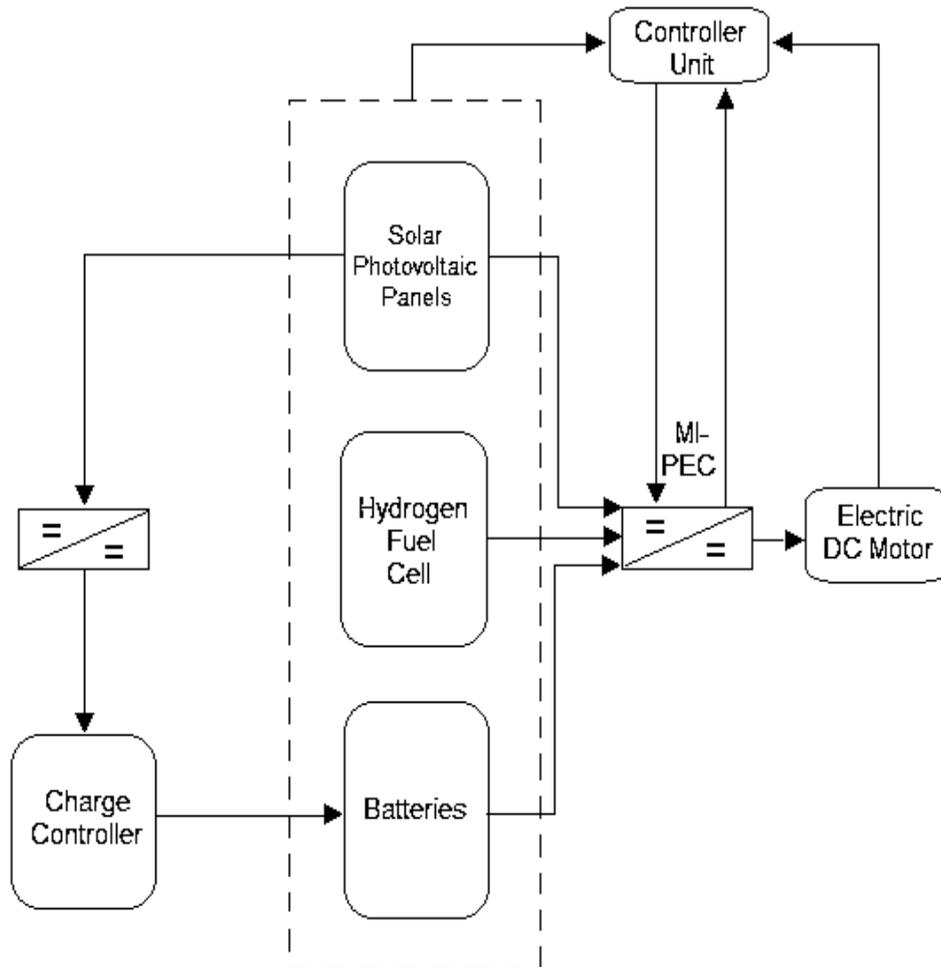


Fig. 19 Modelo simplificado del sistema de propulsión.
Fuente: (Fonseca et al., 2009)

CAPÍTULO II

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

En este capítulo, se tiene como finalidad presentar los cálculos específicos acerca de los diferentes componentes que forman parte del sistema fotovoltaico de la embarcación, como son: cargas, paneles solares, baterías y conversores; de la misma manera se presentan datos de radiación solar. Para finalizar se expone el diseño de cada uno de los componentes del barco solar en el software MATLAB/Simulink.

2.1 Descripción de softwares

En este trabajo de investigación se emplean los siguientes softwares:

- AutoCAD 2020

AutoCAD es un programa que ayuda a la creación o edición de circuitos, planos e imágenes. Es muy utilizado por ingenieros, arquitectos y otros. En esta investigación se utiliza para diseñar los circuitos de los componentes fotovoltaicos y del diseño del barco solar.

- MATLAB & Simulink 2019

MATLAB es un software que permite realizar cálculos técnicos, además, se utiliza para diseñar los sistemas de control que se utilizan en este trabajo. Simulink es una herramienta grafica muy importante de MATLAB que admite modelizar un sistema dinámicamente.

- NSRDB

National Solar Radiation Database es una serie de valores almacenados de datos meteorológicos por un tiempo determinado de algunos lugares del mundo. Aquí se puede encontrar valores, como: temperatura y los diferentes tipos de irradiancia.

2.2 Metodología de cálculo sobre el diseño del barco turístico solar

Para encontrar un diseño adecuado que vaya acorde a los requerimientos pedidos y donde se pueda conseguir los resultados adecuados, se realiza la siguiente metodología que cuenta con los siguientes pasos:

- Estudiar distintas investigaciones acerca de sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento, esto permite escoger una topología del circuito con los componentes convenientes.
- Asimismo, se procede a indagar estudios referentes a embarcaciones de desplazamiento, y así poder tener las dimensiones generales del barco.
- Con las dimensiones de la embarcación ya fijadas, se calcula la potencia del motor, luego se procede a buscar la cantidad de baterías y paneles solares, por último se dimensionan los convertidores. La selección adecuada de estos componentes, está sustentada por los cálculos que se presentarán más adelante, considerando los aspectos importantes.
- Para dar mayor realce a la simulación en el software, se busca obtener datos de irradiación y temperatura de la zona de estudio.
- Una vez que se obtengan todos los datos finales de los cálculos y también de radiación solar, se aplican en el software MATLAB/Simulink para diseñar el modelo del sistema general.
- Conjuntamente se lleva a efecto el ajuste del sistema de control de los PID, aquí se obtienen el valor de las constantes necesarias y apropiadas que servirán para la simulación del sistema, cabe recalcar que estas constantes son fijas para los diferentes casos de estudio.

2.3 Esquema del circuito propuesto

En la Figura 20, se identifica el circuito general con los distintos componentes que se utilizan en el sistema de la embarcación solar.

En donde se tiene: un generador fotovoltaico de energía, que se conecta a un convertidor Elevador y este a un bus DC; por otro lado se tiene a un banco de baterías, que se estarán cargando y descargando, por eso se conecta a convertidor Bidireccional Tipo C, luego este convertidor se une al bus DC. Con los componentes enlazados en el bus DC, se alimenta a la carga o motor DC.

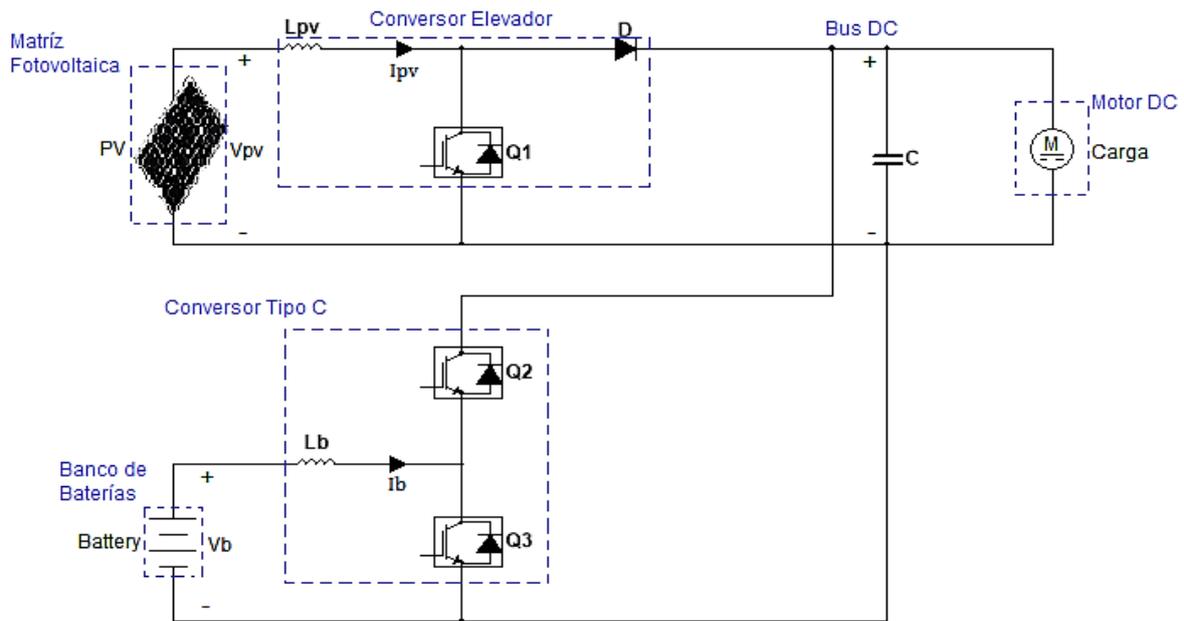


Fig. 20 Circuito general del sistema.

Fuente: Autor

Los datos acerca de la embarcación solar de desplazamiento se basan en (Sánchez, 2013), y se presentan en la Tabla 2.1:

TABLA 2.1

DIMENSIONES DEL BARCO TURÍSTICO.

Dimensiones	Cantidad
Eslora	7 m
Manga	2.5 m
Calado	0.51 m
Desplazamiento máximo	1907.40 kg

Fuente:

En este estudio se considera una embarcación turística (Figura 21), que para desplazarse necesita poca energía, es decir, posee resistencia mínima para su avance y, además, ofrece una cubierta considerable para ubicar los paneles solares. Los paneles solares se colocan en la parte superior plana de la embarcación que tiene una longitud de 6 m y 2.5 m de ancho, dando como el área total a utilizar de 15 m².

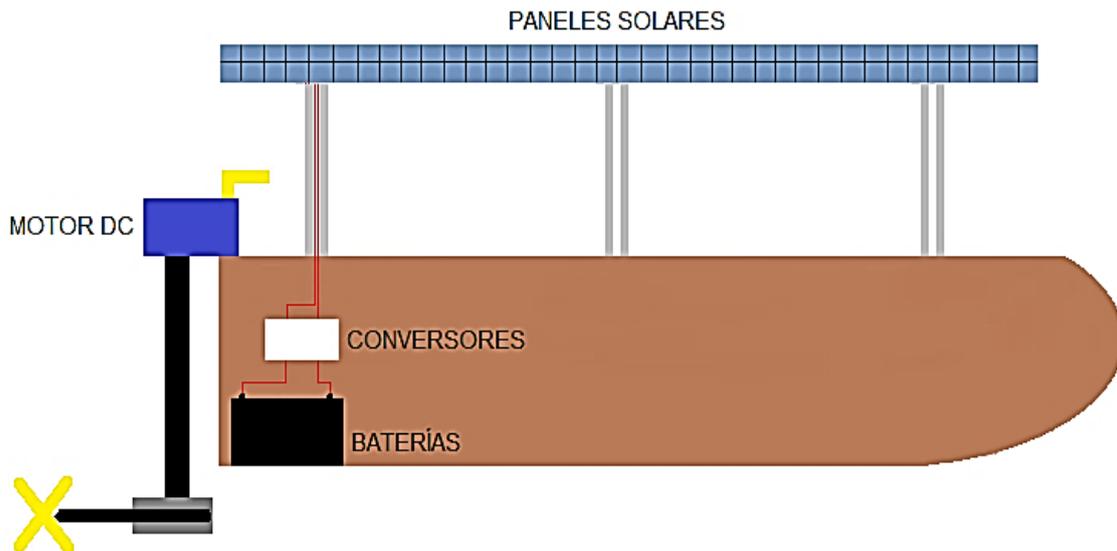


Fig. 21 Diseño del barco turístico solar.
Fuente: Autor

El diseño de la estructura del barco se realiza con materiales avanzados que ayuden a reducir el peso total del sistema. La Tabla 2.2, enumera las características para tener en cuenta.

TABLA 2.2
PESO DEL BARCO.

Cantidad	Detalle	Peso (kg)
1	Estructura	600
9	Pasajeros	720
1	Motor DC	11
4	Paneles solares	88
3	Baterías	174
TOTAL		1593

Fuente: Autor

2.4 Fundamentos para el cálculo del sistema de propulsión

Para establecer la potencia requerida del sistema de propulsión, se procede a determinar con las siguientes ecuaciones, según como indica (Zapata & Chaves, 2012):

2.4.1 Velocidad de carena

Carena es la superficie sumergida del bote, Pierre Gutelle diseñador de embarcaciones dice que todo barco tiene una velocidad máxima en función de su eslora. El grado de velocidad para un bote de desplazamiento va de un rango de 1.34 a 2.4. En la Ecuación (8), se calcula la velocidad de carena:

$$V = R * \sqrt{E_f} \quad (8)$$

Donde:

V = Velocidad de carena

R = Grado de velocidad

E_f = Eslora de flotación

2.4.2 Resistencia al avance por tonelada

En la Figura 22, se puede verificar el cálculo de la Resistencia, que depende de los diferentes grados de velocidad y de la relación desplazamiento/eslora. Esta relación se identifica en la Ecuación (9).

$$\frac{D}{\left(\frac{E_f}{100}\right)^3} \quad (9)$$

Donde:

D = Desplazamiento en toneladas

Sí, V es la velocidad de carena medida en Nudos (kts) y habiendo una Resistencia establecida, indica que:

$$\text{Resistencia} = daN/t$$

Como D es el desplazamiento en toneladas, entonces se obtiene la Ecuación (10):

$$\text{Res} = \text{Resistencia} * D \quad (10)$$

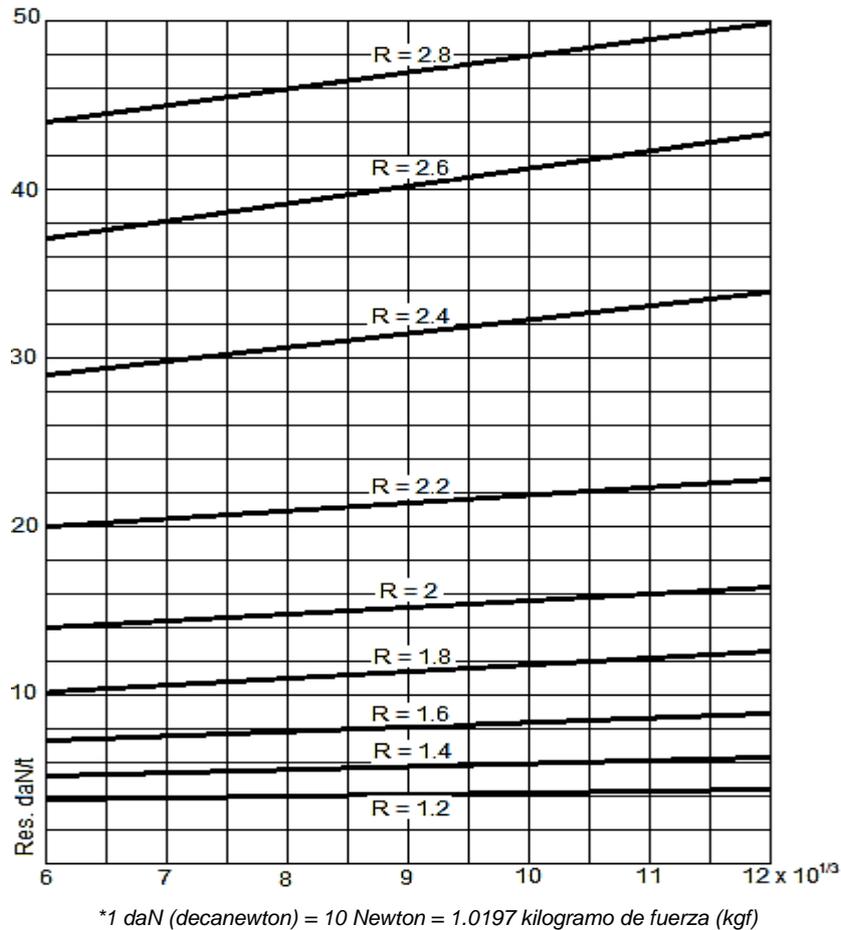


Fig. 22 Resistencia al avance por tonelada.
Fuente: (Zapata & Chaves, 2012)

2.4.3 Potencia del motor

En vista de que la Resistencia corresponde a condiciones normales de navegación, se toma un margen del 25%, se comprueba mediante la Ecuación (11)

$$Res_t = Res * 1.25 \quad (11)$$

Con la Resistencia final al avance ya encontrada, se calcula la potencia en la hélice, utilizando la Ecuación (12):

$$P_h = Res_t * V * 0.005 \quad (12)$$

La eficiencia de propulsión que aplicará la hélice para este tipo de embarcaciones es del 75%. La potencia en el eje, se determina con la Ecuación (13) y será de:

$$P_e = \frac{P_h}{0.75} \quad (13)$$

De igual manera, la Ecuación (14) ayuda a calcular un 6% de pérdidas en engranajes y prensaestopas:

$$P = \frac{P_e}{1 - 0.06} \quad (14)$$

Se estima un porcentaje del 95% por las pérdidas de condiciones de trabajo, con la Ecuación (15) se obtiene la potencia necesaria de propulsión del barco:

$$P_{ot} = \frac{P}{0.95} \quad (15)$$

Por último, con la Ecuación (16) se calcula la potencia requerida por el motor de propulsión, considerando la eficiencia del motor a elegir.

$$P_{mot} = \frac{P_{ot}}{\eta_{motor}} \quad (16)$$

Donde:

η_{motor} = Eficiencia del motor (18% a 56%)

Una vez que se adquiere la potencia solicitada por el sistema de propulsión, se selecciona el motor adecuado para la instalación.

Luego se realizan los cálculos pertinentes para determinar la demanda energética que necesita el barco para poder trasladarse. Con los datos enumerados anteriormente se estima lo siguiente:

- Energía eléctrica media de propulsión durante la navegación diaria, se calcula con la Ecuación (17):

$$E_d = P_{mot} * t_{diario} \quad (17)$$

- Mediante la Ecuación (18), se determina la demanda media de energía de propulsión al año, hay que recordar que el funcionamiento del barco solo es 4 veces por semana y feriados:

$$E_a = P_{mot} * t_{anual} \quad (18)$$

2.4.4 Capacidad del sistema de almacenamiento

Una vez que se conoce el consumo de energía del sistema, se puede determinar la energía requerida en las baterías, siguiendo el procedimiento de (Guamán & Ordóñez, 2014), la cual se hace uso de la Ecuación (19):

$$E = P_{mot} * h * C \quad (19)$$

Donde:

E = Energía requerida

P_{mot} = Potencia final del motor

h = Tiempo diario de navegación

C = Capacidad del motor (50%, por el tiempo de funcionamiento del motor en un día.)

Por medio de la Ecuación (20), se encuentra el dimensionamiento del sistema de almacenamiento A-h, se tiene en cuenta que el voltaje del sistema o bus DC es $V_n = 48$ V.

$$I_s = \frac{E}{V_n} \quad (20)$$

En cuanto a suciedad, envejecimiento y pérdidas en la batería, con la Ecuación (21), se aplica un factor de seguridad:

$$I_{sc} = I_s * 1.2 \quad (21)$$

También se debe tomar en cuenta los días de autonomía, o sea, los días que las baterías no se recargarán. Se considera 2 días. Aplicando la Ecuación (22), se calcula:

$$I_{cnb} = I_{sc} * D_a \quad (22)$$

Para conocer la energía que deben almacenar las baterías, hay que estimar el valor de la profundidad de descarga de la batería a aplicarse. Se determina con la Ecuación (23):

$$I_{cbt} = \frac{I_{cnb}}{P_d} \quad (23)$$

Para conocer de cuántas baterías consta el banco de almacenamiento, previamente se debe calcular el número de baterías en serie y paralelo. Con la Ecuación (24), se encuentra el número total de baterías en paralelo.

$$N_p = \frac{I_{cbt}}{I_{nb}} \quad (24)$$

El número total de baterías en serie, se calcula con la Ecuación (25):

$$N_s = \frac{V_n}{V_{nb}} \quad (25)$$

Con los datos ya conocidos y aplicando la Ecuación (26), se halla el número total de baterías:

$$N = N_p * N_s \quad (26)$$

El área total que utiliza el banco de baterías, se calcula con la Ecuación (27):

$$\text{Área}_{total} = \text{Área } c/u * N \quad (27)$$

2.4.5 Fundamentos para el cálculo de paneles solares

Con los datos obtenidos sobre la capacidad de almacenamiento de las baterías, el siguiente paso, según Zapata & Chaves (2012), es calcular la capacidad de los paneles solares con la Ecuación (28):

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\bar{n}} \quad (28)$$

Donde:

C = Carga media del sistema

\bar{n} = Promedio anual de irradiación solar de Yahuarcocha (Figura 28)

Se aplica un factor de seguridad, donde se valora las pérdidas por suciedad, envejecimiento y pérdidas en la batería. Para esto se emplea la Ecuación (29).

$$I = 1.2 * I_o \quad (29)$$

Se procede a calcular la cantidad de paneles en serie, con la Ecuación (30):

$$N = \frac{V_n}{V_{panel}} \quad (30)$$

La Ecuación (31), sirve para hallar la cantidad de paneles solares en paralelo:

$$M = \frac{I}{I_{panel}} \quad (31)$$

Con los datos calculados anteriormente, mediante el uso de la Ecuación (32), se puede encontrar el número total de paneles solares que ayuden a cubrir la corriente y el voltaje necesario del sistema fotovoltaico:

$$K = \frac{M * N}{E_{fp}} \quad (32)$$

Donde:

K : Número total de paneles

E_{fp} : Factor del funcionamiento de los paneles solares

Al comprobar que la cantidad adecuada de paneles solares, calculados anteriormente cubren con las expectativas de satisfacer tanto la corriente como el voltaje, se procede a calcular la potencia total emitida, con el uso de la Ecuación (33):

$$P_{total} = P_{max} * K \quad (33)$$

Entonces, la energía diaria proporcionada por un PV, se emplea con la Ecuación (34):

$$E_{panel} = P_{total} * HSP * \left(\frac{V_{np}}{V_n} \right) \quad (34)$$

Donde:

P_{total} : Potencia total de los paneles

HSP : Horas solares pico (Figura 28)

V_{np} : Voltaje nominal del panel

V_n : Tensión pico del conversor

De igual manera, aplicando la Ecuación (35), se logra verificar el área total que utilizarán los paneles solares en la cubierta del barco, recalcar que el área de la cubierta es de 15 m²:

$$A_{utilizada} = K * \text{Área } c/u \quad (35)$$

Para concluir, se estima el rendimiento general del sistema, mediante la Ecuación (36):

$$\eta_T = (\eta_{hélice} * \eta_{motor} * \eta_{conducción} * \eta_{batería}) + (\eta_{convertor} * \eta_{conducción} * \eta_{PV}) \quad (36)$$

2.4.6 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O)

De acuerdo con Acevedo Meza, Mendoza García, & Sepúlveda Mora (2017), el método P&O, justifica su funcionamiento modificando el ciclo de trabajo del convertor, es decir, consiste en perturbar (aumentando o disminuyendo) el voltaje de los paneles y observar la potencia resultante, o sea, la extraída por la carga. En otras palabras, si la potencia medida es mayor que la anterior, la perturbación sigue en la misma dirección; si la potencia medida es menor la perturbación, cambia de sentido y si la potencia es cero; significa que está en el máximo punto de potencia. En la Figura 23, se indica el algoritmo modificado del método P&O.

