

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

TEMA:

Análisis de factibilidad de un sistema de bombeo en el sector agrícola de la ciudad de Machala usando un sistema fotovoltaico.

AUTOR:

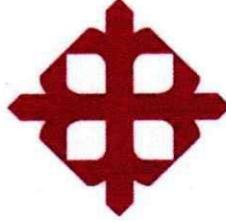
García Gutiérrez, Kevin Gabriel

Componente práctico del examen complejo previo a la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA

REVISOR:

M. Sc. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

**Guayaquil, Ecuador
15 enero del 2023**

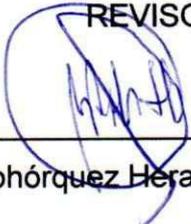


**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **García Gutiérrez, Kevin Gabriel** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA**.

REVISOR

f.  _____

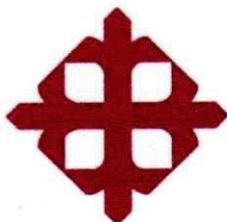
M. Sc. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

DIRECTOR DE CARRERA

f.  _____

M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

Guayaquil, a los 15 días del mes enero de del año 2023



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, García Gutiérrez, Kevin Gabriel

DECLARÓ QUE:

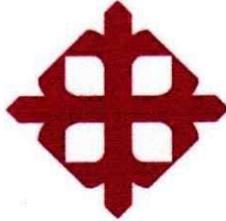
El componente práctico del examen complejo, Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Eléctrico Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los días 15 del mes de enero del año 2023

EL AUTOR

GARCÍA GUTIERREZ, KEVIN GABRIEL



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, García Gutierrez, Kevin Gabriel

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de enero del año 2023

EL AUTOR

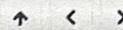
GARCÍA GUTIERREZ, KEVIN GABRIEL

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [GarciaGutierrezKevinGabriel_TrabajoTitulacion2023.docx](#) (D156858998)
Presentado 2023-01-24 22:58 (-05:00)
Presentado por efrain.velez@cu.ucsq.edu.ec
Recibido efrain.velez.ucsq@analysis.orkund.com
Mensaje Kevin Garcia1 [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 22 paginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.



100%

1 Activo

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

TEMA:

Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico

AUTOR: Garcia Gutiérrez, Kevin Gabriel

Componente práctico del examen complejo previo a la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA

REVISOR: M. Sc. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

Guayaquil, Ecuador del 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente

componente práctico del examen complejo,

fue realizado en su totalidad por Garcia Gutiérrez, Kevin Gabriel como requerimiento para la obtención del título de INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico principalmente a Dios, por ser el guía, apoyo, sobre todo las fuerzas para continuar en este proceso de obtener una de mis metas más deseadas.

A mi madre, por su amor, paciencia, trabajo y mucho sacrificio en todos estos años, gracias a ti mama hemos logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. He sido el orgullo y el privilegio de ser tu hijo, eres la mejor madre.

A mi padre, que, pese a partir de mi vida en una corta edad me enseñaste lo que era ser fuerte y perseverante y pelearla hasta el final, que pese a tener una enfermedad crónica estuviste hasta lo último conmigo.

A mi hermano por estar siempre presente, acompañándome en cada etapa de no solo este logro sino de lo largo de mi vida.

EL AUTOR

GARCÍA GUTIERREZ, KEVIN GABRIEL

AGRADECIMIENTO

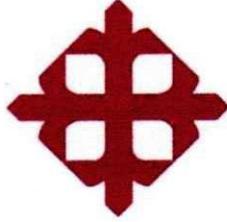
Sin duda alguna existen muchas personas a quien agradecer debido a que se han involucrado en el desarrollo de este trabajo, pero sin embargo en especial a mi Mamá que con su esfuerzo durante tantos años de trabajo y mucho tiempo y dedicación me ayudo y me direcciono a culminar mi carrera universitaria y me dio el apoyo incondicional para no decaer cuando todo se veía imposible.

Así mismo, agradezco a Dios por siempre guiarme por medio de mi Padre y de mi abuela en el transcurso de este camino muy arduo que es mi carrera universitaria.

De igual manera, agradezco a todos los docentes, que gracias a sus conocimientos hoy puedo culminar mi carrera universitaria al igual que todos los consejos recibidos me han hecho crecer como persona.

EL AUTOR

GARCÍA GUTIERREZ, KEVIN GABRIEL

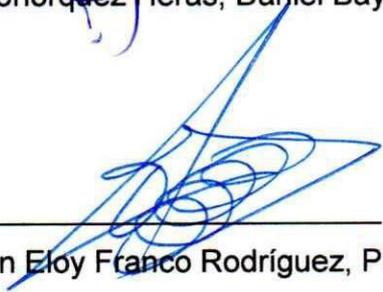


**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

f. 

Ing. John Eloy Franco Rodríguez, Ph.D.

f. 

M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

ÍNDICE GENERAL

Contenido

Resumen	XV
Abstract	XV
CAPÍTULO 1.....	2
1.1. Introducción.	2
1.2. Objetivo General.....	3
1.3. Objetivos Específicos.	4
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1. Descripción general de los sistemas de bombeo fotovoltaico.	5
2.2. Descripción de la energía solar renovable.	5
2.2.1. Efecto fotovoltaico.	6
2.2.2. Los diferentes tipos de células fotovoltaicas.....	6
2.2.3. El módulo de celdas fotovoltaicas.	7
2.3. Características de las celdas solares fotovoltaicas.....	8
2.4. Parámetros de rendimiento del módulo fotovoltaico.....	9
2.5. Tipos de paneles solares fotovoltaicos.	11
2.5.1. Panel solar fotovoltaico.	11
2.5.2. Paneles solares térmicos y termodinámicos	12
2.6. Estructura de un sistema de bombeo fotovoltaico	12
2.6.1. Principio de operación y funcionamiento de las celdasfotovoltaicas.....	13
2.6.2. Tipos de configuraciones del modelado de celdas fotovoltaicas.....	15
CAPÍTULO 3.....	16
3.1. Descripción general del componente práctico.....	16
3.2. Modelo matemático de una celda solar fotovoltaica.....	16
3.2.2. Celda real: modelo de diodo único.	17
3.2.3. Parámetros de la celda fotovoltaica.....	20
3.3. Modelización del generador fotovoltaico.....	21
3.3.1. Modelización del sistema en MatLab/Simulink.....	22
3.3.2. Característica voltaje-corriente del generador fotovoltaico.	23
3.3.3. Característica de potencia-voltaje del generador fotovoltaico.....	23
3.3.4. Conexión de celdas fotovoltaicas en paralelo.....	24
3.3.5. Conexión de celdas fotovoltaicas en serie.....	24
3.4. Modelización del dispositivo de potencia tipo Boost (elevador).	27
3.5. Modelización del inversor en el sistema fotovoltaico.....	29
3.5.1. Mecanismo de funcionamiento de la modulación por ancho depulso (PWM) en el	

inversor de onda sinusoidal.....	31
3.6. Modelización del motor AC asíncrono.....	33
3.7. Modelización de la bomba de agua.....	34
3.8. Dimensionamiento de la instalación de bombeo.	36
3.8.1. Dimensionamiento de la irradiación solar.....	36
3.8.2. Dimensionamiento de la bomba de agua centrífuga.....	37
3.8.3. Dimensionamiento del módulo fotovoltaico.....	38
3.8.4. Dimensionamiento de la potencia máxima del generadorfotovoltaico.....	39
3.8.5. Dimensionamiento de la cantidad de módulos fotovoltaicos.	39
3.9. Análisis de los resultados obtenidos en la simulación enMatLab/Simulink. ...	39
3.10. Análisis de Factibilidad del Sistema de Bombeo Fotovoltaico.	45
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
4.1 Conclusiones.....	49
4.2 Recomendaciones.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Representación de los tipos de celdas fotovoltaicas de silicio (a) monocristalino, (b) policristalino y (c) amorfo.....	7
Figura 2. 2: Estructura de un sistema de control de lazo abierto.	8
Figura 2. 3: Curvas características I-V y P-V de un módulo de energía solar fotovoltaica.....	9
Figura 2. 4: Aplicación de paneles solares fotovoltaicos para generación de energía eléctrica.....	12
Figura 2. 5: Diagrama esquemático de un sistema de bombeo fotovoltaico o solar.....	13
Figura 2. 6: Diagrama esquemático de la estructura interna de una celda fotovoltaica.	14