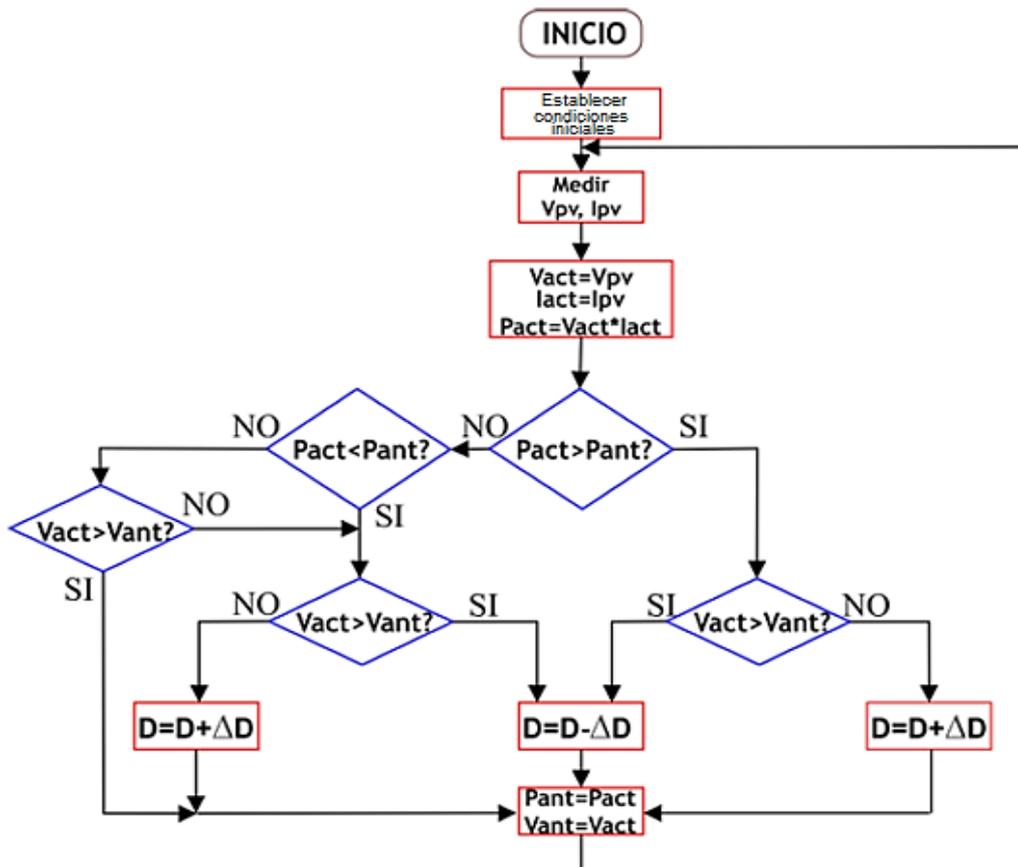


Fig. 23 Algoritmo del método P&O.
Fuente: (Acevedo Meza et al., 2017)

2.4.7 Dimensionamiento del conversor DC/DC Boost

Con los datos señalados anteriormente, se tiene en cuenta que el voltaje que proporciona el sistema fotovoltaico es menor al voltaje del bus DC, por esta razón se elige un conversor DC/DC Boost (Elevador).

El conversor Boost se ajusta a un determinado nivel de voltaje del sistema de generación, con la finalidad de poder alcanzar los 48 V del bus DC, de igual manera, el sentido de la energía del conversor es unidireccional, ya que solo proveerá al bus DC.

Se dimensiona el conversor Elevador siguiendo el procedimiento de Juárez (2009), calculando el ciclo de trabajo que es la relación del tiempo en que la señal está en estado ON y su período. Se despeja la Ecuación (37):

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (37)$$

Donde:

V_o : Voltaje de salida

V_s : Voltaje de entrada

D : Ciclo de trabajo

De igual modo, se calcula la resistencia de la carga despejando la Ecuación (38):

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (38)$$

Donde:

P_o : Potencia de la carga

R : Resistencia de la carga

Con la Ecuación (39), se calcula la corriente de salida del conversor hacia el motor:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (39)$$

Para buscar la inductancia, se siguen los pasos de (Astudillo & Lema, 2017), donde previamente se estima un valor del 3% de rizado de corriente máxima en la bobina o corriente de carga, ese valor contribuye para que el sistema sea estable.

De igual manera, la frecuencia de conmutación debe ser mayores de 20 kHz para disminuir variaciones en la corriente del inductor y menores a 50 kHz para que reducir las pérdidas por conmutación.

Para encontrar la inductancia adecuada, el primero paso es calcular con la Ecuación (40) el rizado de corriente máximo de la bobina, que para este caso es del 3%. Para mejor comprensión se grafica la Figura 24:

$$\Delta i_L = \frac{3 * i_L}{100} \quad (40)$$

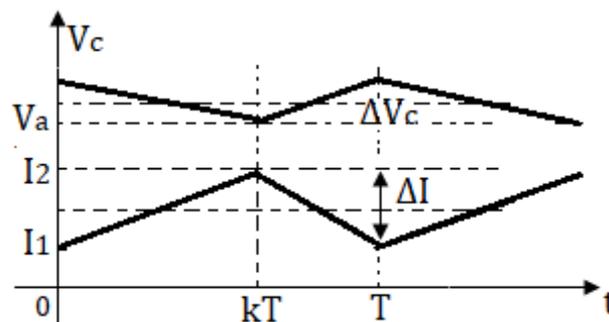


Fig. 24 Formas de onda de Delta corriente y voltaje en convertidor Boost.
Fuente: (Rashid, 2004)

Se procede a calcular la inductancia, aplicando la Ecuación (41):

$$L_{boost} = \frac{V_s * D}{2 * f * \Delta i_L} \quad (41)$$

Donde:

f : Frecuencia de conmutación

Δi_L : Rizado de corriente máxima en la bobina. (3%)

Para encontrar las corrientes de la bobina, se utilizan las ecuaciones de (Juárez, 2009), en donde hace saber que la corriente media de la bobina está dada por la Ecuación (42):

$$I_{L med} = \frac{V_s}{(1 - D)^2 * R} \quad (42)$$

Con la Ecuación (43), se encuentra la corriente máxima del inductor:

$$I_{Lmax} = V_s \left(\frac{1}{(1-D)^2 * R} + \frac{D}{2 * L_{boost} * f} \right) \quad (43)$$

Mientras, que la corriente mínima del inductor está dada por la Ecuación (44):

$$I_{Lmin} = V_s \left(\frac{1}{(1-D)^2 * R} - \frac{D}{2 * L_{boost} * f} \right) \quad (44)$$

Así mismo, para el cálculo del condensador se sigue los cálculos de (Astudillo & Lema, 2017), pero antes se debe fijar un valor de rizo de voltaje, este valor debe ser muy pequeño para no tener alteraciones al momento de medir el voltaje en el bus DC (<1 V), entonces, la capacidad del condensador, se calcula mediante la Ecuación (45):

$$C = \frac{V_s * D}{2 * \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) * R * f} \quad (45)$$

2.4.8 Dimensionamiento del convertor DC/DC Buck-Boost

El convertor DC/DC Buck-Boost (Reductor-Elevador) tipo medio puente, está diseñado para que la batería pueda cargar o descargar al motor. El voltaje de salida del banco de baterías es de 36 V y del bus DC es 48 V.

Se calcula el ciclo de trabajo en el intervalo de $0 < D < 1$, teniendo en cuenta que este convertor no tiene el área establecida de operación. Según Trujillo & Ramos (2014), se debe despejar la Ecuación (46):

$$D = 1 - \frac{1}{\frac{V_o}{V_s}} \quad (46)$$

Para dimensionar el capacitor de este convertor se resuelve las ecuaciones planteadas por (González, Farfán, & Zamora, 2015). En primer lugar, con la Ecuación (47) se da un valor al voltaje de rizado que es del 0.9%, para mejor comprensión se presenta la Figura 24:

$$\Delta V_o = \frac{0.9 * V_o}{100} \quad (47)$$

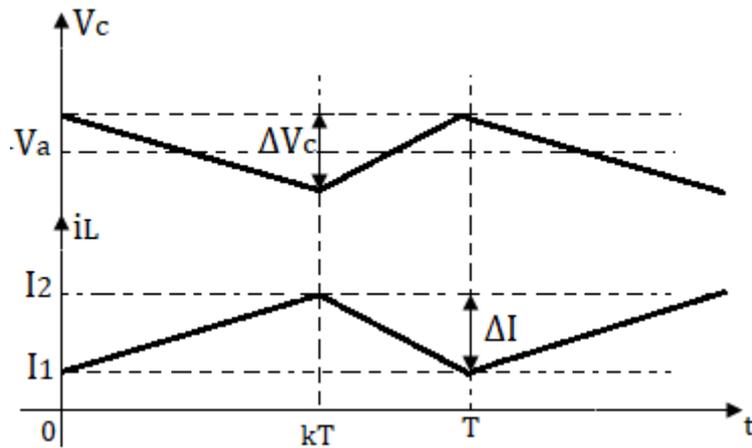


Fig. 25 Formas de onda de Delta corriente y voltaje en convertor Buck-Boost.
Fuente: (Rashid, 2004)

Y el capacitor, se calcula con la Ecuación (48):

$$C = \frac{D * V_o}{\Delta V_o * R * f} \quad (48)$$

Con los datos ya conocidos, se encuentra el inductor para este convertor, por medio de la Ecuación (49):

$$L = \frac{R * (1 - D)^2}{2 * f} \quad (49)$$

La corriente en máxima potencia que pasa por el inductor, se la encuentra aplicando la Ecuación (50):

$$I_{Lmax} = \frac{1}{1 - D} * \sqrt{\frac{P_o}{R}} \quad (50)$$

2.4.9 Parámetros del sistema de control

El procedimiento manual que apoya con la validez de sintonización del PID será de Prueba y Error, que consiste en modificar, ajustar o buscar las ganancias conforme a nuestra experiencia o habilidad de manejar este sistema, de modo que se pueda observar la respuesta. Hay que repetir el método indicado con el fin de obtener los parámetros de control idóneos a las especificaciones de la planta o sistema.

Entonces, el sistema de control en cascada se basa en acciones de control de tipo Proporcional e Integral, que se implementan en este tipo de sistemas eléctricos/fotovoltaicos. En el siguiente capítulo, se indican los ajustes que se llevaron a cabo para que el lazo de control primario o maestro determine la variable voltaje y el lazo de control secundario o esclavo establezca la variable de corriente.

En la Figura 26, se puede observar la configuración del ajuste del control PID para esta investigación.

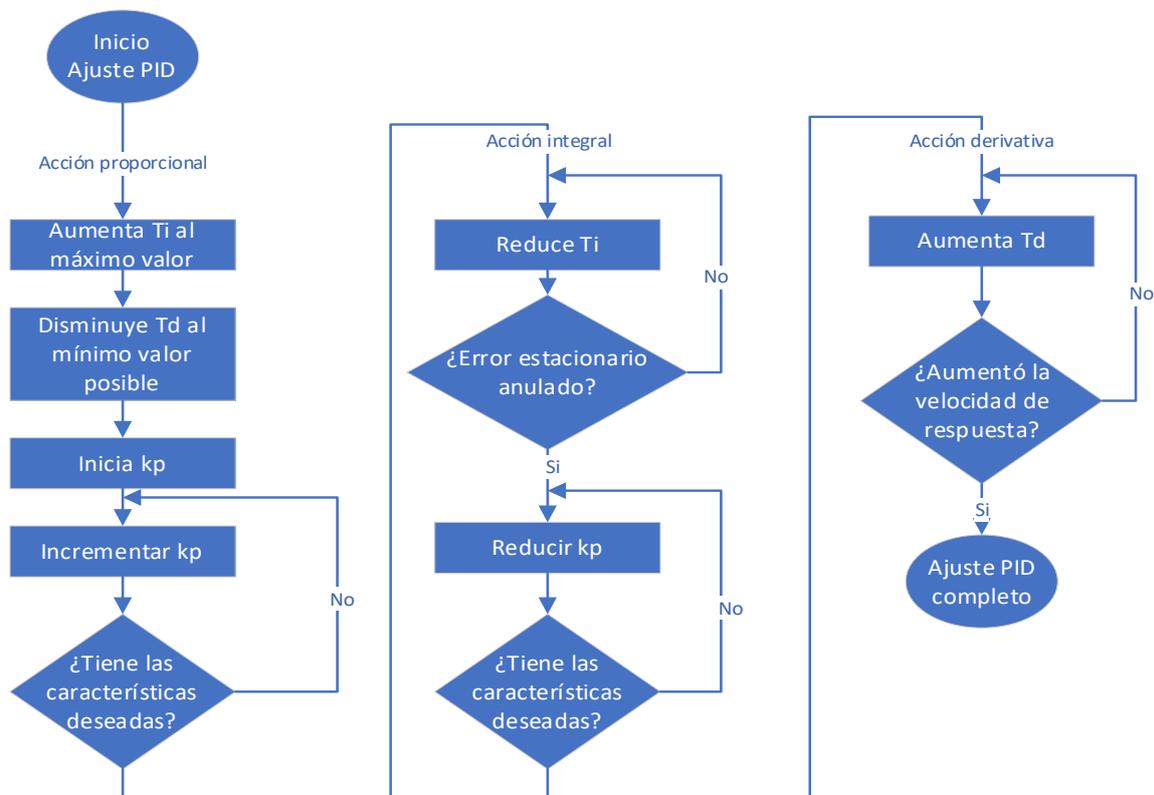


Fig. 26 Diagrama de flujo del ajuste de control PID.
Fuente: Autor

2.5 Desarrollo de cálculos para la embarcación solar

Se procede a calcular las ecuaciones indicadas anteriormente acerca del sistema fotovoltaico.

2.5.1 Cálculo de la potencia requerida

- Cálculo de la Velocidad de Carena

Con la Ecuación (8) y los conceptos detallados, se calcula la velocidad de carena:

$$V = 2 * \sqrt{7m}$$

$$V = 5.29 \text{ kts} \approx 9.8 \text{ km/h}$$

- Cálculo de la Resistencia al Avance por tonelada.

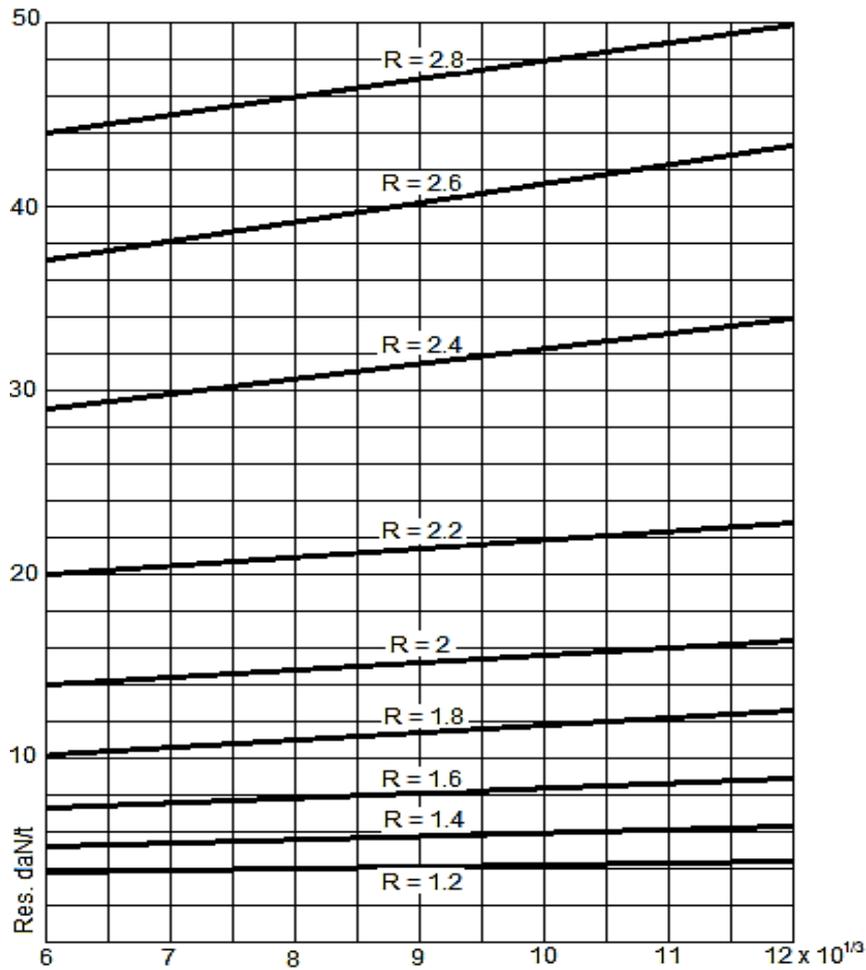


Fig. 27 Resistencia al avance por tonelada.
Fuente: (Zapata & Chaves, 2012)

Lo expresado con la Ecuación (9), se determina lo siguiente:

$$\frac{1.6 \text{ Ton}}{\left(\frac{7 \text{ m}}{100}\right)^3} = 4664.72$$

Sí, $V = 5.29 \text{ kts}$ y $R = 2$, se verifica en la Figura 27, que la Resistencia es igual a:

$$Resistencia = 17 \text{ daN/t}$$

Como $R = 17 \text{ daN/t}$ y $D = 1.6 \text{ Ton}$, entonces con la Ecuación (10), se obtiene:

$$Res = 17 \text{ daN/t} * 1.6 \text{ Ton}$$

$$Res = 27.2 \text{ daN}$$

- Cálculo de la Potencia del motor

Debido a las condiciones que se presentan en la Laguna, se toma un margen de reserva del 25%. Con la Ecuación (11), se calcula:

$$Res_t = 27.2 \text{ daN} * 1.25$$

$$Res_t = 34 \text{ daN}$$

Una vez que se haya encontrado la Resistencia final al avance, con la Ecuación (12) se calcula la potencia en la hélice:

$$P_h = 34 \text{ daN} * 5.29 \text{ kts} * 0.005$$

$$P_h = 0.9 \text{ kW}$$

La hélice aplicará para este caso una eficiencia del 75%. La Ecuación (13) determina la potencia en el eje:

$$P_e = \frac{0.9 \text{ kW}}{0.75}$$

$$P_e = 1.2 \text{ kW}$$

La Ecuación (14) ayuda a calcular las pérdidas en engranajes y prensaestopas, que es el 6%:

$$P = \frac{1.2 \text{ kW}}{0.94}$$

$$P = 1.28 \text{ kW}$$

Se aplica el 95% para las pérdidas por condiciones de trabajo, con la Ecuación (15) se obtiene la potencia de propulsión del barco:

$$P_{ot} = \frac{1.28 \text{ kW}}{0.95}$$

$$P_{ot} = 1.35 \text{ kW}$$

Para concluir, considerando la eficiencia del motor a elegir, con la Ecuación (16) se calcula la potencia requerida por el motor:

$$P_{mot} = \frac{1.35 \text{ kW}}{0.52}$$

$$P_{mot} = 2.6 \text{ kW} \approx 3.5 \text{ HP}$$

Para el sistema de propulsión del modelo de este barco, se utiliza un motor eléctrico en corriente continua. A continuación, se detallan las características en la Tabla 2.3:

TABLA 2.3
DATOS DEL MOTOR.

Categoría	DC
Posición de motor	Fuera de borda
Estilo	Sin escobillas
Cilindros	1
Potencia	800 W / 3.6 HP
Rotación nominal	4000-5000 r/min
Voltaje nominal	48 V
Corriente nominal	19 Ah
Peso c/u	10.5 kg
Velocidad máxima	13 km/h
Batería recomendada	20 Ah
Dimensiones	87x34x21 cm

Fuente: Autor

En la Tabla 2.4, se describen más datos acerca de las prestaciones de navegación de la embarcación.

TABLA 2.4
PRESTACIONES DEL BARCO TURÍSTICO.

Detalle	Cantidad
Número de personas a bordo	8
Velocidad máxima	9.8 km/h \approx 5.29 kts
Distancia de navegación diaria	28 km
Tiempo de navegación diaria	4 horas
Días de navegación anual	195 días
Tiempo de navegación anual	780 horas

*Los días de navegación son los fines de semana y feriados

Fuente: Autor

Con los valores estipulados de las Tablas anteriores, se calculan datos de energía sobre el sistema de propulsión.

- La Ecuación (17), se aplica para calcular la energía eléctrica media durante la navegación diaria:

$$E_d = 2684.52 W * 4 h$$

$$E_d = 10738.08 Wh$$

- A través de la Ecuación (18), se determina la demanda media de energía de propulsión al año. Hay que recalcar que el funcionamiento del barco es 4 veces por semana y feriados:

$$E_a = 2684.52 W * 780 h$$

$$E_a = 2.1 MWh$$

2.5.2 Determinación del banco de baterías

La batería que se presenta a continuación es de tipo Monoblock AGM, puede trabajar a corrientes elevadas en tiempos cortos de forma segura y confiable. Este tipo de baterías es ideal para trabajar en telecomunicación, náutica, etc. La Tabla 2.5, presenta alguna de las características:

TABLA 2.5
DATOS DE LA BATERÍA.