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Representación esquemática a base de diodos sin resistencia de derivación	16
Figura 3. 2: Representación esquemática a base de diodos con resistencia de derivación	17
Figura 3. 3: Simulación del generador fotovoltaico en Simulink.	22
Figura 3. 4: Respuesta al escalón de $H(s)$	23
Figura 3. 5: Diagrama de simulación del controlador $V(k)$	23
Figura 3. 6: Características obtenidas de una agrupación de N_p celdas en paralelo.....	24
Figura 3. 7: Características obtenidas de una agrupación de N_s celdas en serie.....	25
Figura 3. 8: Influencia de la intensidad luminosa en la curva característica I-V	25
Figura 3. 9: Influencia de la intensidad luminosa en la curva característica P-V	26

Figura 3. 10: Efecto de la intensidad luminosa en la curva característica I-V.....	27
Figura 3. 11: Efecto de la intensidad luminosa en la curva característica P-V.....	27
Figura 3. 12: Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost).....	28
Figura 3. 13: Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost) cuando el switch está cerrado.....	28
Figura 3. 14: Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost) cuando el switch está abierto.....	29
Figura 3. 15: Circuito esquemático del inversor DC/AC para el motor AC.....	31
Figura 3. 16: Representación gráfica del funcionamiento de la modulación por ancho de pulso (PWM).	32
Figura 3. 17: Motor AC asíncrono de 1.5 kW	33
Figura 3. 18: Modelado del motor AC asíncrono.....	34
Figura 3. 19: Equipo de bomba de agua centrífuga acoplada al motor asíncrono.....	35
Figura 3. 20: Recopilación de información meteorológica desde el software PVsyst.	37
Figura 3. 21: Módulo fotovoltaico monocristalino SES 75-P....	38
Figura 3. 22: Gráfica de la corriente del estator.....	40
Figura 3. 23: Curva de velocidad del motor para una referencia de 157 rad/s.....	41
Figura 3. 24: Curva de velocidad de rotación de la bomba (rad/s).	42
Figura 3. 25: Curva de torque del motor debido a la aplicación del torque resistivo de la bomba.....	42
Figura 3. 26: Característica de torque versus velocidad y punto de funcionamiento.....	43
Figura 3. 27: Curva de la capacidad del caudal (Q) de la bomba.	43

Figura 3. 28: Curva de altura de la bomba (m)	44
Figura 3. 29: Curva de rendimiento del motor-bomba a velocidad constante	44
Figura 3. 30: Esquema del diseño del sistema de bombeo de agua usando sistema solar fotovoltaico enfocado al sector agrícola.....	46
Figura 3. 31: Dispositivos del sistema de bombeo fotovoltaico en el sector agrícola.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Descripción y relación matemática de los principales parámetros de rendimiento	11
--	----

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de la celda fotovoltaica en condiciones nominales y estándar.....	18
Tabla 3. 2: Valores mensuales de irradiación solar en Machala.	36
Tabla 3. 3: Costos del proyecto de implementación del sistema de bombeo de agua mediante paneles solares fotovoltaicos.	48

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló la propuesta del tema <Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico= previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Eléctrico-Mecánico. En la actualidad los sistemas de paneles solares fotovoltaicos son tendencia en el ámbito investigativo y de generación de energía eléctrica limpia lo que reduce la contaminación ambiental. Uno de las aplicaciones más relevante en el uso de energía renovable mediante el uso de celdas fotovoltaicas se da en el sector agrícola; en este caso se hizo un análisis de luminosidad solar en la ciudad de Machala para ver la factibilidad de implantación en el sector agrícola de la región en mención. Se presentó el modelado del sistema propuesto, así como el dimensionamiento del sistema de bombeo en el sector agrícola de la Ciudad de Machala y finalmente el costo aproximado de la implantación del sistema propuesto en el presente trabajo.

Palabras claves: ENERGÍA, FOTOVOLTAICA, FACTIBILIDAD, CONVERTIDORES, RENDIMIENTO, CELDAS.