Voltaje (Vo)	12 V
Capacidad normal	260 Ah
Resistencia interna DC	3 m Ω
Profundidad de descarga	80%
Dimensiones	522 mm x 240 mm x 223 mm
Peso	58 kg
Capacidad en C100	260 Ah
Capacidad en C10	200 Ah

Fuente: Autor

Conociendo el consumo de energía del sistema, se puede determinar la energía requerida en las baterías, por la cual se hace uso de la Ecuación (19):

$$E = 2684.52 \text{ W} * 4 \text{ h} * 0.50$$

$$E = 5.37 \text{ kWh}$$

Para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento A-h, se debe considerar el voltaje del bus DC, que es $V_n = 48 \text{ V}$. Por intermedio de la Ecuación (20), se calcula:

$$I_s = \frac{5.37 \text{ kWh}}{48 \text{ V}}$$

$$I_s = 111.88 \text{ A} - h$$

Aplicando la Ecuación (21), se aplica un factor de seguridad:

$$I_{sc} = 111.88 \text{ A} - h * 1.2$$

$$I_{sc} = 134.26 \text{ A} - h$$

Se considera 2 días de autonomía. Aplicando la Ecuación (22), se calcula:

$$I_{cnb} = 134.26 \text{ A} - h * 2$$

$$I_{cnb} = 268.52 \text{ A} - h$$

Se estima la profundidad de descarga de la batería aplicada (80%). Se determina con la Ecuación (23) la energía que deben almacenar las baterías:

$$I_{cbt} = \frac{268.52 \text{ A} - h}{0.8}$$

$$I_{cbt} = 335.65 \text{ A} - h$$

Con la Ecuación (24), se encuentra el número total de baterías en paralelo.

$$N_p = \frac{335.65 \text{ A} - h}{260 \text{ A} - h}$$

$$N_p = 1.29 \approx 1 \text{ baterías en paralelo}$$

El número total de baterías en serie, se calcula por medio de la Ecuación (25):

$$N_s = \frac{36 \text{ V}}{12}$$

$$N_s = 3 \text{ baterías en serie}$$

Se halla el número total de baterías, con la ayuda de la Ecuación (26):

$$N = 1 * 3 = 3 \text{ baterías en total}$$

El área total que utiliza el banco de baterías se calcula con la Ecuación (27):

$$\text{Área}_{total} = (522 \text{ mm} * 240 \text{ mm}) * N$$

$$\text{Área}_{total} = 125280 \text{ mm}^2 * N$$

$$\text{Área}_{total} = 0.12528 \text{ m}^2 * 3 \text{ baterías}$$

$$\text{Área}_{total} = 0.38 \text{ m}^2$$

2.5.3 Cálculo de paneles solares

Calcular la capacidad de los paneles solares con la Ecuación (28):

$$I_o = \frac{134.26 \text{ A} - h/\text{día}}{5.19 \text{ kWh/m}^2/\text{día}}$$

$$I_o = 25.86 \text{ A}$$

Se valora las pérdidas por suciedad, envejecimiento y pérdidas en la batería. Para esto se emplea la Ecuación (29), donde se aplica un 20%.

$$I = 1.2 * 25.86 \text{ A}$$

$$I = 31.03 \text{ A}$$

En consecuencia, de lo antes nombrado, se logra encontrar un modelo de panel solar MAXPOWER CS6X-310P policristalino con características ideales para la generación de energía. En la Tabla 2.6, se observan algunas propiedades:

*

TABLA 2.6
DATOS DEL PANEL SOLAR.

Eficiencia	16.16%
Potencia nominal (Pmax)	310 W

Voltaje de potencia máxima (Vpm)	36.4 V
Corriente de potencia máxima (Ipm)	8.52 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	44.9 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.08 A
Peso	22 kg
Dimensiones	195.4 cm x 98.2 cm x 4 cm
Área	1.91 m ²

Fuente: Autor

Se procede a calcular la cantidad de paneles en serie, por medio de la Ecuación (30):

$$N = \frac{36 V}{36.4 V}$$

$$N = 0.98 \approx 1 \text{ panel en serie}$$

La Ecuación (31), sirve para hallar la cantidad de paneles solares en paralelo:

$$M = \frac{31.03 A}{8.52 A}$$

$$M = 3.64 \approx 4 \text{ paneles en paralelo}$$

Mediante el uso de la Ecuación (32), se puede encontrar el número total de paneles solares que ayuden a cubrir lo necesario:

$$K = \frac{4 * 1}{0.9}$$

$$K = 4.4 \approx 4 \text{ paneles solares}$$

Se procede a calcular la potencia total emitida, con el uso de la Ecuación (33):

$$P_{total} = 310 W * 4 \text{ paneles}$$

$$P_{total} = 1240 W$$

Entonces, la energía diaria proporcionada por la matriz fotovoltaica, se calcula empleando la Ecuación (34):

$$E_{panel} = 1240 W * 5.19 HSP * \left(\frac{36.4 V}{48 V} \right)$$

$$E_{panel} = 4880.3 Wh/día$$

Aplicando la Ecuación (35), se verifica el área total que utilizarán los paneles solares en la cubierta del barco:

$$A_{utilizada} = K * (982 \text{ mm} * 1954 \text{ mm})$$

$$A_{utilizada} = K * 1918828 \text{ mm}^2$$

$$A_{utilizada} = 4 \text{ paneles} * 1.92 \text{ m}^2$$

$$A_{utilizada} = 7.64 \text{ m}^2$$

Para concluir, se estima el rendimiento general del sistema, mediante la Ecuación (36):

$$\eta_T = (0.75 * 0.52 * 0.99 * 0.8) + (0.97 * 0.99 * 0.17)$$

$$\eta_T = 0.31 + 0.16$$

$$\eta_T = 0.47 = 47\%$$

2.5.4 Cálculo del convertor DC/DC Boost

Se dimensiona el convertor Elevador, calculando el ciclo de trabajo. Se despeja la Ecuación (37):

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

$$D = 1 - \frac{36 \text{ V}}{48 \text{ V}}$$

$$D = 0.25$$

De la misma manera, despejando la Ecuación (38), se calcula la resistencia de la carga:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o}$$

$$R = \frac{48^2 \text{ V}}{2684.52 \text{ W}}$$

$$R = 0.85 \Omega$$

Se calcula la corriente de salida del convertor hacia el motor, por intermedio de la Ecuación (39):

$$I_o = \frac{2684.52 \text{ W}}{48 \text{ V}}$$

$$I_o = 55.93 A$$

Para buscar la inductancia, se estima un valor del 3% de rizado de corriente máxima en la bobina, ese valor contribuye para que el sistema sea estable. De igual manera, la frecuencia de conmutación se estimula un valor de 30 kHz.

Para encontrar la inductancia adecuada, el primero paso es calcular con la Ecuación (40) el rizado de corriente máximo de la bobina, que para este caso es del 3%:

$$\Delta i_L = \frac{3 * \frac{2684.52 W}{36 V}}{100}$$

$$\Delta i_L = \frac{3 * 74.57 A}{100}$$

$$\Delta i_L = 2.24 A$$

Se procede a calcular la inductancia, con la ayuda de la Ecuación (41):

$$L_{boost} = \frac{36 V * 0.25}{2 * 30 kHz * 2.24 A}$$

$$L_{boost} = 66.96 \mu H$$

Para encontrar las corrientes de la bobina, se utiliza la Ecuación (42):

$$I_{Lmed} = \frac{36 V}{(1 - 0.25)^2 * 0.85 \Omega}$$

$$I_{Lmed} = 75.29 A$$

A través de la Ecuación (43), se halla la corriente máxima del inductor:

$$I_{Lmax} = 36 V \left(\frac{1}{(1 - 0.25)^2 * 0.85 \Omega} + \frac{0.25}{2 * 66.96 \mu H * 30 kHz} \right)$$

$$I_{Lmax} = 77.53 A$$

Por el contrario, la corriente mínima del inductor está dada por la Ecuación (44):

$$I_{Lmin} = 36 V \left(\frac{1}{(1 - 0.25)^2 * 0.85 \Omega} - \frac{0.25}{2 * 66.96 \mu H * 30 kHz} \right)$$

$$I_{Lmin} = 73.05 A$$

Así mismo, para el cálculo del condensador, se debe fijar un valor de rizo de voltaje, este valor debe ser muy pequeño para no tener alteraciones al momento de medir el voltaje en el bus DC (<1 V). La capacidad del condensador, se calcula mediante la Ecuación (45):

$$C = \frac{48 V * 0.25}{2 * 0.8 V * 0.85 \Omega * 30 kHz}$$

$$C = 294.12 \mu F$$

2.5.5 Dimensionamiento del conversor DC/DC Buck-Boost

Se calcula el ciclo de trabajo, deduciendo que tiene que ser una cantidad <1, teniendo en cuenta que este conversor no tiene el área establecida de operación. Se despeja la Ecuación (46), para hallar D:

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

$$D = 1 - \frac{48 V}{36 V}$$

$$D = 0.25$$

Con la Ecuación (47) se da un valor al voltaje de rizado que es del 0.9%, entonces:

$$\Delta V_o = \frac{0.9 * 48 V}{100}$$

$$\Delta V_o = 432 mV$$

Y el capacitor, se calcula con la Ecuación (48):

$$C = \frac{0.25 * 48 V}{432 mV * 0.85 \Omega * 30 kHz}$$

$$C = 1.09 \mu F$$

Se encuentra el inductor para este conversor, por medio de la Ecuación (49):

$$L = \frac{0.85 \Omega * (1 - 0.57)^2}{2 * 30 kHz}$$

$$L = 7.97 \mu H$$

La corriente en máxima potencia que pasa por el inductor, se la encuentra por medio de la Ecuación (50):

$$I_{Lmax} = \frac{1}{1 - 0.57} * \sqrt{\frac{2684.52 W}{0.85 \Omega}}$$

$$I_{Lmax} = 74.93 A$$

2.6 Datos de radiación solar

Los datos de radiación solar de la Laguna de Yahuarcocha, se toma como referencia de Nacional Solar Radiation Database, en donde se hizo un análisis estadístico de irradiación global y temperatura mediante datos meteorológicos del lugar (NSRDB, 2019). En los siguientes literales, se detallan datos de radiación solar y temperatura.

a) Radiación Solar

Se puede verificar en la Figura 28, el promedio anual de radiación solar del año 2019, en donde se tiene la cantidad de 5.19 kWh/m²/día. El mes con más radiación solar es septiembre con 5.87 kWh/m²/día y mayo con 4.57 kWh/m²/día es el mes con menos radiación solar.

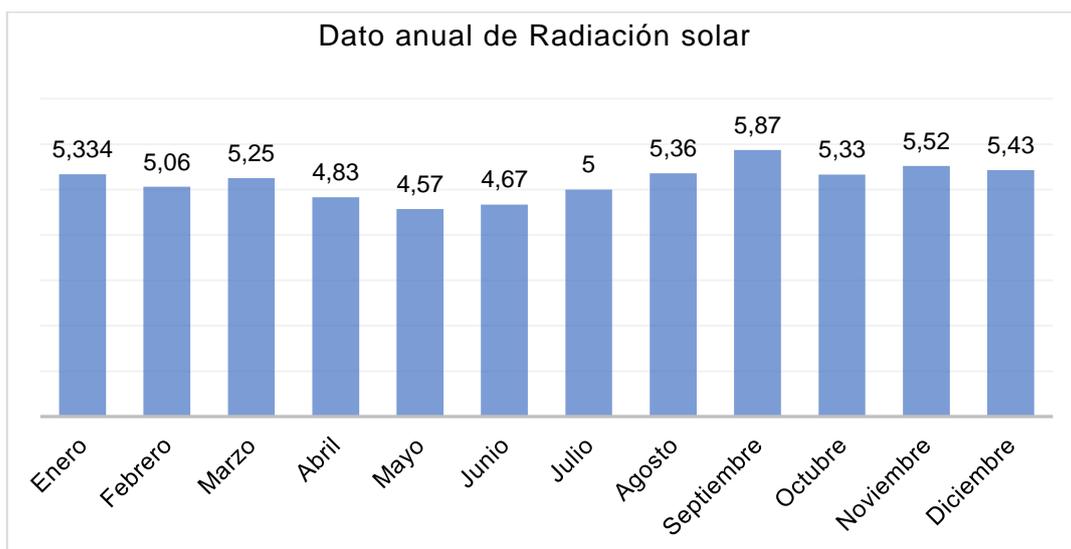
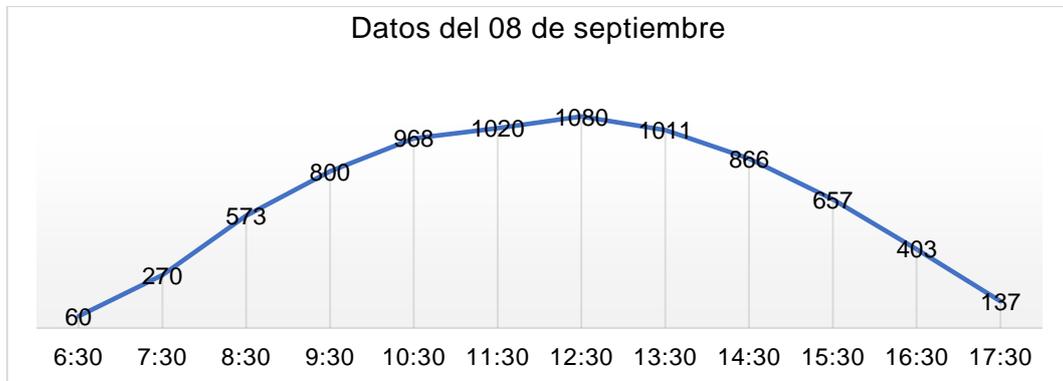
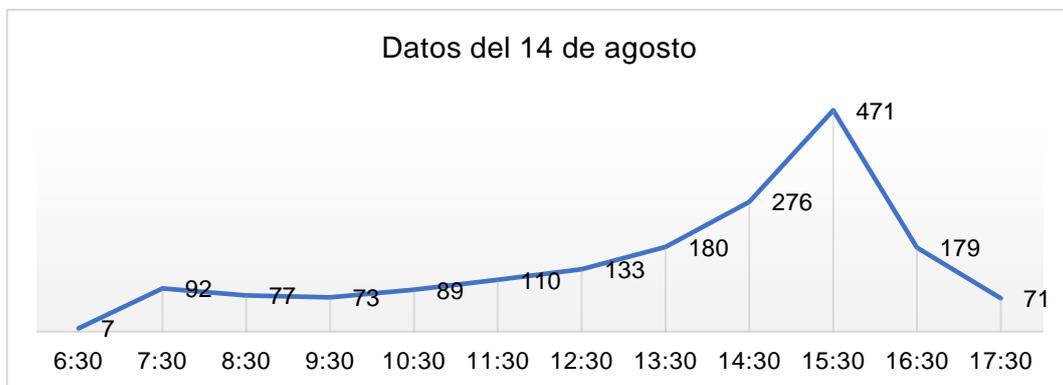


Fig. 28 Promedio anual de Radiación solar.
Fuente: (NSRDB, 2019)

Así mismo, para poder simular el sistema en el software, se escoge el día con mayor radiación solar que es el 08 de septiembre con 7845 W/m^2 y el 14 de agosto con 1758 W/m^2 es el día con baja radiación solar. Se puede verificar en la Figura 29:



a)



b)

Fig. 29 Radiación solar diaria: a) mayor y b) menor.
Fuente: (NSRDB, 2019)

b) Temperatura

En la Figura 30, se obtienen datos de temperatura del año 2019, dando como resultado al mes de marzo como el más caluroso con un promedio de $16.42 \text{ }^\circ\text{C}$ y el mes de baja temperatura es julio con $14.51 \text{ }^\circ\text{C}$.

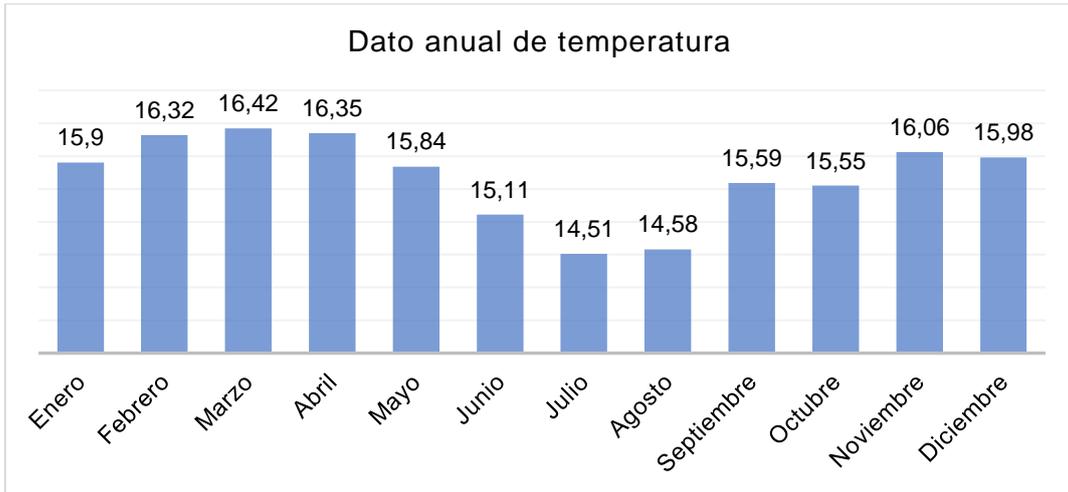
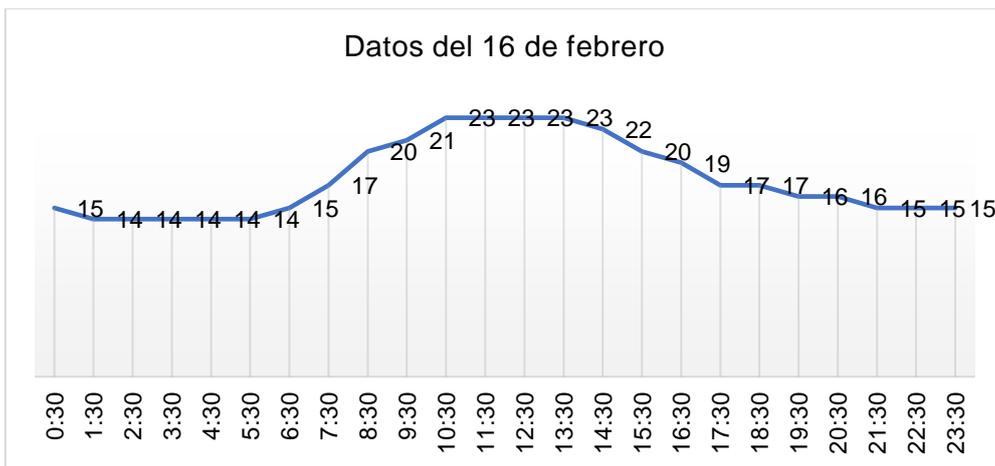


Fig. 30 Promedio anual de temperatura.
Fuente: (NSRDB, 2019)

De igual forma, para completar con los datos de simulación del sistema se busca el día con mayor temperatura que resulta ser el 16 de febrero con 17.58 °C y el día más frío es el 21 de junio con 12.58 °C. La Figura 31, se observan más datos:



a)



b)

Fig. 31 Temperatura diaria: a) calurosa y b) frío.
Fuente: (NSRDB, 2019)

2.7 Proceso referente al diseño del sistema en MATLAB/Simulink

La simulación propuesta se la realizó mediante la recolección de datos y análisis, para obtener resultados aproximados que garanticen el funcionamiento del sistema en determinado software. Se debe destacar que los valores obtenidos anteriormente, acerca de motor DC, banco de baterías, paneles solares y convertidores.

2.7.1 Paneles solares

En la Figura 32, muestra el circuito de conexión de los paneles solares, al ser 4 paneles en paralelo y 1 en serie, se tiene de resultado una potencia de 1240 W y un voltaje de 36 V; Además, en el circuito se coloca un capacitor que ayuda a reducir el rizado, debido a que el panel fotovoltaico tiene picos de corriente y voltaje, produciendo ondulaciones que se desvían del voltaje deseado. Los terminales del circuito actual van conectados al convertor Boost, este se encargará de elevar el voltaje.

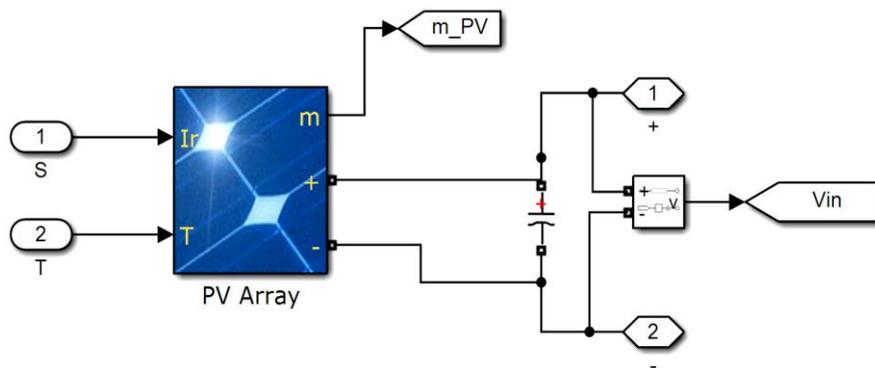


Fig. 32 Circuito del panel solar.
Fuente: Autor

Las curvas de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) son del arreglo de 4 paneles en paralelo y 1 en serie de la marca MAXPOWER CS6X-310P, tal como se indicó en el capítulo 2. La Figura 27, muestra el comportamiento del voltaje y corriente del generador fotovoltaico planteado, siempre y cuando este trabaje en condiciones estándar (Standard Test Condition: Temperatura = 25 °C e Irradiancia = 1000 W/m²).

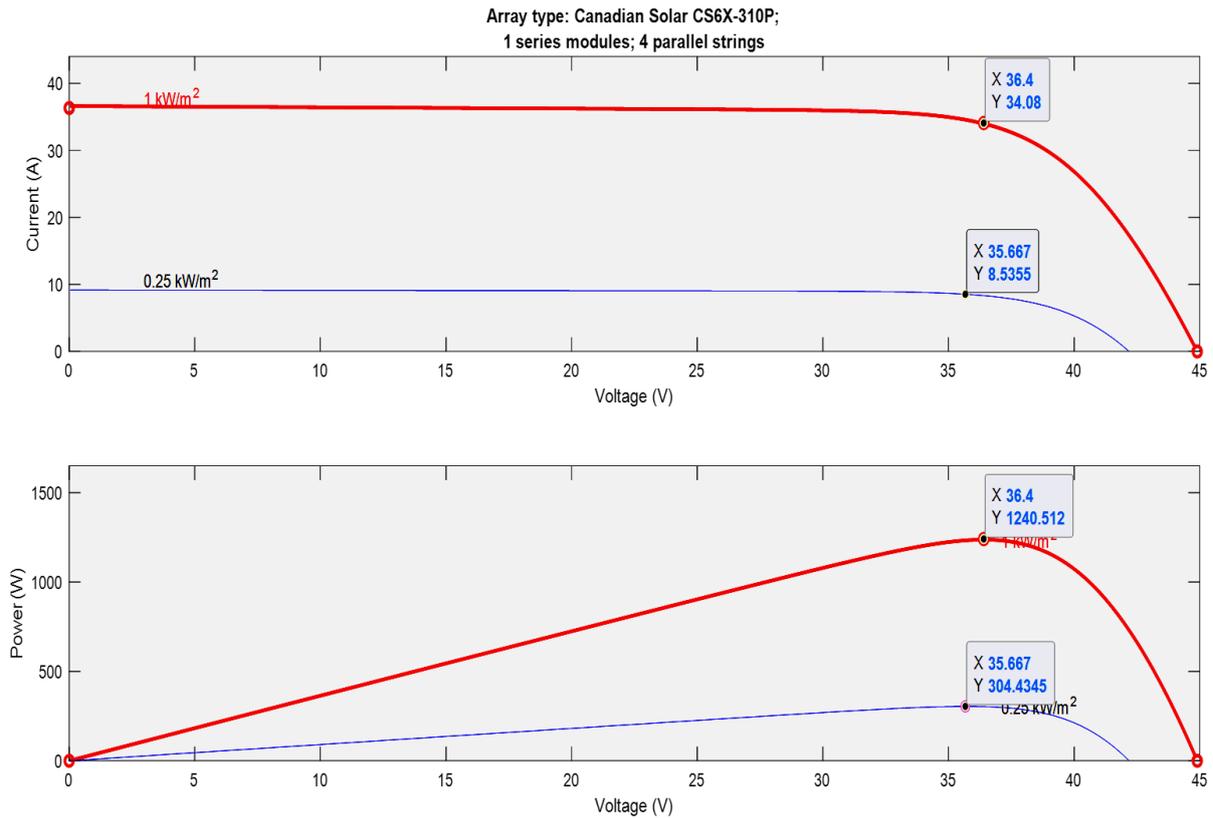


Fig. 33 Tipo de matriz: Canadian Solar C S6X-310P (1 módulo en serie y 4 en paralelo)
Fuente: Autor

2.7.2 Conversor Boost y control MPPT

Conociendo que el voltaje de salida de los paneles solares es 36 V, se necesita conectar un conversor con componentes aptos para que se encarguen de elevar el voltaje a 48 V y mantengan la corriente de salida, basándose en la potencia emitida por los paneles solares y en el modo de operación. La Figura 34, se indica el diseño acorde a los valores ya calculados de los diferentes componentes.

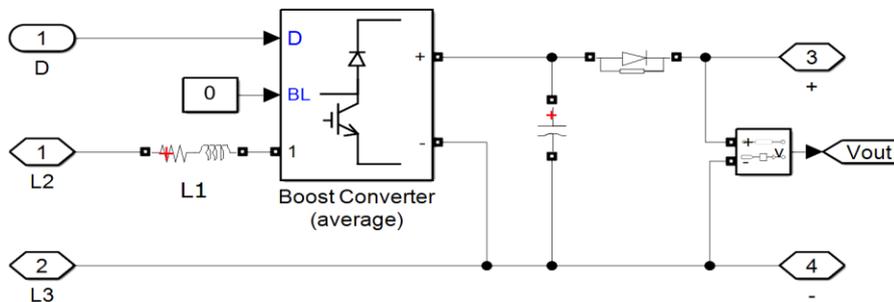


Fig. 34 Conversor Boost.
Fuente: Autor

Un componente fundamental en los sistemas fotovoltaicos es el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), es un algoritmo que se basa en optimizar la eficiencia del sistema fotovoltaico, dado que está sujeto a cambios de temperatura y radiación solar. El código de programación de este algoritmo P&O se detalla en el Anexo D. En la Figura 35, se representa el algoritmo en MATLAB/Simulink.

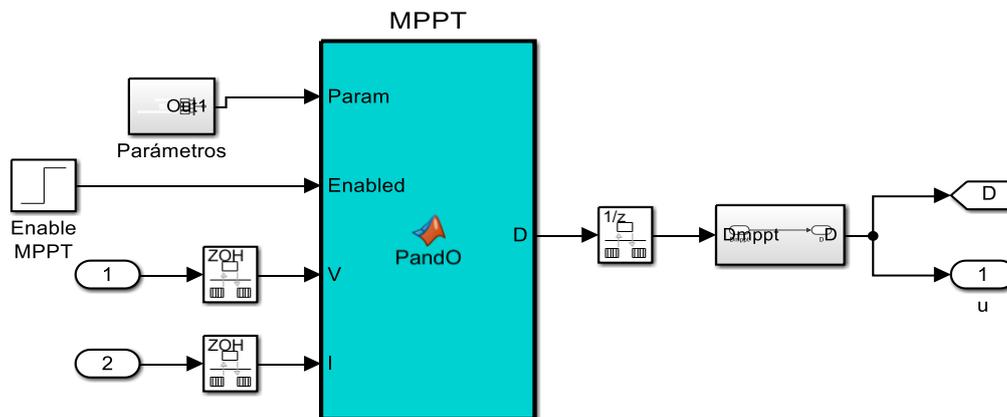


Fig. 35 Modelo de control MPPT.
Fuente: Autor

2.7.3 Sistema de almacenamiento

Las baterías conectadas en serie hacen que el valor de salida del voltaje sea de 36 V, mientras, que la batería en paralelo indica que la capacidad es de 260 Ah; en definitiva, se tiene un banco de baterías tipo Monoblock AGM, compuesto por: 3 baterías en serie y 1 en paralelo.

Para mayor seguridad y funcionamiento de la batería, se añade una protección que funciona de la siguiente manera: Si sobrepasa el voltaje de carga (SOC) se abre el primer interruptor especificando que ya está cargada, por tanto, el segundo interruptor se cierra para que la energía en exceso se disipe en $R_{protección}$. En la Figura 36, se presenta al circuito.

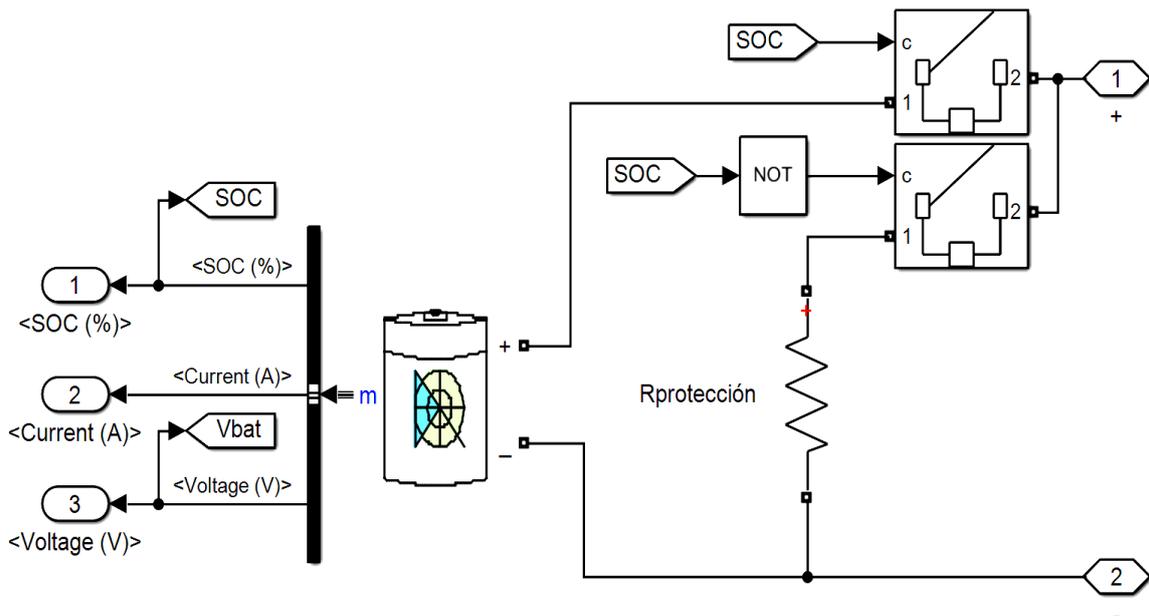


Fig. 36 Circuito del sistema de almacenamiento.
Fuente: Autor

En la Figura 37, se presentan gráficas donde se compara la curva de descarga de la corriente nominal, tanto mínima, media y máxima de la batería a ser utilizada.

La primera gráfica representa el comportamiento de la batería en máxima, media y mínima potencia. Verificando el consumo de corriente que tendrían a esas potencias, con dichos valores se determina que, en el tiempo de 0 a 1.5 iniciales se evidencia una descarga exponencial del banco de baterías; en el segmento de la descarga lineal (1.5 a 5.5), se muestra el área nominal del correcto funcionamiento; posteriormente inicia la descarga final, aquí se debe tener en cuenta que, la batería empieza a perder propiedades de operatividad.

En la segunda gráfica, se indica en las curvas de descarga con los valores experimentales, en donde las baterías llegan al punto final de carga con la potencia y una tasa de descarga máxima, obteniendo las curvas de descarga total.

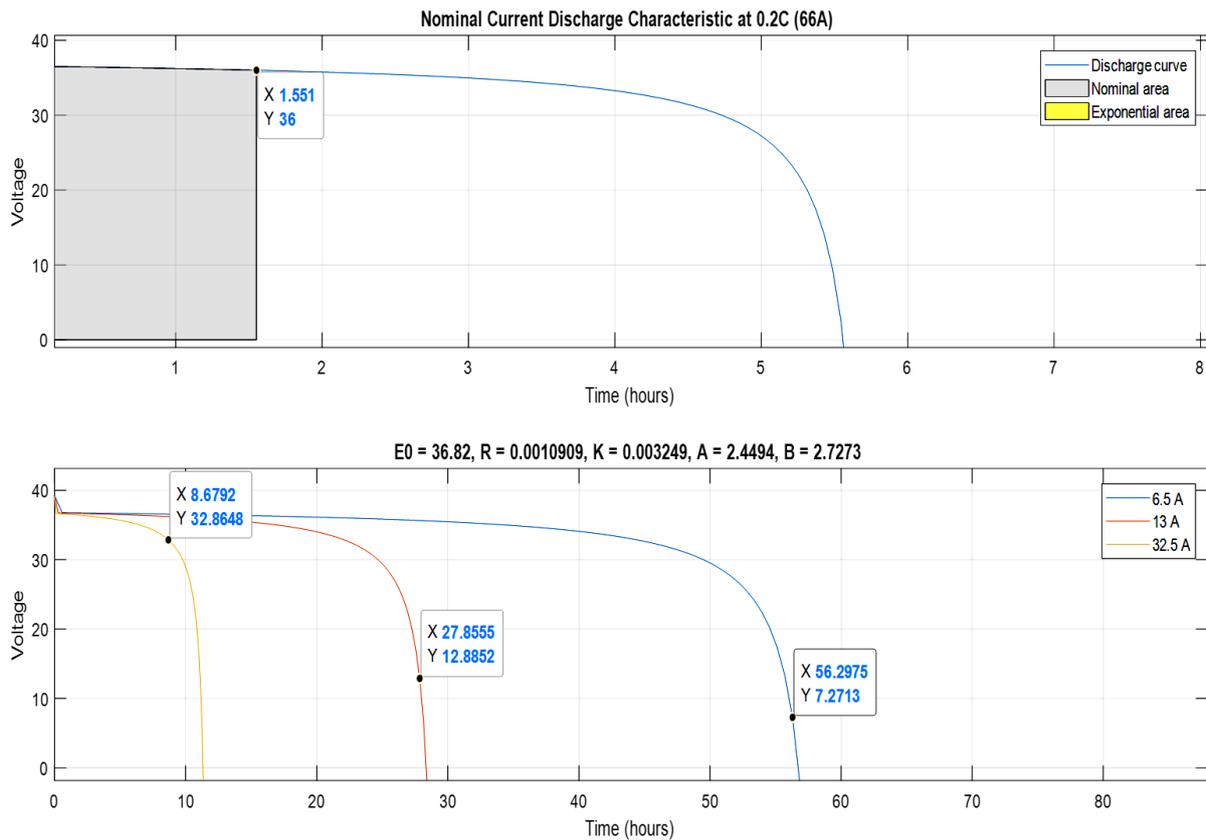


Fig. 37 Circuito del sistema de almacenamiento.
Fuente: Autor

2.7.4 Conversor Buck-Boost

Este conversor ayuda a controlar la corriente de la batería y así evitar sobrecorrientes, con la existencia del bus DC también controla la dirección y el flujo de energía. Debido a que la batería tiene un flujo de energía bidireccional, la corriente de referencia determina si la batería carga o descarga. Cuando el voltaje de los paneles es inestable, la batería suministra al motor y si el voltaje es estable la batería se carga y el motor es alimentado por los paneles solares.

El circuito de la Figura 38, es del conversor bidireccional Tipo C, también se incorpora una red Snubber, que es la unión de componentes pasivos y activos que reducen en el dispositivo semiconductor el estrés eléctrico durante las conmutaciones. Esta red hace que la corriente circule solo por su circuito, en vista que cuando el sistema se desconecta la bobina queda cargada, y al momento de conectarse nuevamente puede dañar el sistema.

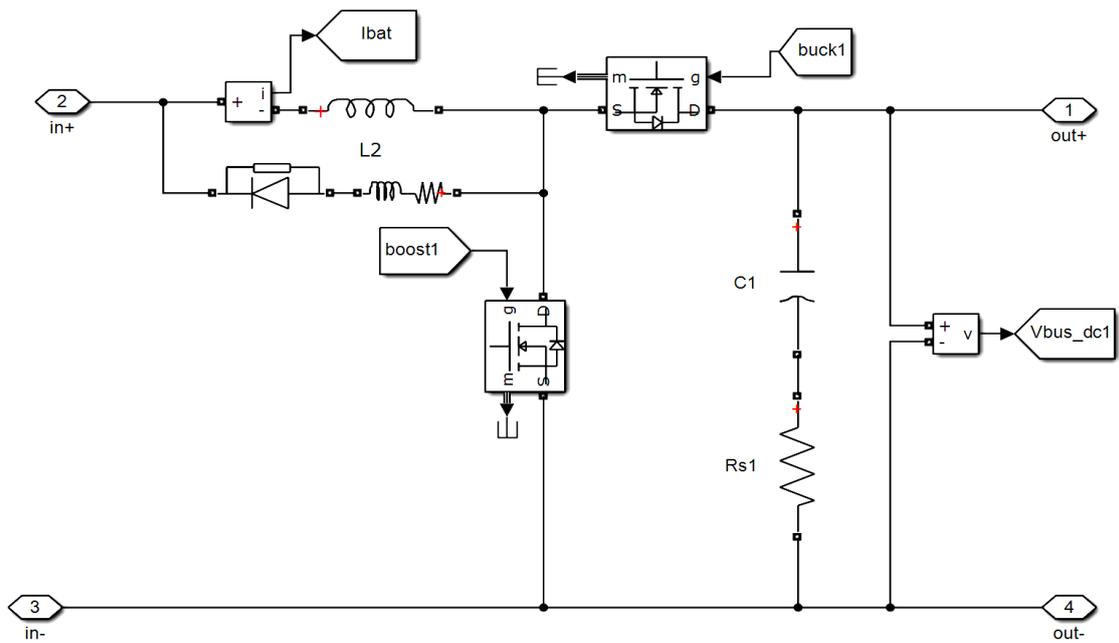


Fig. 38 Circuito del convertor bidireccional.
Fuente: Autor

2.7.5 Motor de corriente continua

El motor eléctrico DC fuera de borda sin escobillas es habitual para este tipo de sistemas de propulsión, es rápido porque no tiene fricción y no necesita mantenimiento seguido. En la Figura 39, se presenta una máquina DC con excitación, que funciona juntamente con el perfil de carga diseñado, es decir, al necesitar más velocidad del motor DC, se tiende a aumentar la corriente de excitación.

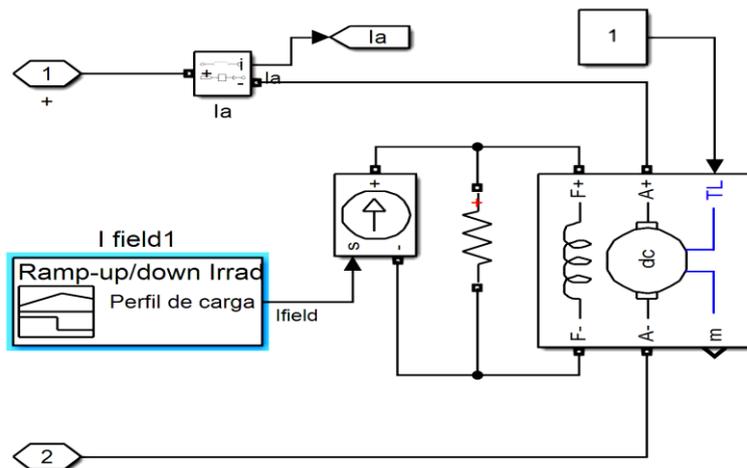


Fig. 39 Circuito equivalente a un motor DC fuera de borda.
Fuente: Autor

En esta Figura 40, se presenta el perfil de carga diario del funcionamiento del barco turístico solar. Aquí se observa que en el día hay un máximo de 4 recorridos de turismo, donde

cada uno de estos viajes dura aproximadamente 1 hora; los primeros 5 minutos hay un pico de corriente por el encendido del motor, luego va disminuyendo para tomar una velocidad adecuada del viaje, aproximadamente a los 40 minutos de recorrido vuelve un pico de corriente, puesto que se acelera la embarcación para cumplir con el regreso, finalmente la corriente decae, en razón de que el viaje turístico llegó a su final.

Este perfil de carga se diseña con base en la corriente de excitación del motor ya conocido, recalcar que esta corriente de excitación es muy pequeña, comparada con la corriente de carga.

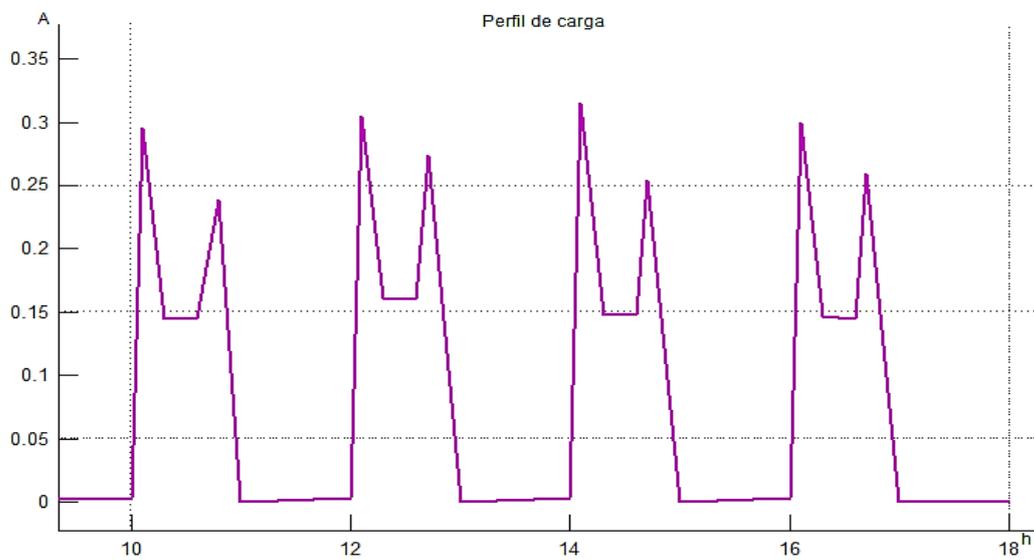


Fig. 40 Perfil de carga
Fuente: Autor

En la siguiente Figura 41, se puede observar en detalle el recorrido del viaje en la Laguna de Yahuarcocha.



Fig. 41 Recorrido turístico de la embarcación
Fuente: Autor

2.7.6 Mecanismo del sistema de control

Con la finalidad de reducir el efecto de ciertas perturbaciones y mantener equilibrado el sistema, es decir, que su respuesta sea estable y robusta, se utiliza un sistema de control en cascada voltaje - corriente. Para encontrar los parámetros de sintonización del controlador en lazo cerrado se lo efectuó mediante el método heurístico de Prueba y Error. En la Figura 42, se identifica el diseño del controlador.

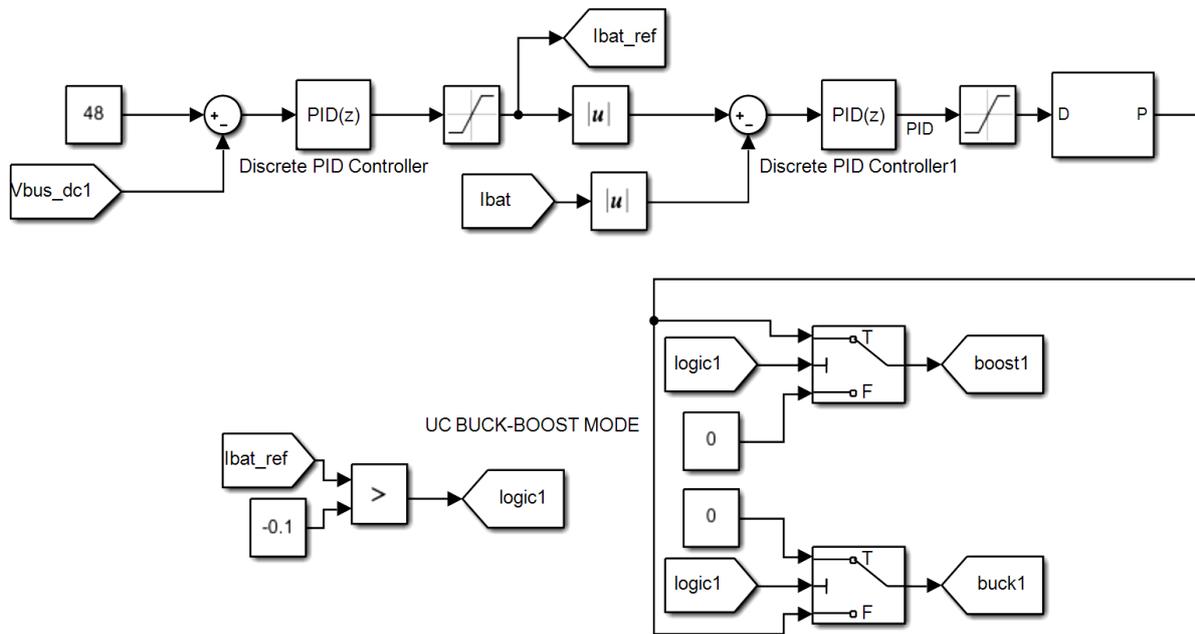


Fig. 42 Control en cascada del sistema.
Fuente: Autor

A continuación, en la Figura 43 se presenta un diagrama de bloques del sistema.