Abstract

In the present work, the proposal of the theme "Feasibility Analysis of a Pumping System in the Agricultural sector of the city of Machala using a Photovoltaic System" was developed prior to obtaining the academic degree of Electrical-Mechanical Engineer. Currently, photovoltaic solar panel systems are a trend in the field of research and the generation of clean electrical energy, which reduces environmental pollution. One of the most relevant applications in the use of renewable energy through the use of photovoltaic cells occurs in the agricultural sector; In this case, an analysis of solar luminosity was made in the city of Machala to see the feasibility of implementation in the agricultural sector of the region in question. The modeling of the proposed system was presented, as well as the dimensioning of the pumping system in the agricultural sector of the City of Machala and finally the approximate cost of the implementation of the system proposed in this work.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO

1.1. Introducción.

La creciente demanda de agua en las zonas rurales y remotas ha suscitado un creciente interés por el uso de generadores fotovoltaicos como fuente de energía para los grupos de motobombas. En efecto, la realización de sistemas de bombeo autónomos, fiables y eficaces es una solución práctica y económica al problema de la escasez de agua en las regiones tropicales. Por ejemplo, en la provincia de El Oro es donde existen la mayor cantidad de agricultores. En los cantones de Machala, Pasaje, El Guabo y Santa Rosa se encuentran los agricultores que cultivan banano, camarones, cacao, café y maíz.

Entre las importantes ventajas de la conversión fotovoltaica, se pueden mencionar el hecho de descentralizar la producción de energía para comunidades pequeñas y muy dispersas, como ya han demostrado diversas investigaciones sobre las bombas solares, cuyo funcionamiento ha resultado ser muy aceptable, y la autonomía del sistema fotovoltaico, que es autónomo en cuanto a su ubicación, pero igualmente importante es la autonomía de funcionamiento. (Hernández, 2017)

Uno de los sistemas fotovoltaicos interesantes desde el punto de vista de la facilidad de instalación y utilidad, así como de la autonomía y fiabilidad, es el sistema de bombeo fotovoltaico. Este sistema se utiliza ampliamente en zonas rurales y en lugares aislados para el bombeo de agua, ya que en la mayoría cuentan con pozos y la extracción puede ser manual o mediante una bomba de agua, esta última involucra un costo muy alto en el consumo de energía eléctrica. La instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico así definida está sujeta a los siguientes requisitos:

- buen rendimiento,
- excelente fiabilidad,
- y largo período de funcionamiento.

Un sistema de bombeo fotovoltaico se compone de:

1. Un generador propiamente dicho compuesto por módulos fotovoltaicos, que se interconectan eléctricamente para formar una unidad de generación de energía en corriente continua. También incluye una estructura metálica de soporte de la unidad.
2. Unidad de acondicionamiento de la energía, compuesta por un convertidor (inversor), capaz de variar la frecuencia y la tensión de salida en función de la potencia disponible del generador solar, a su vez en función de la irradiación solar que recibe.
3. Grupo de bombeo electrónico de inmersión, compuesto por un motor eléctrico de inducción y una bomba centrífuga o de desplazamiento positivo.
4. Cableado eléctrico, a través del cual se transmite la energía del generador al motor, e información relativa a los controles de seguridad.

La importancia del presente trabajo de examen complejo es ahorrar el costo de una implementación y más bien presentar un estudio del dimensionamiento y simulación de un sistema de bombeo fotovoltaico a través del software MatLab/Simulink aplicando el método de control del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). El presente estudio es aplicable para el cantón de Machala, aunque en otros cantones de la Provincia de El Oro los valores de irradiación solar no varían y también se puede usar el presente trabajo para propuestas de implementación en producción agrícola para aprovechar el sistema de bombeo fotovoltaico en riego de agua por goteo o aspersión.

1.2. Objetivo General.

Realizar el análisis de factibilidad mediante el dimensionamiento y simulación de un sistema de bombeo fotovoltaico usando el método de control del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) sobre el software MatLab/Simulink.

1.3. Objetivos Específicos.

- a. Describir el estado del arte de los sistemas fotovoltaicos aplicados en el bombeo de agua.
- b. Realizar el dimensionamiento y simulación del sistema de bombeo utilizando energía solar fotovoltaica mediante el método de control del MPPT a través del software MatLab/Simulink.
- c. Analizar los resultados obtenidos del modelo de simulación implementado en MatLab/Simulink del sistema de bombeo fotovoltaico.
- d. Elaborar la factibilidad para la implementación del sistema de bombeo mediante energía solar fotovoltaica.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Descripción general de los sistemas de bombeo fotovoltaico.

La primera generación de sistemas de bombeo fotovoltaicos, especialmente los destinados a aplicaciones de baja y media altura, incorporaban motores de corriente continua de imanes permanentes. En los últimos años, un motor asíncrono accionado por un variador de frecuencia se ha convertido en el motor estándar para las aplicaciones de bombeo solar. Esto se debe principalmente a su simplicidad, robustez y bajo coste en comparación con el motor de corriente continua. (Hernández, 2017) (González, 2010)

Un sistema de bombeo fotovoltaico se ha convertido en un tema importante hoy en día. Para la mejora de las condiciones de vida y el desarrollo de las zonas rurales y desérticas. En este sistema, es esencial un tanque de almacenamiento, y el agua se bombea cuando hay suficiente luz solar. El agua se distribuye por gravedad a los consumidores o para riego agrícola. (Hernández, 2017) (González, 2010)

2.2. Descripción de la energía solar renovable.

La conversión fotovoltaica es un proceso que genera energía eléctrica a partir de la energía luminosa. La luz contiene energía en forma de fotones. Estos fotones pueden interactuar con los absorbentes de luz y excitar a los electrones desde un nivel de energía más bajo y estados ligados a niveles de energía más altos en los que pueden moverse libremente. En el ejemplo más sencillo, si la energía de los fotones es superior a la diferencia de energía entre dos estados, podría producirse la transición. La determinación más precisa de la posibilidad de esta transición es según el momento de transición, esto es, la superposición de la función de onda de estos dos estados. (García, 2010)

A veces, si la energía del fotón es tan alta que los electrones excitados obtienen suficiente energía para escapar de la superficie sólida, entonces lo llamamos efecto fotoeléctrico. Por la explicación elaborada de este fenómeno, Einstein ganó el Premio Nobel de 1905. Pero en la mayoría de los casos, los electrones excitados colisionarían con su entorno y pronto perderían su energía a la temperatura de la red. Con el exceso de energía, se podría generar un potencial. Sin embargo, si la estructura es capaz de extraer estos electrones antes de que pierdan todo el exceso de energía y utilizar este potencial para crear trabajo sobre las cargas, entonces se denomina a esta estructura dispositivo fotovoltaico o célula solar. (García, 2010)

2.2.1. Efecto fotovoltaico.

Las celdas fotovoltaicas son componentes optoelectrónicos que convierten la luz solar directamente en electricidad. Están hechos de materiales semiconductores. En la mayoría de los casos, el material básico es el silicio. Dependiendo del proceso de fabricación, se pueden obtener celdas solares más o menos eficientes en forma amorfa, policristalina o monocristalina. Se pueden utilizar otros materiales: arseniuro de galio, telurio de cadmio, entre otros. (García, 2010)

2.2.2. Los diferentes tipos de células fotovoltaicas.

Los tipos de celdas o células fotovoltaicas se clasifican en:

a. Celdas monocristalinas:

- Se trata de la primera generación de celdas solares;
- Una tasa de eficacia excelente (12-16 %) (23 % en el laboratorio)
- Proceso de fabricación laborioso y difícil, por lo que es muy caro
- La obtención de un cristal puro requiere una gran cantidad de energía

b. Celdas policristalinas:

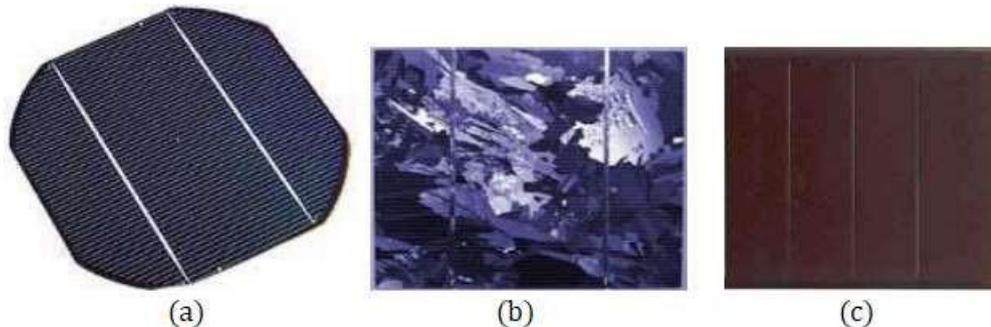
- Menor coste de producción en relación con las celdas monocristalinas.
- Proceso menos intensivo en energía
- Rendimiento 11-13 % (18 % en laboratorio)

- c. Celdas amorfas (muy utilizadas en celdas de calculadoras):
- Coste de producción mucho menor;
 - Menor eficiencia: 8-10 % (13 % en laboratorio);
 - Menor duración de la vida.