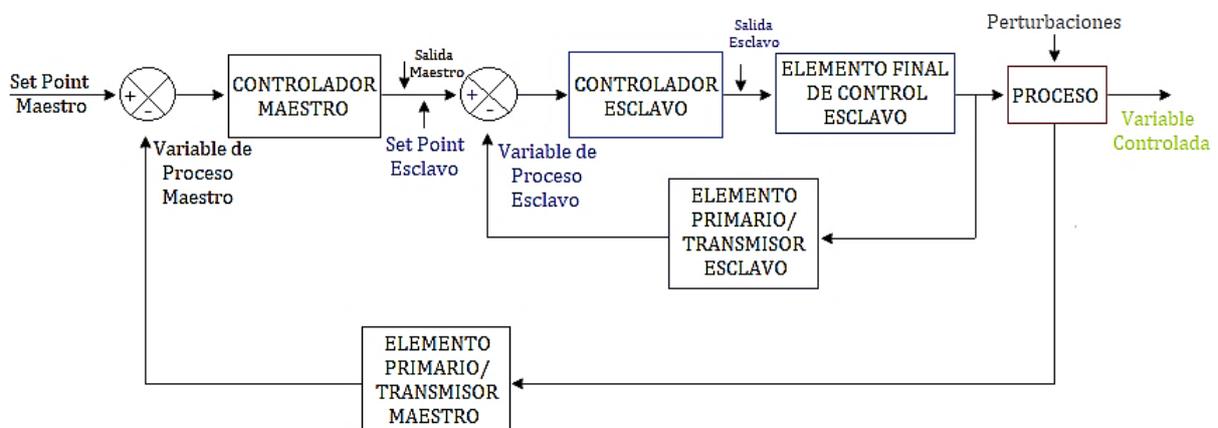


Fig. 43 Diagrama de bloques del sistema.
Fuente: Autor

2.7.7 Ajustes del sistema de control

Para el primer lazo de control se busca que el voltaje generado de los paneles de 36 V, por medio del conversor Boost se eleve a 48 V del bus DC. Este ajuste se realiza con los datos de mayor radiación solar que corresponden al día 08 de septiembre de 2019 (Figura 29 (a) y el anexo E). A continuación, se detallan las diferentes pruebas que se realizaron al control PID del sistema:

- a) Con los datos de: $P=5$, $I=0$ y $D=0$. En el anexo I, se observa que: Al iniciar el día el voltaje de los paneles solares tienen muchas oscilaciones de gran alcance que van de 33 V a 47 V, en el lapso de 07:00 a 17:00 el voltaje trata de estabilizarse logrando tener un voltaje dentro del rango deseado, pero a partir de las 17:00 nuevamente el voltaje tiene variaciones de 36 V a 53 V; esto quiere decir que las oscilaciones presentes en el tiempo de reposo dañan las condiciones de operación, debido a que pueden existir cortocircuito entre fases o daño de componentes del sistema por sobrecargas.
- b) En este caso los valores son de: $P=0.1$, $I=0$ y $D=0$. El anexo J muestra que, en los horarios de 08:30 a 10:15 y de 15:00 a 16:00 el voltaje sigue siendo menor a los 48 V del bus DC, por lo que el funcionamiento del sistema no cumpliría con las expectativas; mientras que de 10:15 a 15:00 el voltaje que se obtiene es muy superior a los 48 V, por ello trae consecuencias similares al primer caso. En fin, no es recomendable en vista de que el sistema no puede seguir la referencia.
- c) Con los datos de: $P=1$, $I=0$ y $D=0$. En el anexo K, se logra tener una respuesta aceptable al requerimiento. La presencia de variaciones de voltaje es por los cambios de temperatura-irradiación. Al momento de existir el funcionamiento del motor DC, el voltaje tiende a variar en el rango permitido de los 48 V. En sí, con este valor de la constante Proporcional (K_p) se obtiene un voltaje estable de funcionamiento de la carga, en el horario establecido.

El sistema no es rápido y existen fallas en estado estacionario, es por eso que en los siguientes literales se busca un valor adecuado de K_i .

- d) Se tiene que: $P=1$, $I=0.1$ y $D=0$. El anexo L muestra que, el conversor Boost tiene voltajes que rondan de 47 V a 57 V en el horario de operación. Aún existen oscilaciones en exceso que dañan el funcionamiento del sistema.
- e) Teniendo los valores de: $P=1$, $I=5$ y $D=0$. Se observa que en el anexo M el sistema es rápido, ya que alcanza el voltaje de 48 V al momento indicado; pero sigue habiendo inestabilidad de voltaje al momento de operar, por lo que, podría dañar el motor DC.
- f) Los datos son: $P=1$, $I=19$ y $D=0$. En el anexo N, se verifica que el voltaje de salida de los paneles solares es 36.9 V, y a través del conversor Boost se obtiene el voltaje del bus DC de 48 V. Además, ante las variaciones que existe tanto de radiación solar como de operatividad se comprueba que el sistema es robusto, ya que dicho sistema trabaje sin fallas y mantiene los resultados esperados. Cabe recalcar que existen caídas de voltaje dentro del rango permitido, esto sucede por detalle del programa (Simulink).

Con los valores encontrados de K_p y K_i , se pudo controlar los errores de estado estacionario y rapidez, por ello, la K_d no es necesario ajustarle. En la Tabla 2.7, se enseñan los valores de las contantes del primer lazo de control.

TABLA 2.7
VALORES DE PID PARA EL PRIMER LAZO DE CONTROL.

	K_p	K_i	K_d
Valor	1	19	0

A continuación, se deben definir los valores del PID tipo esclavo, que al ser un control interno muy rápido sus variaciones son casi nulas. Este control indica el funcionamiento de la batería, donde controla el voltaje y corriente, es decir, la carga y descarga. Además, ayuda a estabilizar el sistema.

Con los datos de radiación solar indicados, en el anexo O se puede verificar que: sí la irradiancia es baja, el consumo de la corriente aumenta, o sea la batería está emitiendo energía a la carga (descarga de batería); sí la irradiancia es alta, la corriente disminuye (hasta las cantidades negativas de la gráfica), ya que los paneles solares poseen mucha energía,

aquí la batería se está cargando. Lo señalado anteriormente se verifica en la variación del voltaje.

Los valores definitivos de este segundo lazo de control, ayudan a regular todo el sistema. Se escogen los siguientes valores, presentados en la Tabla 2.8:

TABLA 2.8
VALORES DE PID PARA EL SEGUNDO LAZO DE CONTROL.

	K_p	K_i	K_d
Valor	15	50	0

Una vez que se logra alcanzar el voltaje óptimo con el convertor Boost, se identifican los valores oportunos de Delta (Inicial, máximo, mínimo e incremento/decremento), para que el MPPT alcance cubrir las necesidades del sistema, es decir, que estos valores logren tener variación al momento de necesitar alto o bajo voltaje. En la Tabla 2.9, se identifican los valores.

TABLA 2.9
VALORES DE DELTA PARA EL CONTROL MPPT.

Delta	$D_{inicial}$	$D_{máximo}$	$D_{mínimo}$	$D_{inc/dec}$
Valor	0.1	0.9	0.1	12e-6

Fuente: Autor

En el anexo P, se presenta el seguimiento de punto máximo de potencia del primer caso estudiado.

2.8 Diseño del barco solar

El diseño de la embarcación turística solar consta de: un motor eléctrico DC fuera de borda, 4 paneles solares en conexión mixta, un banco de 3 baterías en conexión mixta, un convertor DC/DC Boost y un convertor DC/DC bidireccional Tipo C. En la Figura 44 de la simulación en MATLAB/Simulink, se obtiene el diagrama de bloques final de la conexión de los circuitos, con los componentes enumerados anteriormente.

El diagrama de bloques del diseño del barco solar, se divide en 4 partes:

- La primera parte consta de los datos de radiación solar y temperatura que determinarán la potencia de los paneles solares.
- La segunda es el sistema de generación que es la conexión del generador fotovoltaico que emite un voltaje de 36 V, con el conversor Boost que elevará el voltaje a 48 V del bus DC.
- La tercera parte es del sistema de almacenamiento, donde el banco de baterías se conecta al conversor Tipo C, que se encarga de entregar y recibir energía; cabe recalcar que estos componentes están conectados a un bus DC y luego hacia la carga.
- Por último, la cuarta parte es el sistema de propulsión que puede ser alimentado por un generador fotovoltaico o un banco de baterías, este sistema funciona de dos maneras: cuando el voltaje de la fuente es inestable, la batería alimenta a la carga y cuando el voltaje es estable la batería tiende a cargarse y el motor es suministrado por los paneles.

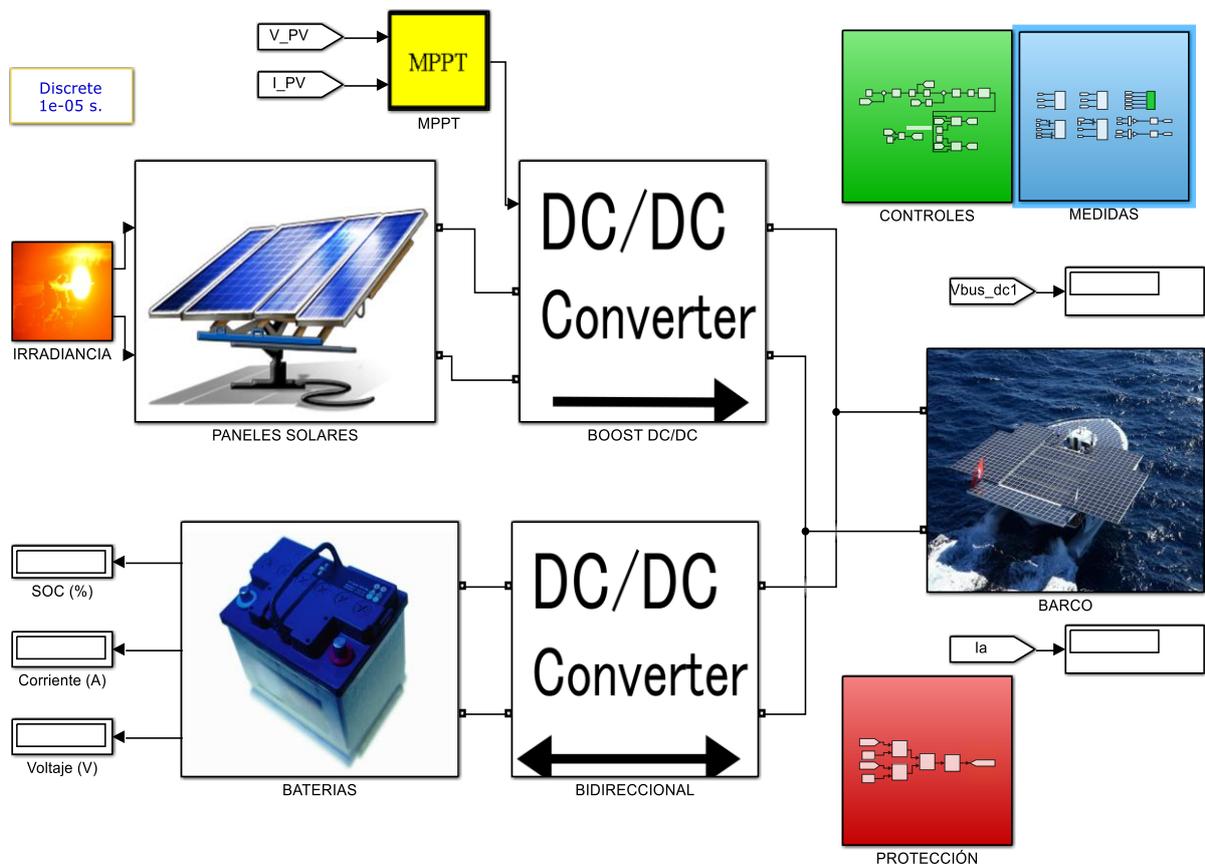


Fig. 44 Diseño de la simulación final.
Fuente: Autor

CAPÍTULO III

Simulación del sistema

En el presente capítulo, se muestran diferentes simulaciones en el software MATLAB/Simulink con el diseño propuesto, a esto se define como casos de estudio. Para ello se utilizan algunos datos de irradiación y temperatura de la zona. Las diversas curvas o formas de onda que se presentan en las gráficas, verifican el funcionamiento oportuno de la embarcación turística solar.

3.1 Metodología respecto a la simulación del barco turístico solar

Las distintas simulaciones que se presentan en este capítulo, serán de tipo No experimental, puesto que para presentar los casos que más adelante se exponen, estos se llevan a efecto con datos de experimentos “no puros”. Se aplica el siguiente proceso:

- Adquirir datos calculados del Capítulo II, acerca de todos los componentes del sistema eléctrico fotovoltaico.
- En el software MATLAB/Simulink, se procede a realizar la simulación del diseño de la embarcación turística solar.
- Se estipulan casos de estudio, para poder validar el funcionamiento del sistema, según como se necesite.
- Los casos de estudio se exponen a continuación, son con los días de menor irradiancia, mayor temperatura y menor temperatura. Hay que tener en cuenta que la irradiancia y temperatura tienen diferentes conceptos. Se utilizan estas dos variables, ya que para la simulación en el software se debe incluir de manera obligatoria.
- Hay que considerar que con la ayuda de las gráficas, se muestran curvas sobre el funcionamiento de las variables más importantes del sistema fotovoltaicos. Así mismo, estas gráficas se evalúan en un período diario de 6:00 a 18:00; los viajes del barco se fijan en horarios de 10:00, 12:00, 14:00 y 16:00.

3.2 Casos de estudio y resultados

En esta sección se realiza la comparación de las respuesta del sistema utilizando los datos de radiación solar y temperaturas, y se lleva a cabo distintas pruebas de proceso, con la finalidad de demostrar que el sistema de control cumple con las condiciones requeridas.

3.2.1 Primer caso de estudio

Ya con los datos definidos del lazo de control primario y secundario, se procede a simular con los datos de menor irradiación correspondientes al día 14 de agosto de 2019 (Figura 29 (b) y del anexo F). Su resultado se presenta en la Figura 45, donde se puede verificar que el conversor Boost tiene un voltaje estable de 48 V, y su punto máximo de potencia es adecuado para cubrir las necesidades que se presentan. Además, el voltaje de la batería trabaja de forma normal, pero cuando este valor tiende a aumentar es porque la batería se está cargando en algunas horas del día.

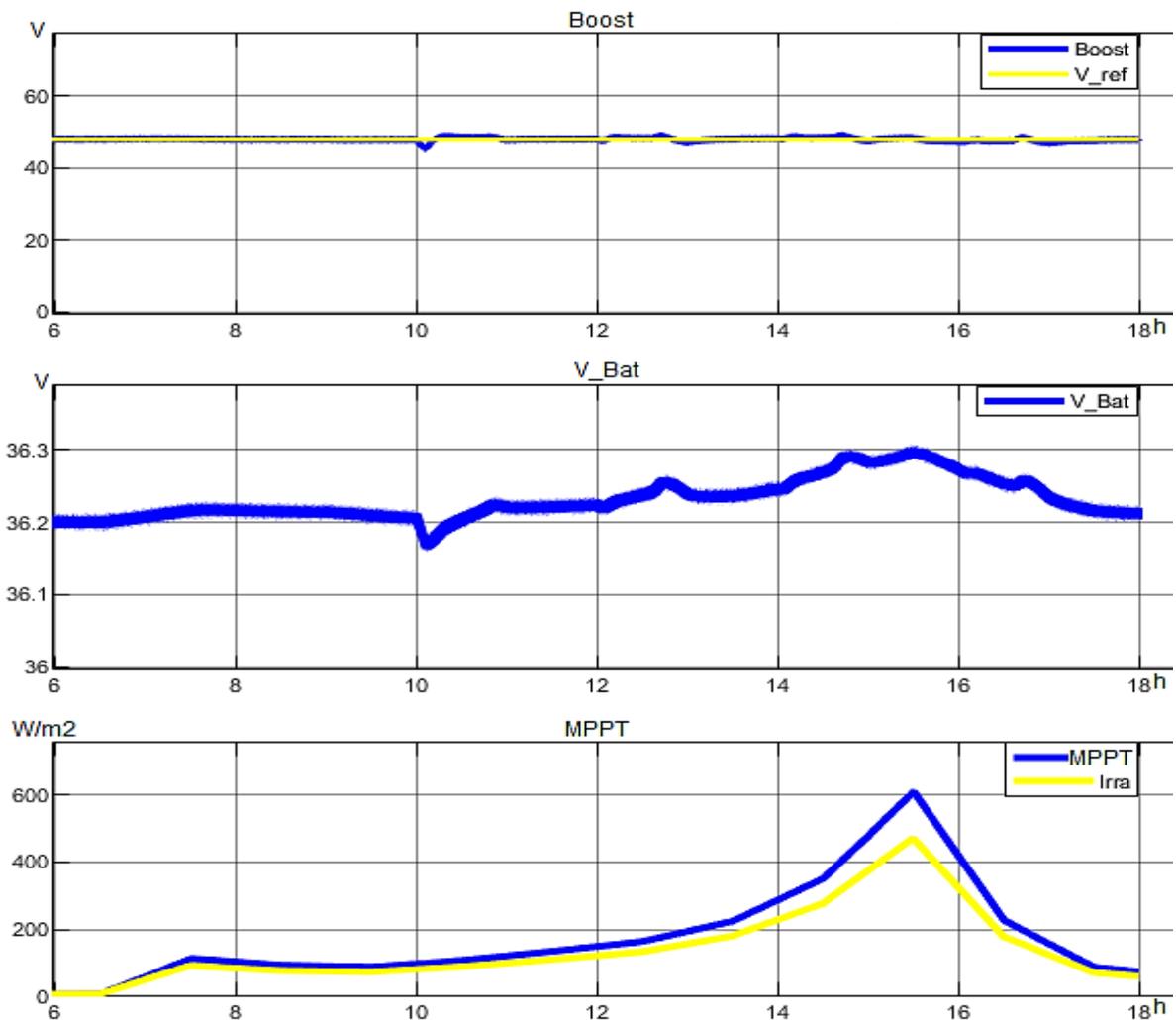


Fig. 45 Gráficas de resultados del primer caso.
Fuente: Autor

En la Figura 46, se verifica la operación del motor DC en los 4 viajes, con los siguientes horarios: 10:00, 12:00, 14:00 y 16:00. Además, se presenta el funcionamiento de los paneles y baterías por medio de la gráfica de corrientes.

Se concluye que el motor utiliza la corriente necesaria para los viajes que se realizan, es decir, lleva a cabo la curva del perfil de carga, detallado anteriormente. Los paneles tienen una corriente menor a su valor nominal, por consecuencia, las baterías en mayor parte del día suministran energía a la carga, esto se debe a que los datos de irradiancia son menores.

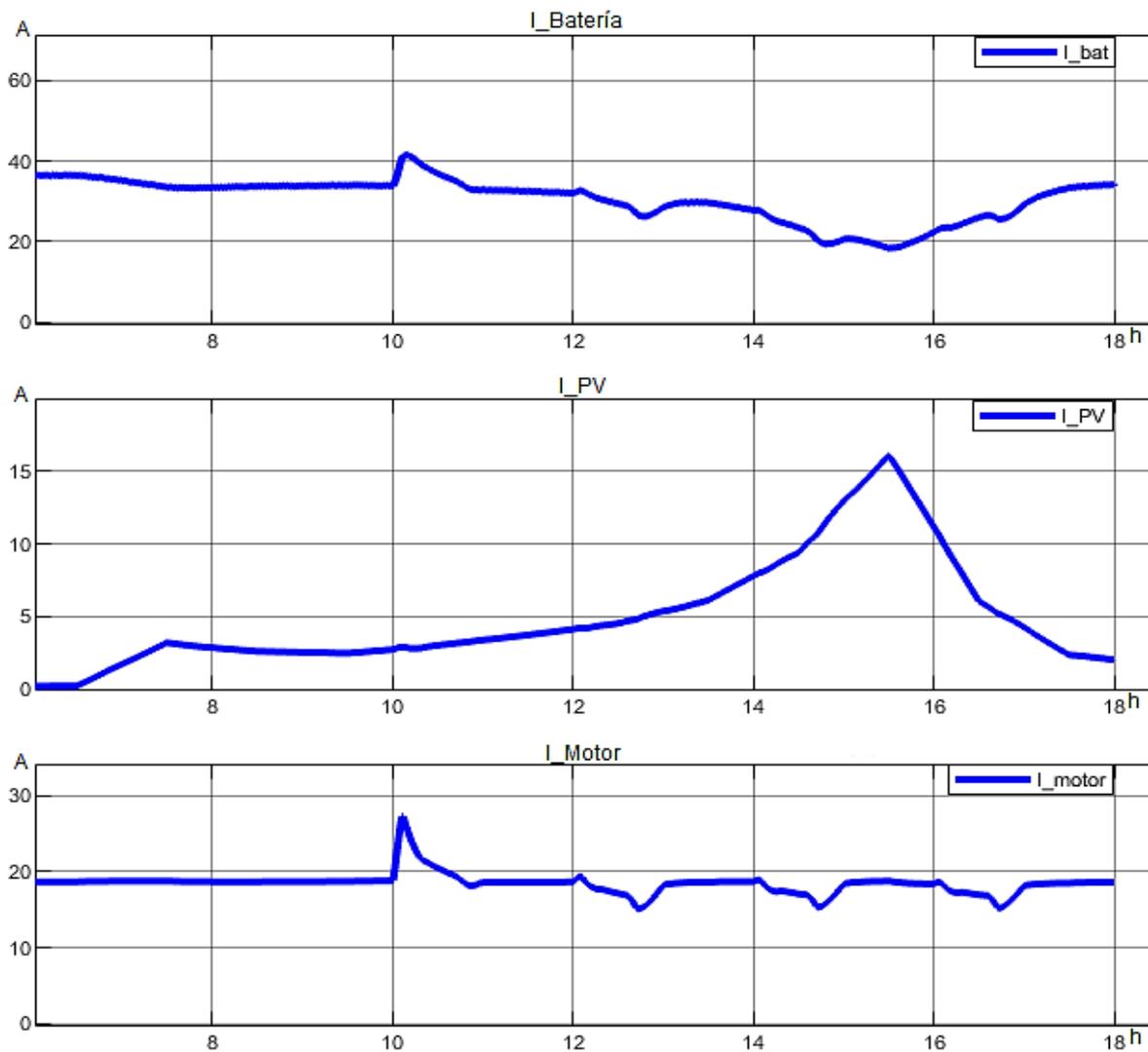


Fig. 46 Curvas de corrientes del primer caso.
Fuente: Autor

3.2.2 Segundo caso de estudio

Con los datos del día 16 de febrero de 2019 (Figura 31 (a) y del anexo G) pertenecientes a un día de alta temperatura, se realiza la simulación del segundo caso de estudio, dando

como resultado el voltaje de 48 V necesario para alimentar la carga, en un tiempo adecuado. Esto se debe a que el convertor trabaja de manera correcta, logrando así tener un sistema estable y robusto, sin riesgo de dañar los componentes del sistema fotovoltaico.

En la siguiente Figura 47, se puede verificar los resultados.