El silicio amorfo se encuentra con mayor frecuencia en productos de consumo como calculadoras, relojes, etc. Sin embargo, reacciona mejor a las altas temperaturas o a la luz difusa. Además, las celdas monocristalinas y policristalinas son los tipos de células más comunes en el mercado fotovoltaico (alrededor del 60% de la producción). En la Figura 2.1 se muestran los tipos de celdas fotovoltaicas de silicio. (Arencibia, 2016)

Figura 2. 1

Representación de los tipos de celdas fotovoltaicas de silicio (a) monocristalino, (b) policristalino y (c) amorfo.



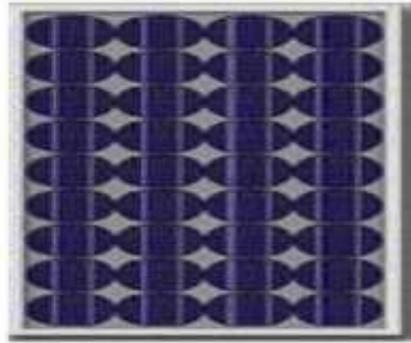
Fuente: Arencibia, 2016

2.2.3. El módulo de celdas fotovoltaicas.

El módulo es el elemento principal de un sistema fotovoltaico, que se compone de varias celdas que están conectadas entre sí por un circuito eléctrico. La célula individual, la unidad básica de un sistema fotovoltaico, sólo produce una cantidad muy pequeña de energía eléctrica, normalmente de 1 a 3 W a un voltaje inferior a 1[V]. Para producir más energía, las celdas se ensamblan para formar un módulo o panel fotovoltaico (véase la Figura 2.2). Las conexiones en serie de varias celdas aumentan el voltaje, pero con la misma corriente, mientras que una conexión en paralelo aumenta la corriente manteniendo el mismo voltaje. (Arencibia, 2016)

Figura 2. 2

Estructura de un sistema de control de lazo abierto.



Fuente: Arencibia, 2016

La mayoría de los módulos del mercado están compuestos por 36 celdas de silicio cristalino, conectadas en serie para aplicaciones de 12 V. La corriente de salida, y por tanto la potencia, será proporcional a la superficie del módulo. La interconexión de módulos -en serie o en paralelo- para obtener una potencia aún mayor, define la conceptualización de un conjunto fotovoltaico. El sistema fotovoltaico está formado por un conjunto de módulos y una serie de componentes que se encargan de adaptar la electricidad producida por los módulos a las especificaciones de los consumidores. (MICSEE, 2014)

2.3. Características de las celdas solares fotovoltaicas.

En esta sección se describe las características de las celdas solares fotovoltaicas. La fotocorriente en cortocircuito de una celda solar bajo la luz es J_{sc} . Depende tanto de la luz incidente y de su eficiencia cuántica externa (ECE). La ECE es la probabilidad de generar un electrón por fotón incidente. (Abella, 2016)

$$J_{sc} = q \int f_s(E) ECE(E) dE$$

Donde, $f_s(E)$ es el flujo espectral de fotones, el número de fotones con energía en el intervalo de E hasta $E + dE$ por unidad de tiempo y por unidad de superficie. El ECE depende del coeficiente de absorción de los materiales, de la eficiencia de generación de carga y de la eficiencia de recogida de carga.

La relación entre la ECE y la absorción de una celda solar es la eficiencia cuántica interna (ECI), es decir, la probabilidad de generar un electrón por fotón absorbido. La ECE puede ser función de la energía o de la longitud de onda, con una relación como la siguiente, (Abella, 2016)

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

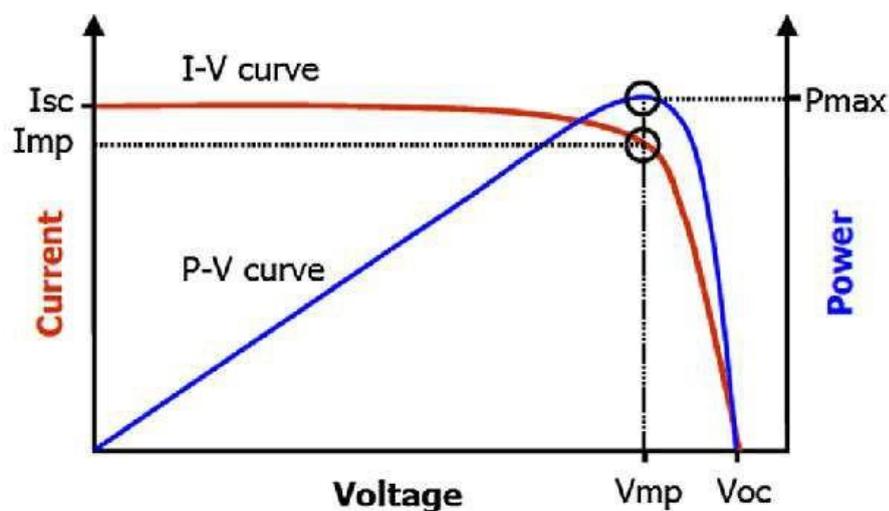
Donde, E es el potencial eléctrico (eV) y λ es la longitud de onda (nm). Para la irradiación espectral solar, la referencia más utilizada es el espectro AM 1.5 G, en industria fotovoltaica y en el ámbito académico. El flujo espectral de fotones se obtiene fácilmente a partir de los espectros de irradiación espectral. Por lo tanto, se podría calcular la J_{sc} de una celda solar integrando los espectros ECE. (Abella, 2016)

2.4. Parámetros de rendimiento del módulo fotovoltaico.

Los parámetros de rendimiento de los módulos fotovoltaicos (FV) se evalúan a partir de las curvas I-V y P-V, en la que "I" representa la corriente, "V" el voltaje o tensión y "P" la potencia, tal como se muestra en la Figura 2.3. El trazado de las curvas I-V y P-V son los principales métodos de análisis del rendimiento fotovoltaico. Estos métodos determinan la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, el factor de llenado y el punto de máxima potencia. punto de máxima potencia. (Mathew, 2018)

Figura 2. 3

Curvas características I-V y P-V de un módulo de energía solar fotovoltaica.



Fuente: (Ndiaye., 2014)

De la Figura 2.3 se denota que:

- a. Voltaje en circuito abierto (V_{oc}): es el valor del voltaje medido en las condiciones de funcionamiento STC o en tiempo real poniendo los terminales de la celda fotovoltaica en condición de circuito abierto. El valor del voltaje registrado en esta condición será generalmente superior al voltaje máximo alcanzado en el punto máximo. (Ndiaye., 2014)
- b. Corriente de cortocircuito (I_{sc}): es la corriente máxima que se genera cuando se hace funcionar una celda solar fotovoltaica en STC, o en condiciones de tiempo real, se denomina I_{sc} . Mientras se mide esta corriente, los terminales de la celda fotovoltaica se cortocircuitan mediante alguna carga. El valor de la corriente en este punto será superior a la corriente que se alcanza en el punto de máxima potencia. (Ndiaye., 2014)
- c. Punto de máxima potencia (P_{max}): una celda fotovoltaica es capaz de producir la máxima potencia en un punto concreto, y dicho punto se denomina punto de máxima potencia (MPP). El voltaje y corriente registradas en este punto suelen denominarse voltaje y corriente máximas. Estos valores pueden variar en función de la intensidad de la radiación solar, así como de otros parámetros meteorológicos locales. (Ndiaye., 2014)

A continuación, se definen brevemente varios parámetros característicos del rendimiento. Las fórmulas matemáticas utilizadas para evaluar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos se destacan en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1

Descripción y relación matemática de los principales parámetros de rendimiento.

Parámetros	Relación matemática	Descripción
Potencia de entrada	$P_{IN} = AI$	Es la cantidad de energía solar potencial disponible y es el producto del área (A) del módulo fotovoltaico por la radiación solar incidente (I).
Potencia de salida	$P_{out} = V_{may}I_{may}$	Es el producto de la corriente y tensión máximas en un momento dado. Simplemente se denomina potencia en los terminales
Eficiencia de conversión de energía	$PEC = \frac{P_{out}}{AI} \times 100$	Es la relación entre la potencia de salida y la de entrada. En general, representa el rendimiento de la célula fotovoltaica.
Factor de rendimiento	$F_R = \frac{P_{out}}{V_{oc}I_{sc}}$	Es un factor que representa la calidad de la célula fotovoltaica. Se expresa simplemente como la relación entre la potencia de salida y el producto de la tensión y la corriente en circuito abierto

Fuente: (Ndiaye., 2014)