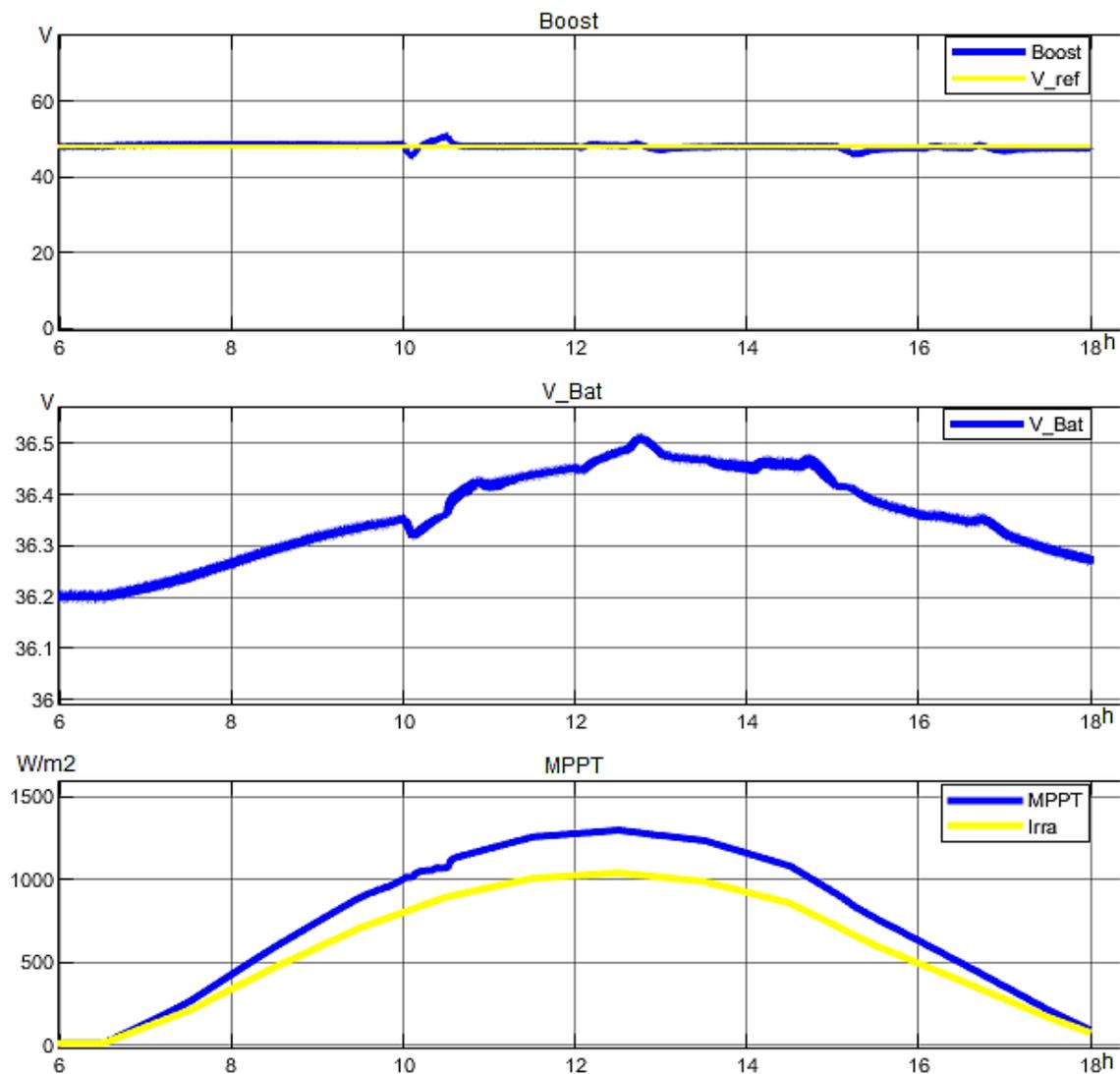


Fig. 47 Cuadro de resultados del segundo caso.
Fuente: Autor

El funcionamiento del control de la batería, corrientes del motor y PV, se verifica en la Figura 48. Donde su operatividad se facilita por el ajuste correcto de las distintas variables de simulación.

Aquí se logra tener suficiente demanda de irradiancia y temperatura, esto hace que el sistema realice la carga/descarga de las baterías, dependiendo de la cantidad de energía

existente. Por lo general tiende a cargar la batería en las horas solar pico, que van de 11:00 a 15:00 del día (Cantidades negativas en las gráficas, indican que las baterías se están cargando), puesto que en esa etapa del día el generador fotovoltaico cuenta con suficiente energía y por ende la corriente de los paneles solares alcanzan un pico máximo de su valor que alimentan a la carga.

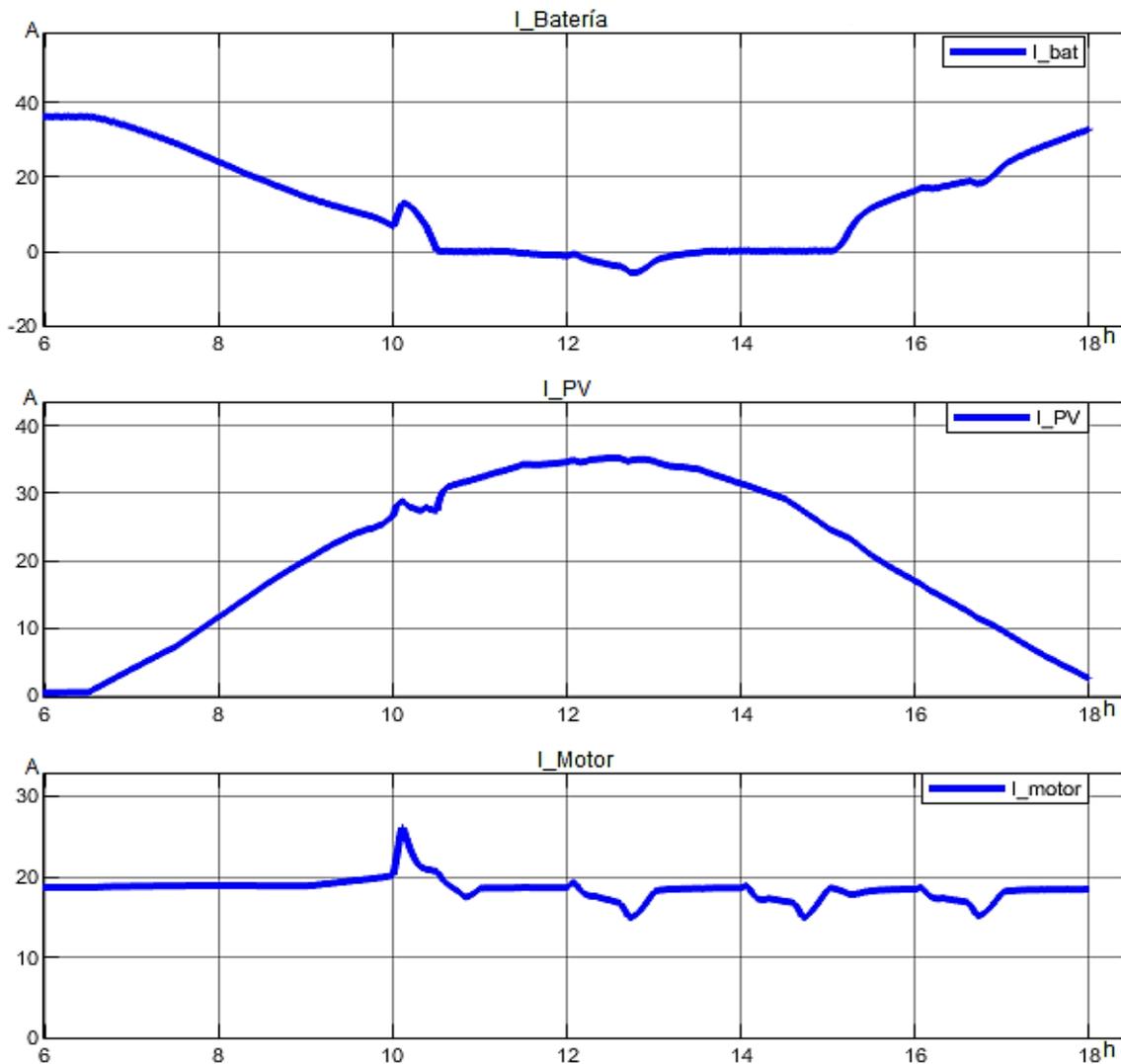


Fig. 48 Curvas de corrientes del segundo caso.
Fuente: Autor

3.2.3 Tercer caso de estudio

La simulación de la Figura 49, se efectuó con datos del día 21 de junio de 2019 (Figura 31 (b) y del anexo H), que representan a un día frío. Aquí se puede comprobar que los 48 V que necesita la carga para operar se logra alcanzar por el buen actuar del convertidor Elevador, sin necesidad de aumentar abruptamente el voltaje.

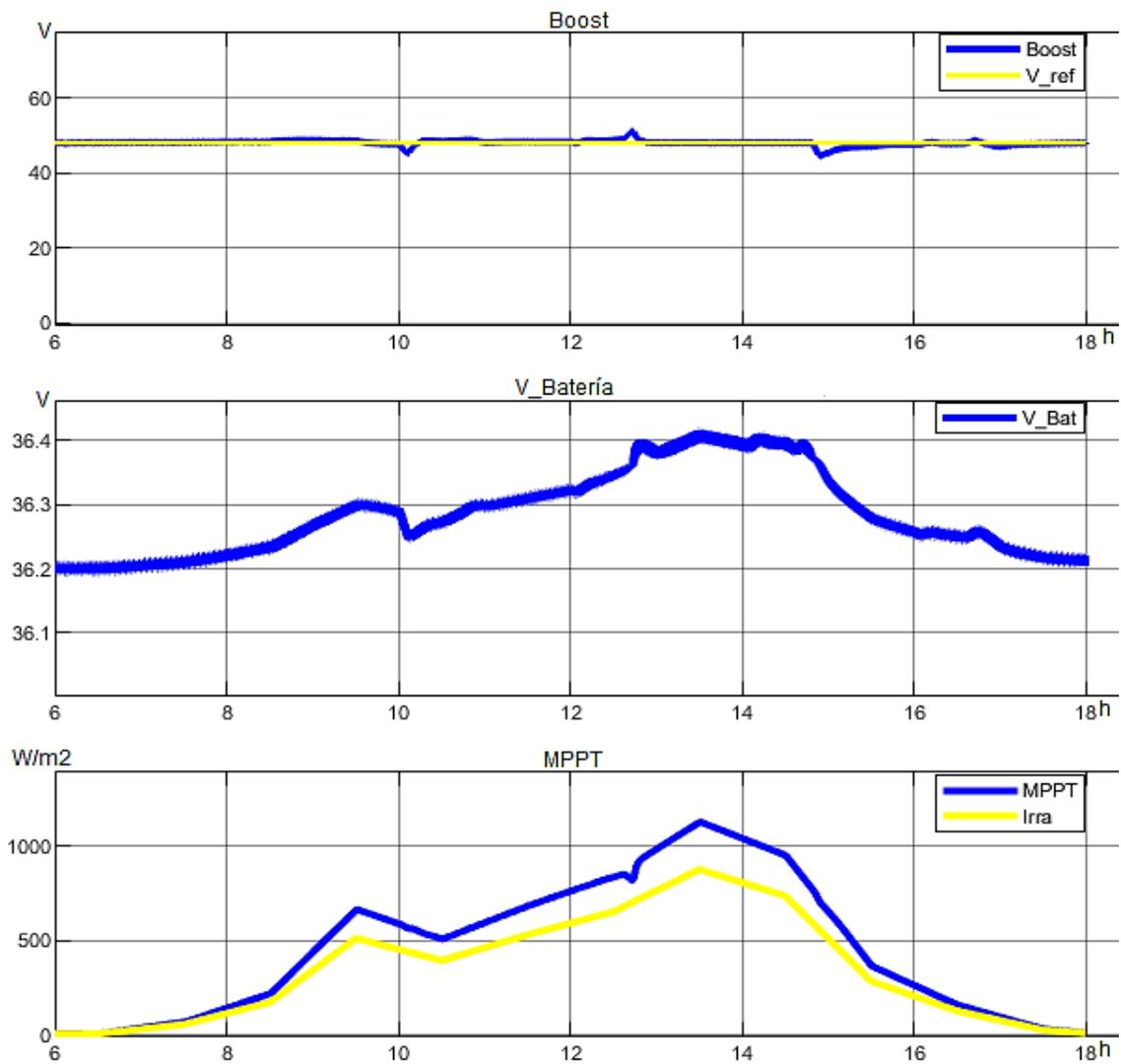


Fig. 49 Gráficas de resultados del tercer caso.
Fuente: Autor

Por medio de la Figura 50, se puede constatar que las baterías envían energía a la carga siempre y cuando exista poca temperatura; al momento de existir mayor irradiancia/temperatura las baterías tienden a cargarse, a consecuencia de que los paneles solares pueden emitir de forma segura energía a la carga.

En el horario de 13:00 a 15:00, el control MPPT reacciona de manera abrupta a dato de la irradiancia ingresada sin causar daños, haciendo que el Punto Máximo de Potencia supere los 1000 W/m^2 y por ello las baterías tienden a cargarse.

El funcionamiento del motor, con respecto a la corriente es la misma a la de los anteriores casos, dado que su perfil de carga no varía en ningún caso de estudio y el sistema cumple con lo requerido, es decir, se comprueba el funcionamiento del control.

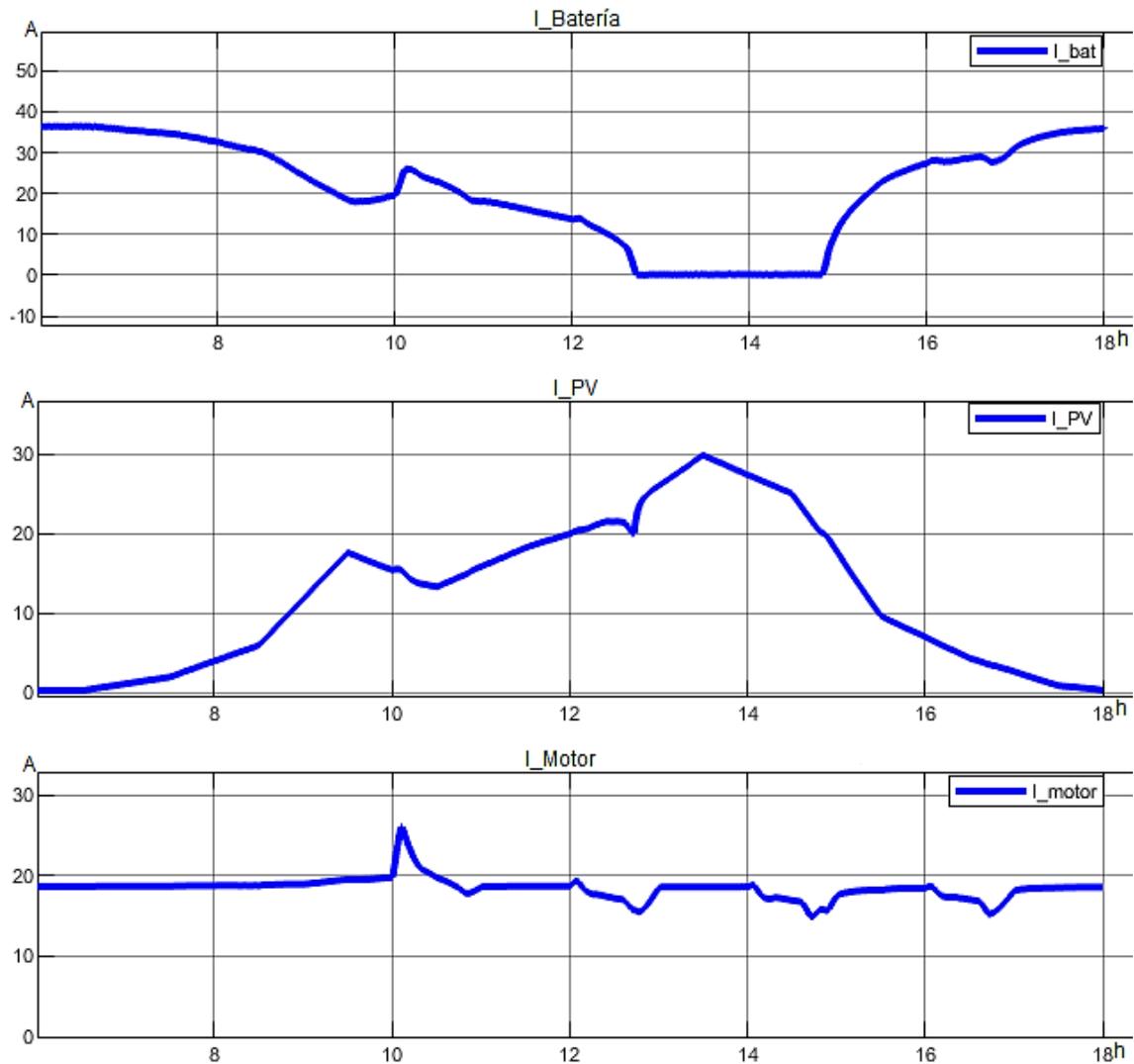


Fig. 50 Curvas de corrientes del tercer caso.
Fuente: Autor

Con los tres casos de estudio presentados, se concluye que los datos de las constantes del sistema de control maestro y esclavo son adecuados para el funcionamiento del sistema en cualquier situación climática que se presente, esto significa que para la simulación con datos de temperatura/irradiancia reales no es necesario cambiar los valores de K_p , K_d , K_i , ya que el sistema reacciona de manera adecuada. Resaltar que los componentes fotovoltaicos fueron diseñados para funcionar máximo 195 días al año (4 horas por día).

Además, se comprueba que el control de la batería de carga/descarga funciona de manera considerable, en vista de que en los casos presentados se examina su operatividad, de la siguiente manera: al momento de existir poca irradiancia/temperatura, las baterías son las encargadas de proveer energía a la carga; si existe exceso de irradiancia/temperatura, las baterías tienen a cargarse y los paneles solares son los que se ocupan de alimentar a la carga o motor DC.

CONCLUSIONES

- En este trabajo final de grado, se realiza el estudio de cada uno de los componentes del sistema, como son: generación, almacenamiento y propulsión. Esto permite plantear un sistema eléctrico con energía renovable, para poder alimentar las cargas de la embarcación turística solar.
- El funcionamiento general del sistema se basa en que: los paneles solares captan energía necesaria para alimentar al motor DC o a su vez, cargar al banco de baterías; el conversor Boost se encarga de elevar el voltaje del generador fotovoltaico a 48 V del bus DC; el conversor bidireccional Tipo C, opera en modo Elevador cuando la energía proviene de las baterías (descarga) y opera en modo Reductor cuando la energía fluye del bus DC a las baterías (carga). Para la propulsión del motor eléctrico DC fuera de borda, se requiere que el generador fotovoltaico tenga suficiente energía, caso contrario opera el banco de baterías.
- Las constantes del control PID, se las encontraron mediante el ajuste del control de Prueba y Error, siendo satisfactorio puesto que, al tener 4 casos de estudio, las constantes tanto del control de lazo principal respecto al voltaje, como el segundo lazo de control referente a la corriente, deben coincidir para una correcta simulación del sistema. En fin, los casos de estudio presentados se los realiza con el mismo valor de constantes (Proporcional, Integral y Derivativa), solo cambia los datos de irradiancia /temperatura.
- Al comparar los resultados mediante las distintas simulaciones dadas, se concluye que los datos adquiridos de irradiancia y temperatura en la provincia de Imbabura-Laguna de Yahuarcocha, presentan valores adecuados ($HSP = 5.19 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$) y que son óptimos al momento del funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos.

RECOMENDACIONES

- Se debe aplicar más proyectos en la provincia de Imbabura basados en la energía solar fotovoltaica, puesto que su ubicación geográfica permite tener grandes beneficios para su implementación.
- Se recomienda para futuros trabajos más detallados acerca de la fabricación de barcos solares, realizar algunas mejoras con relación a este trabajo, tales como: elección de componentes con tecnología de punta, diseño de su estructura, presencia de elementos aerodinámicos, etc.
- Para elegir los componentes del sistema, es aconsejable revisar el funcionamiento de cada uno de estos, en vista de que al momento de su operación pueden aparecer fallas que inestabilicen el sistema.
- Hay que tener en cuenta sobre el funcionamiento de los paneles solares y baterías, puesto que al utilizar convertidores Boost y Buck-Boost, el voltaje de estos elementos debe ser menor (36 V) al del bus DC (48 V). También se debe tener un amplio conocimiento acerca de los convertidores detallados anteriormente, dado que para su funcionamiento dependen de inductores, capacitores, resistencias, interruptores y otras variables.
- Acerca del diseño del barco solar en el software MATLAB/Simulink, se sugiere tener un conocimiento adecuado, en virtud de que este programa es muy flexible y potente, ya que contiene un amplio campo en la presentación de gráficas y herramientas de cálculos matemáticos, que generalmente son utilizados en el campo de la ciencia.

Referencias

- Abella, M. A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos* (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.). Retrieved from <https://bit.ly/3baA54y>
- Acevedo Meza, H., Mendoza García, J. L., & Sepúlveda Mora, S. (2017). Estrategias de control MPPT aplicadas en un convertor DC/DC tipo Boost para sistemas fotovoltaicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(30), 102–108. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>
- Adame, A. (2010). *Contaminación ambiental y calentamiento global*. Retrieved from <https://bit.ly/3relARO>
- Aguilar, J. (2005). *Electrónica de Potencia*. Retrieved from <https://bit.ly/3bely6H>
- Astudillo, W., & Lema, O. (2017). *Simulación de un Sistema Fotovoltaico Residencial con Regulación de Potencia Inyectada a la Red* (Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca). Retrieved from <https://bit.ly/3c09GFJ>
- Ávila, E. (2017). *Diseño y simulación de un control en cascada (PI-Deslizante) para los convertidores DC/DC presentes en una planta virtual de generación de energía eléctrica* (Quito, 2017.). Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18885>
- Barreno, J. (2010). *El turismo en la cuenca baja de la Laguna de Yahuarcocha y su incidencia en el desarrollo socioeconómico y ambiental de la comunidad de San Miguel de Yahuarcocha, en la ciudad Ibarra, Provincia Imbabura* (Universidad Técnica del Norte). Retrieved from <https://bit.ly/2OgQUIk>
- BBC. (2018). La ingeniosa canoa solar con la que se puede viajar sin petróleo por la selva ecuatoriana. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-43142227>
- Bigorra, E. M. (2018). *Design of a boat electric propulsion system based on solar energy*. (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/122896>
- Boxwell, M. (2017). *Solar electricity handbook*. Retrieved from <https://bit.ly/3e80WA0>
- Burdick, J., & Schmidt, P. (2017). *Install Your Own Solar Panels: Designing and Installing a Photovoltaic System to Power Your Home*. Retrieved from <https://bit.ly/3uSleT2>
- Carlino, H. (2016). *El Acuerdo de París y sus Implicaciones para América Latina y el Caribe*. Retrieved from <https://bit.ly/3rszvVH>
- Carreira Bello, M., & Sandoval Pina, R. A. (2010). *Diseño y estudio de viabilidad de un barco híbrido eólico-solar* (Escuela de Organización Industrial). Retrieved from <https://bit.ly/3qjENB7>
- Carta González, J. A. (2013). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con*

- energías renovables*. Madrid: Pearson.
- Colomo, R. (2013). *Convertidor DC-DC Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión* (escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación). Retrieved from <https://bit.ly/2PzZf4f>
- CONELEC. (2008). *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA*. Retrieved from <https://bit.ly/3qfW7av>
- Creus Solé, A. (2009). *Energías renovables*. Cano Pina CEYSA.
- D'Alessio, L., González, L., & Cáceres, R. (2014). Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación. *Avances En Ciencias e Ingenierías*, 6. Retrieved from <https://bit.ly/2PyJg6w>
- Das, S., Sadhu, P. K., & Chakraborty, S. (2016). Green sailing of solar PV powered country boat using buck-boost chopper. *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2016.7530283>
- De Castro, M. (2000). *El Motor de Gasolina*. Retrieved from <https://bit.ly/3qeOktw>
- De Juana, J. (2008). *Energías renovables para el desarrollo*. Madrid: Paraninfo.
- Esteire, E., Madrid, A., & Madrid, A. (2010). *Energías renovables: Manual técnico*. Madrid: AMV Ediciones.
- Fagua, A., & Bernal, W. (2015). Celdas solares Orgánicas. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología*, 2. Retrieved from <https://bit.ly/3e9cX8q>
- Fernández Salgado, J. M. (2010). *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, térmica y termoeléctrica*. Madrid: AMV Ediciones.
- Fonseca, N., Farias, T., Duarte, F., Gonçalves, G., & Pereira, A. (2009). The Hidrocat Project – An all electric ship with photovoltaic panels and hydrogen fuel cells. *World Electric Vehicle Journal*, 3(4), 764–776. <https://doi.org/10.3390/wevj3040764>
- Garín, A. L. (2016). Novedades del Sistema de Protección Internacional de Cambio Climático: el Acuerdo de París. *Estudios Internacionales (Santiago)*, 49. <https://doi.org/10.5354/0719-3769.2017.45222>
- González, L. G., Farfán, E., & Zamora, H. (2015). Diseño de un banco de pruebas para paneles solares fotovoltaicos, mediante un convertidor reductor-elevador. *Avances En Ciencias e Ingenierías*. <https://doi.org/10.18272/aci.v7i1.232>
- Granda, E., Orta, O., Díaz, J., Jimenez, M., Osorio, M., & González, M. (2013). Modelado y simulación de celdas y paneles solares. *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica 2013*, 35, 17–22. <https://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968>
- Guamán, F., & Ordóñez, J. (2014). *Estudio de la viabilidad técnica, económica y ambiental de lanchas solares para transporte en los ríos de la amazonía sur del Ecuador* (Universidad de Cuenca). Retrieved from <https://bit.ly/3bWCQFW>

- Jara, J., Pastor, H., Garcia, J., Casafont, M., Araujo, E., & Calderón, E. (2013). *Embarcaciones solares, una evolución al transporte marino en las islas Galápagos, Ecuador*. Retrieved from <https://bit.ly/3kKZsNj>
- Juárez, E. (2009). *Generador Solar de Energía Eléctrica a 200W* (Universidad de las Américas Puebla). Retrieved from <https://bit.ly/3e8NFaj>
- Kabir, S. M. L., Alam, I., Khan, M. R., Hossain, M. S., Rahman, K. S., & Amin, N. (2016). Solar powered ferry boat for the rural area of Bangladesh. *2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEES)*, 38–42. <https://doi.org/10.1109/ICAEES.2016.7888005>
- López Sánchez, Ó. (2016). *Guía de aplicación de energía solar como alternativa de energía renovable en embarcaciones de recreo* (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/89553>
- Mascarós Mateo, V. (2016). *Gestión del montaje de instalaciones solares fotovoltaicas*. Paraninfo.
- Méndez Muñiz, J. M., & Cuervo García, R. (2010). *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: FC Editorial.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Power Electronics Convertors, Applications, and Design*. McGraw-Hill.
- NSRDB. (2019). National Solar Radiation Database. Retrieved September 21, 2020, from <https://nsrdb.nrel.gov/>
- Ossa, V. (2017). *Ensamble y Caracterización de un panel solar fotovoltaico* (Universidad Tecnológica de Pereira). Retrieved from <https://bit.ly/2Ptk8xT>
- Peláez Samaniego, M. R., & Espinoza Abad, J. L. (2015). *Energías renovables en el Ecuador*. Retrieved from <https://bit.ly/2Oppvxq>
- Perales Benito, Tomás. (2010). *Guía del instalador de energías renovables: energía fotovoltaica, energía térmica, energía eólica, climatización*. México: Creaciones Copyright.
- Perales Benito, Tomas. (2012). *El Universo de las Energías Renovables*. Barcelona: MARCOMBO.
- Rand, B., & Richter, H. (2014). *Organic solar cells: Fundamentals, Devices, and Upscaling*. Taylor & Francis Group.
- Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia-Rashid*. México: Pearson Prentice Hall.
- Rivera, J., & Cardona, E. (2018). *Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores Buck-Boost utilizando Matlab* (Universidad Tecnológica de Pereira). <https://bit.ly/38vDGZc>
- Salas, M., Luco, R., & Ekdahl, H. (2013). ENERGÍA SOLAR PARA PROPULSIÓN DE EMBARCACIONES FLUVIALES. *Congreso Internacional IDS2013 - Amazonía*.

Retrieved from <http://hdl.handle.net/10077/8803>

- Sánchez, P. (2013). *Diseño de una embarcación de 7 metros de Loa* (Universidad Politécnica de Catalunya). Retrieved from <https://bit.ly/3kHUml0>
- SENPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo*. Retrieved from www.planificacion.gob.ec
- Spagnolo, G. S., Papalillo, D., Martocchia, A., & Makary, G. (2012). Solar-Electric Boat. *Journal of Transportation Technologies*, 02(02), 144–149. <https://doi.org/10.4236/jtts.2012.22015>
- SunPower. (2018). Solar Panels. Retrieved August 13, 2020, from <https://us.sunpower.com/products/solar-panels>
- Tapia, A. (2010). *Estudio de factibilidad para la creación de un centro de recreación y esparcimiento con mimbres, en el sector de la Laguna de Yahuarcocha, perteneciente a la parroquia La Dolorosa del Priorato, de la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura* (Universidad Técnica del Norte). Retrieved from <https://bit.ly/3qfYVEu>
- Terneus, E. (2014). Vegetación acuática y estado trófico de las lagunas andinas de San Pablo y Yahuarcocha, provincia de Imbabura, Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 35, 121–131. Retrieved from <https://bit.ly/3uVlyjN>
- Tobajas Carlos. (2015). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Ediciones de la U.
- Trujillo, M., & Ramos, G. (2014). Control de lazo cerrado para convertidores DC/DC tipo: Buck, Boost y Buck-Boost. *Universidad de Los Andes*. Retrieved from <https://bit.ly/3rslw0Z>
- Urdiales Flores, L. E., & Espinoza Abad, J. L. (2015). *PROCEDIMIENTO PARA LA ELECTRIFICACIÓN EN ZONAS AISLADAS* (Universidad de Cuenca). Retrieved from <https://bit.ly/3898PkU>
- Valderrama, F., Moreno, H., & Vega, H. (2011). Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost. *Universidad Nacional de Colombia*, 12, 44–45. Retrieved from <https://bit.ly/3uNYftz>
- Vera, A., Delgado, J., & Sepúlveda, S. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 8(2), 343. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>
- Zapata, A., & Chaves, J. (2012). *LANCHA SOLAR A ESCALA REAL* (Universidad Tecnológica de Pereira). Retrieved from <https://bit.ly/3e9l4Sq>

Anexos

Anexo A: Datasheet del motor eléctrico DC.

Motor fuera de borda de la lista		
1	2-STROKE tipo	3.5HP;3.6HP;4.0HP;6HP;12HP;18HP;30HP;40HP
2	4-golpe tipo	Refrigeración por aire: 4HP; 6HP;7HP;8HP
		Refrigeración por agua: 3.5HP; 6.5HP; 20HP
3	De tipo eléctrico	48LBS; 58LBS; 68LBS; 2.5HP; 3.6HP; 4HP; 5HP; 7HP; 8HP;10HP
Interior de la potencia del motor, lista		
1	El motor de YUCHAI	90HP; 115HP; 130HP;150HP;180HP

TECHNICAL PARAMETER					
MODELS	2.5	3.6	4.0	4.0	5.0
SHAPE SIZE	920x365x220 (cm)				
STERN HEIGHT	420				
RATED VOLTAGE /RATED CURRENT	24V33A	48V19A	48V21A	48V21A	48V25A
RATED POWER	800W	800W	1000W	1000W	1200W
MAXIMUM SPEED	7Km/h	13Km/h	15Km/h	15Km/h	17Km/h
WEIGHT	9.8	10.5	11	11	12
FULL OPEN RANGE OF THROTTLE	3000-3700r/min				
CONTROL	ACCELERATION SWITCH				
CONTROL MODE	TILLER				
PROPELLER SIZE	7-1/4x5-A inch	/	/	/	7-1/4x5-A inch
TRANSMISSION RATIO	3:2.5				
RECOMMENDED BATTERY	30Ah (min)	20Ah (min)	24Ah (min)	24Ah (min)	40Ah (min)
PACKAGING SIZE	950x420x290				

MACHINE ANALYSIS



Anexo B: Datasheet de la batería AGM.



Baterías Monoblock AGM Saclima

Cuando se requieren corrientes muy elevadas en plazos de tiempo cortos, las baterías aGMson perfectas debido a su resistencia interna muy baja. Por ello, las baterías AGM son más adecuadas que las GEL para situaciones con alta intensidad de descarga.

Las AGM POWER incorporan unas válvulas de regulación de gases para una mejor recombinación de estos. Así, se evitan pérdidas y la presión interna queda mejor regulada y, por lo tanto, el rendimiento es mayor.



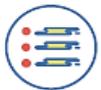
Económica



Pequeñas instalaciones



Compacta



Características principales

• Máxima calidad

Las baterías AGM Power pasan estrictos procesos de control, desde la materia prima hasta la entrega del producto.

• Válvulas de regulación de gases

Gracias a su diseño, disponen de una mejor recombinación de los gases y una mínima pérdida de hidrógeno

• Aplicaciones

Las baterías AGM Power han sido diseñadas para aplicaciones en telecomunicación, sistemas solares, sistemas de respaldo y náutica, entre otras. Todas nuestras baterías disponen de la certificación ISO 9001 así como la aprobación CE y UL.



Características eléctricas

Datos	AGM Power 95	AGM Power 120	AGM Power 145	AGM Power 190	AGM Power 260	AGM Power 320
Características						
Voltaje	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Número de células	6 células	6 células	6 células	6 células	6 células	6 células
Longitud	260 mm	330 mm	406 mm	486 mm	522 mm	520 mm
Ancho	173 mm	173 mm	173 mm	170 mm	240 mm	268 mm
Altura	217 mm	217 mm	210 mm	244 mm	219 mm	220 mm
Altura total	222 mm	222 mm	236 mm	244 mm	223 mm	225 mm
Peso	25.5 kg	28.3 kg	34 kg	43 kg	57.9 kg	67 kg
Capacidad en C100	95 A	120 A	145 A	190 A	260 A	320 A
Capacidad en C10	85 A	100 A	120 A	150 A	200 A	250 A
Método de carga (77°C)						
Uso cíclico	14.4-15.0 V	14.4-15.0 V	14.4-15.0 V	14.4-15.0 V	14.4-15.0 V	14.4-15.0 V
Corriente inicial	24 A	25 A	30 A	37.5 A	60 A	60 A
Tª de compensación	-30mV/°C	-30mV/°C	-30mV/°C	-30mV/°C	-30mV/°C	-30mV/°C
Uso flotación	13.6-13.8 V	13.6-13.8 V	13.6-13.8 V	13.6-13.8 V	13.6-13.8 V	13.6-13.8 V
Tª de compensación	-20mV/°C	-20mV/°C	-20mV/°C	-20mV/°C	-20mV/°C	-20mV/°C
Autodescarga						
3% e la capacidad al mes a 25°C	5.8 mΩ	4.5 mΩ	4.0 mΩ	3.5 mΩ	3.0 mΩ	3.0 mΩ
Requerimientos ambientales						
Tª de descarga	-15/50°C	-20/50°C	-20/50°C	-20/50°C	-20/50°C	-20/50°C
Tª de carga	0/40°C	-10/40°C	-10/50°C	-10/50°C	-10/50°C	-10/50°C
Tª de almacenaje	-15/40°C	-20/40°C	-20/50°C	-20/50°C	-20/50°C	-20/50°C

Baterías

Pol.Ind. "Els Mollons", C/Torners, 6
46970, Alaquàs, Valencia.

Tel.: 96 151 70 50 - www.saclimafotovoltaica.com



MAXPOWER CS6X-310 | 315 | 320 | 325 P

The high quality and reliability of Canadian Solar's modules is ensured by 15 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

KEY FEATURES

-  Excellent module efficiency of up to 16.94 %
-  Outstanding low irradiance performance: 96.0 %
-  High PTC rating of up to 91.97%
-  IP67 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa



linear power output warranty



product warranty on materials and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2008 / Quality management system
 ISO/TS 16949:2009 / The automotive industry quality management system
 ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system
 OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: TÜV-Rheinland / VDE / KEMCO / MCS / CE / CEC AU / INMETRO
 UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US)
 UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
 Take-e-way / UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1



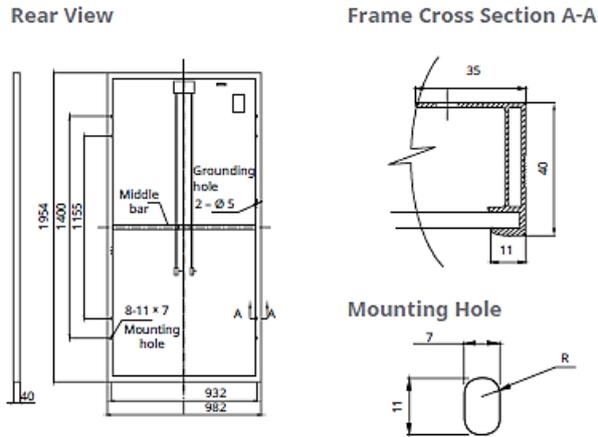
* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 15 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

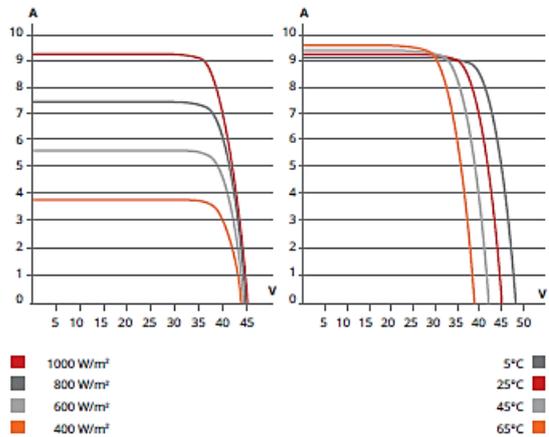
CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6X-320P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6X	310P	315P	320P	325P
Nominal Max. Power (Pmax)	310 W	315 W	320 W	325 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	36.4 V	36.6 V	36.8 V	37.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.52 A	8.61 A	8.69 A	8.78 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.9 V	45.1 V	45.3 V	45.5 V
Short Circuit Current (Isc)	9.08 A	9.18 A	9.26 A	9.34 A
Module Efficiency	16.16%	16.42%	16.68%	16.94%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NOCT*

CS6X	310P	315P	320P	325P
Nominal Max. Power (Pmax)	225 W	228 W	232 W	236 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	33.2 V	33.4 V	33.6 V	33.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.77 A	6.84 A	6.91 A	6.98 A
Open Circuit Voltage (Voc)	41.3 V	41.5 V	41.6 V	41.8 V
Short Circuit Current (Isc)	7.36 A	7.44 A	7.50 A	7.57 A

* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, average relative efficiency of 96.0 % from an irradiance of 1000 W/m² to 200 W/m² (AM 1.5, 25°C).

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

Caution: For professional use only. The installation and handling of PV modules requires professional skills and should only be performed by qualified professionals. Please read the safety and installation instructions before using the modules.

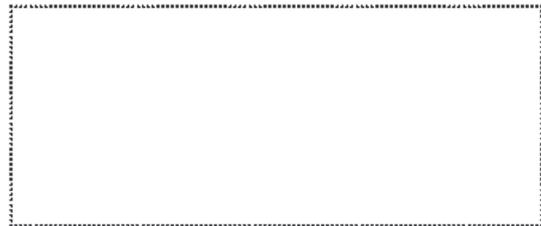
MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6×12)
Dimensions	1954×982×40 mm (76.9×38.7×1.57 in)
Weight	22 kg (48.5 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm² (IEC) or 4 mm² & 12 AWG 1000V (UL), 1150 mm
Connector	T4-1000V or PV2 series
Per Pallet	26 pieces, 620 kg (1366.9 lbs)
Per Container (40' HQ)	624 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temp. Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temp. Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temp. Coefficient (Isc)	0.053 % / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

PARTNER SECTION



Scan this QR-code to discover solar projects built with this module



Anexo D: Algoritmo P&O.

```

function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% Control MPPT basado en el algoritmo P&O.

% D output = Duty cycle del boost converter (valor entre 0 y 1)

% Entrada input = 1 para habilitar el control MPPT
% V input = voltaje de salida del PV array (V)
% I input = corriente del PV array (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Valor Inicial para D output
Dmax = Param(2); %Valor Maximo para D
Dmin = Param(3); %Valor minimo para D
deltaD = Param(4); %Valor de incremento utilizado para aumentar/disminuir el duty cycle D
% ( aumentar D = disminuir Vref )
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
%   if dP>1e-9 & dP<-1e-9 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else D=Dold;
end

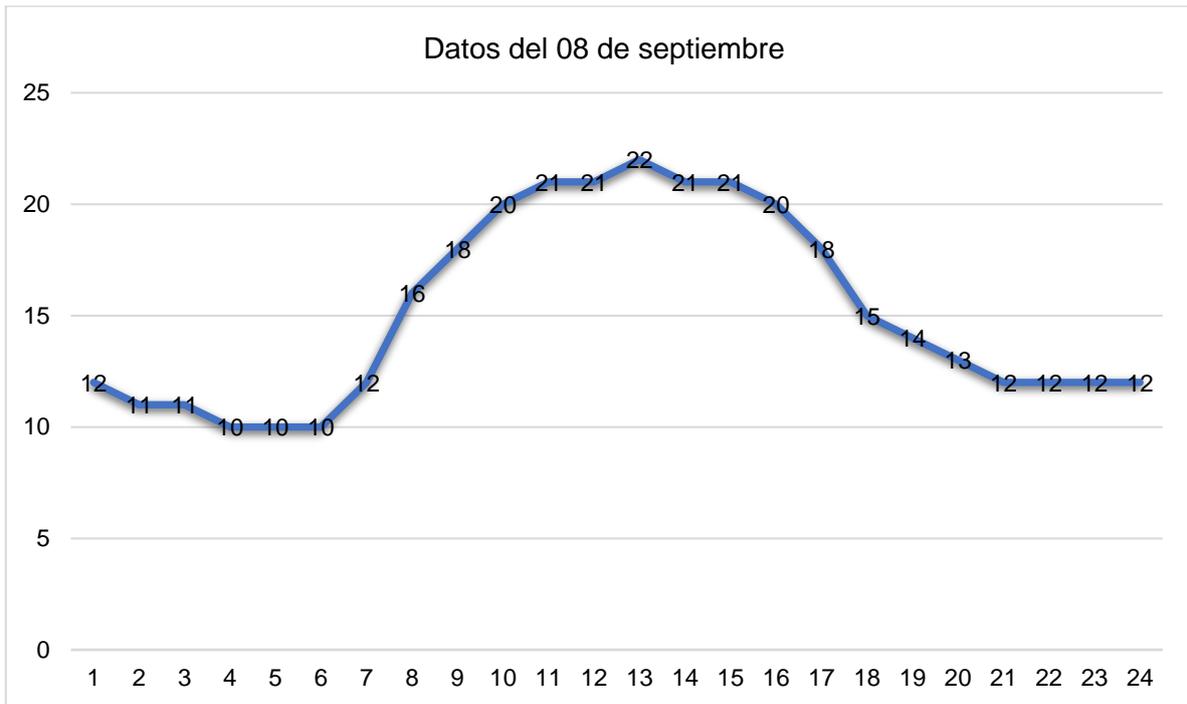
if D >= Dmax || D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;

```

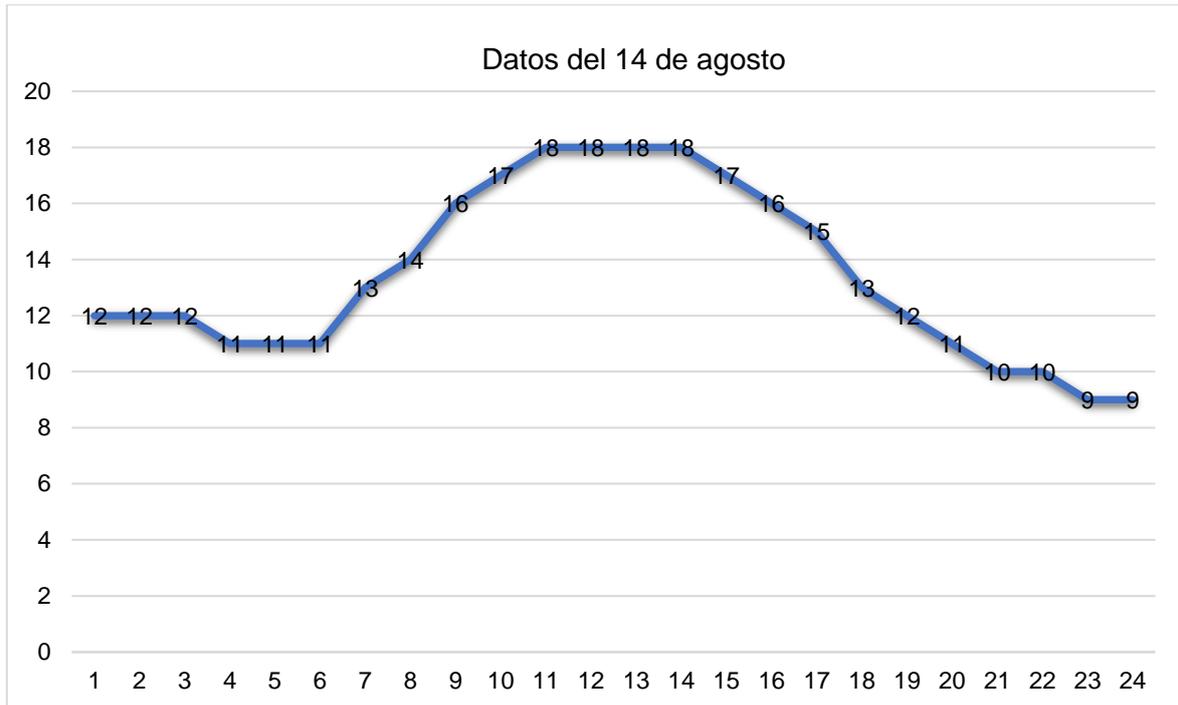
Anexo E: Gráfica de temperatura del día 08/09/2019.

Aquí se puede ver los datos de temperatura del día 08 de septiembre que sirve para encontrar los datos de las constantes del control PID. Los datos se obtienen de National Solar Radiation Database.



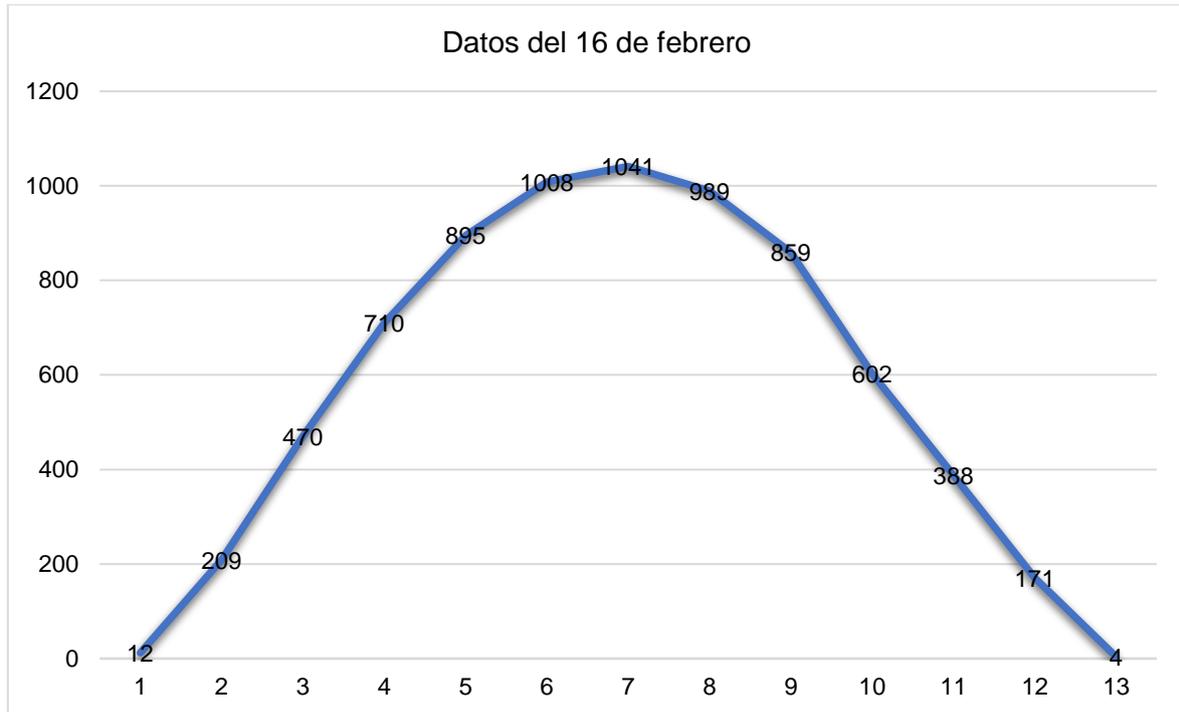
Anexo F: Datos de temperatura del día 14/10/2019.

En este anexo, se examina los datos de la de temperatura del día 14 de agosto que pertenecen a la simulación del primer caso. Esta figura se construyó con los valores adquiridos de National Solar Radiation Database.



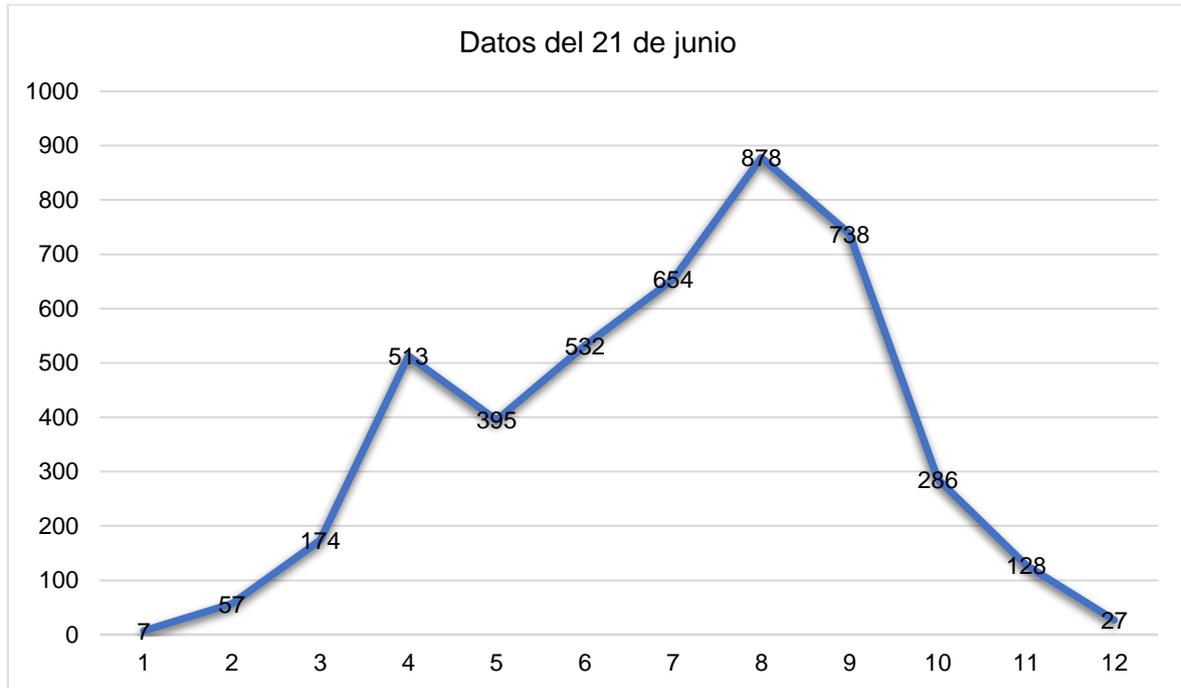
Anexo G: Datos de irradiancia del día 16/02/2019.

La radiación solar del día 16 de febrero, se utiliza para la simulación del segundo caso que se presenta en el Capítulo III. Los datos están en el siguiente anexo se adquirieron de National Solar Radiation Database.



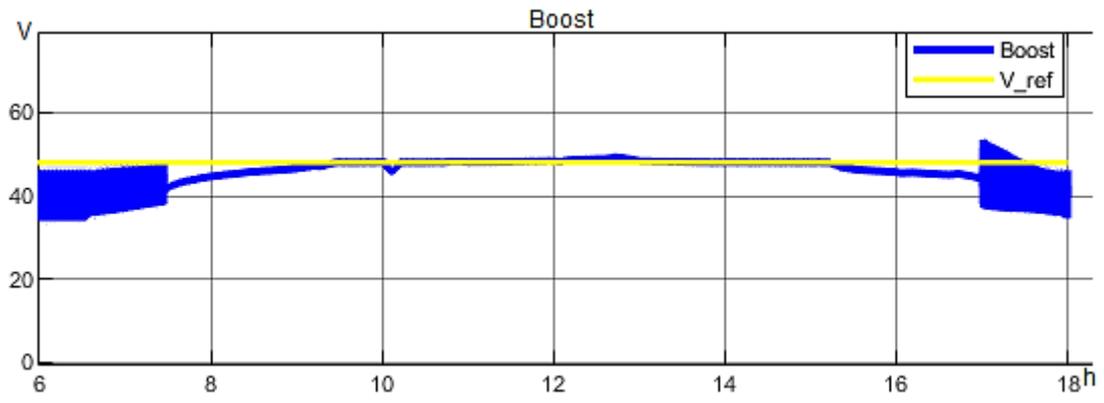
Anexo H: Datos de irradiancia del día 21/06/2019.

Los siguientes datos de radiación solar del día 21 de junio, es para realizar la simulación del tercer caso. Esta gráfica se formó con datos adquiridos de National Solar Radiation Database.



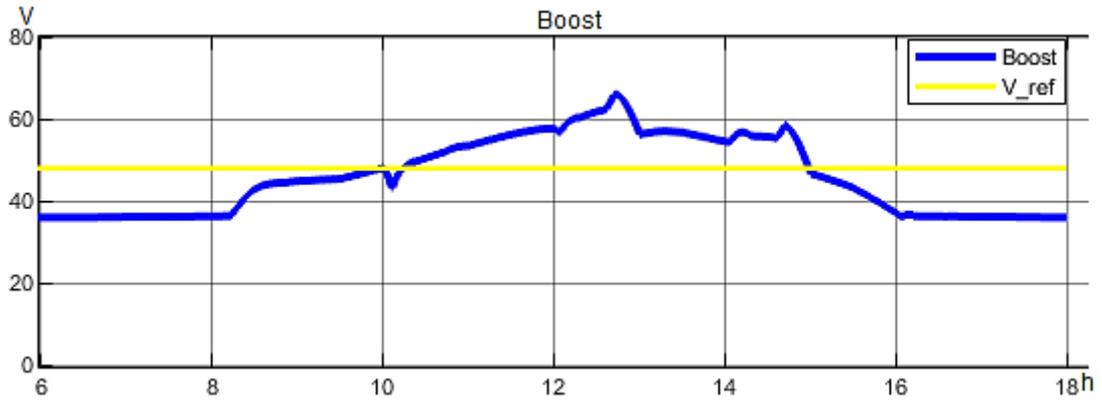
Anexo I: Ajuste de control del primer sistema.

Primera modificación de K_p .



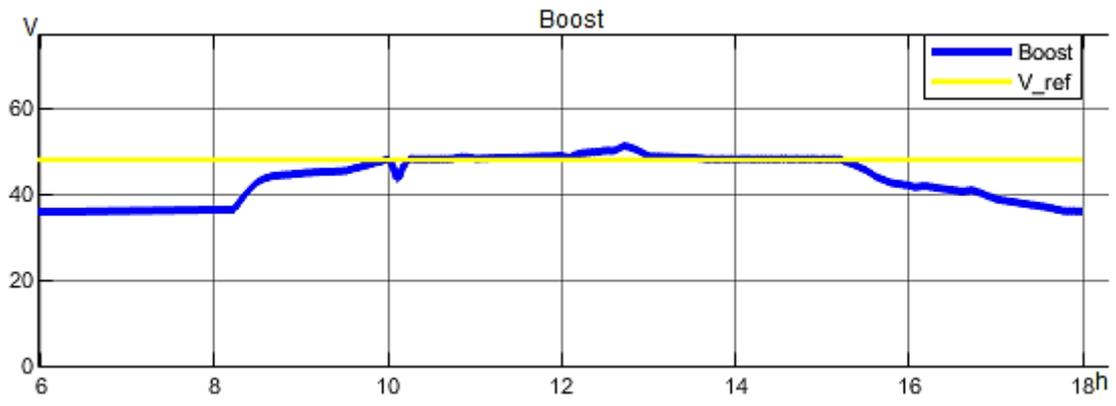
Anexo J: Ajuste de control del primer sistema.

Segunda modificación de K_p .



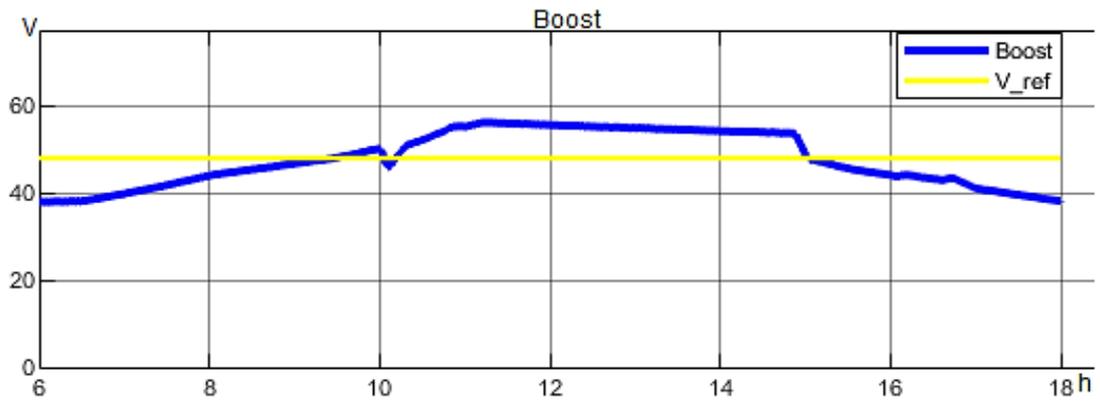
Anexo K: Ajuste de control del primer sistema.

Tercera modificación de K_p , respuesta aceptable de esta constante.



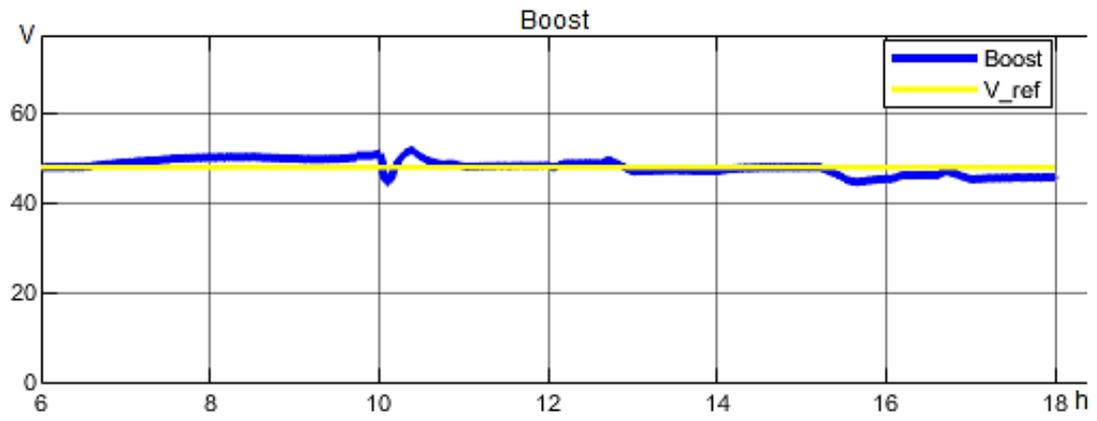
Anexo L: Ajuste de control del primer sistema.

Primera modificación de K_i .



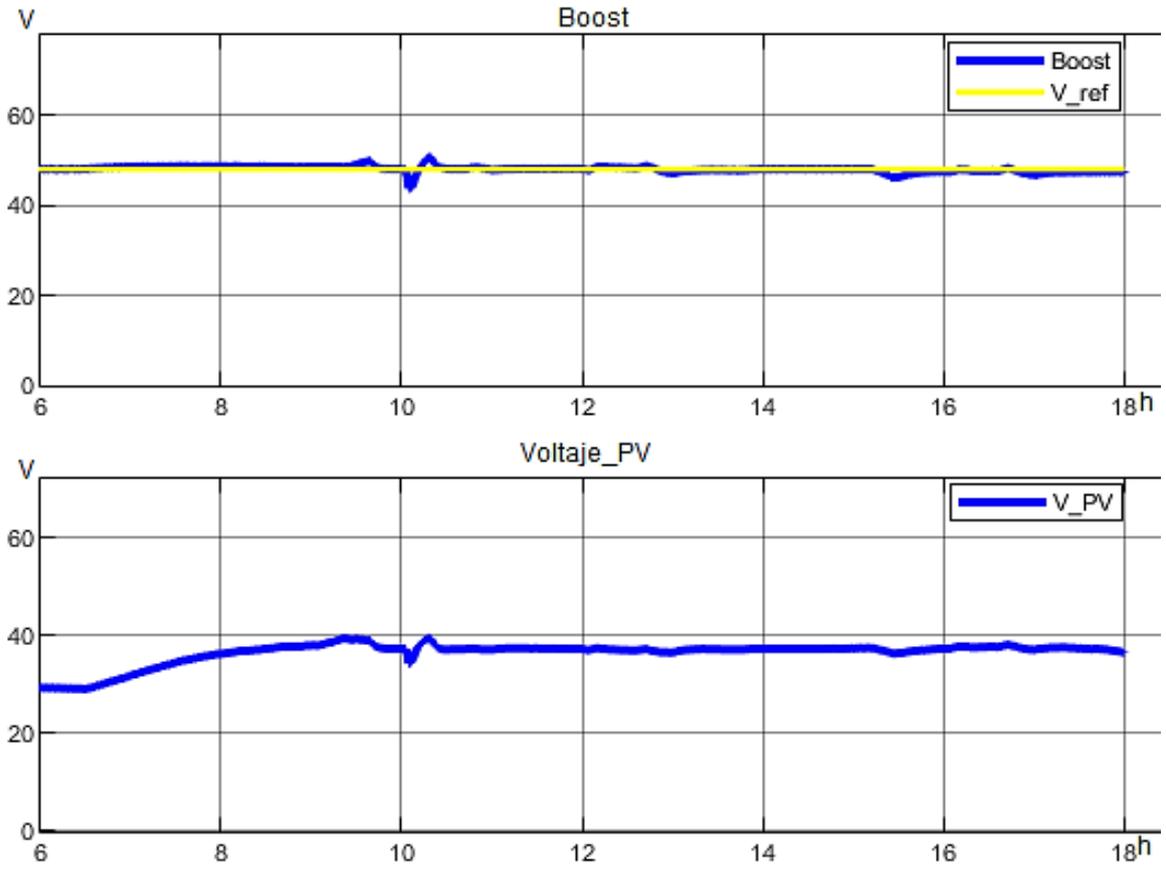
Anexo M: Ajuste de control del primer sistema.

Segunda modificación de K_i .

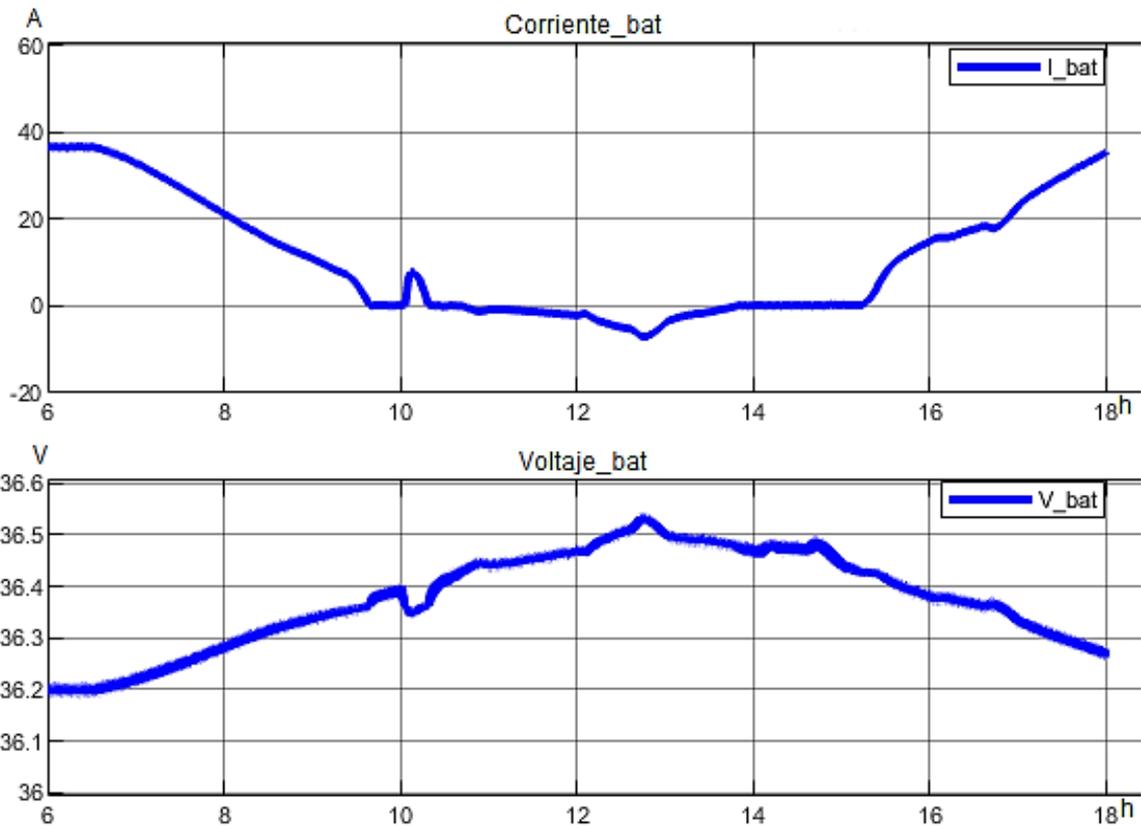


Anexo N: Ajuste de control del primer sistema.

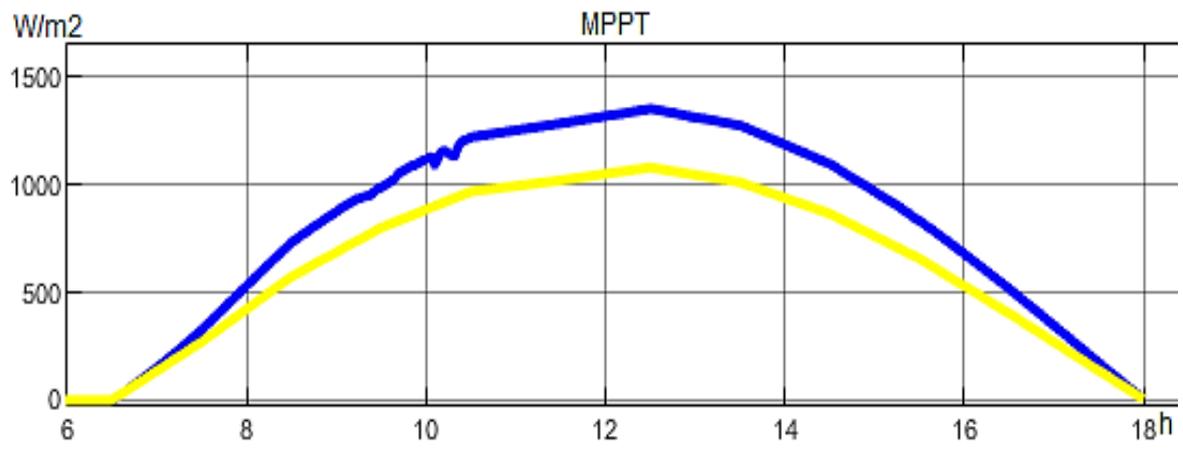
Tercera modificación de K_i , respuesta aceptable del primer sistema.



Anexo O: Ajuste de control del segundo sistema.



Anexo P: Gráfica del MPPT del ajuste de control del sistema.



Anexo Q: Curvas de corriente del ajuste de control del sistema.