Aportado: Autor

2.5. Tipos de paneles solares fotovoltaicos.

2.5.1. Panel solar fotovoltaico.

El panel solar o (generador fotovoltaico) está formado por módulos fotovoltaicos interconectados en serie y/o en paralelo para producir la energía necesaria. Estos módulos se montan en un marco metálico que soporta el panel solar con un ángulo de inclinación determinado, tal como se muestra en la Figura 2.4. Este concepto ya es famoso en países como Australia, Reino Unido, Europa y Estados Unidos de América, entre otros. y se está haciendo muy popular en el mercado de los paneles solares de Ecuador también. Incluso los paneles solares usados se están utilizando en estos países para que el coste de instalación se reduzca aún más y sea fácil para la gente generar energía verde. (Bathia, 2014)

Figura 2. 4

Aplicación de paneles solares fotovoltaicos para generación de energía eléctrica.



Fuente: (Bhatia, 2014)

2.5.2. Paneles solares térmicos y termodinámicos

Este tipo de paneles solares se clasifican en:

a) domésticos o residenciales (térmicos):

El principio de este sistema es utilizar un fluido de transferencia de calor. El fluido se calienta en paneles expuestos al sol. Este fluido transfiere su calor al agua para uso doméstico en intercambiadores. (Bhatia, 2014)

b) Industrial (termodinámica):

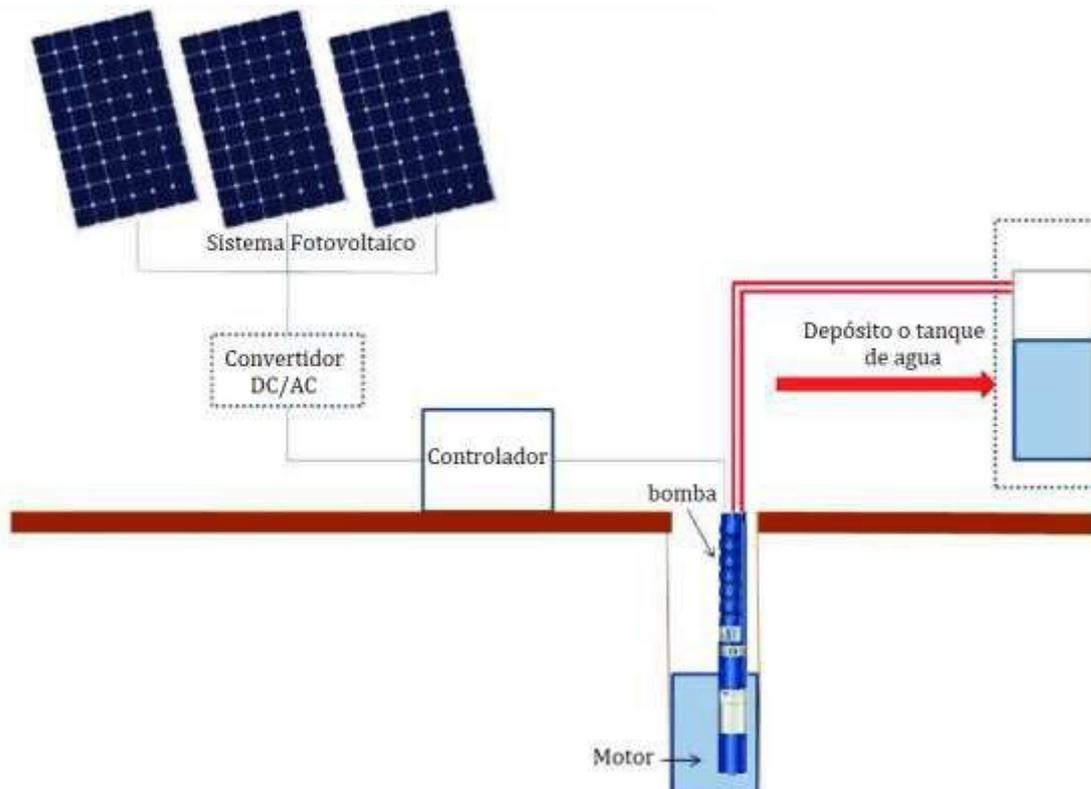
Una central termodinámica es un conjunto de técnicas cuyo objetivo es transformar la energía irradiada por el sol en calor a alta temperatura. El agua calentada por la temperatura se transforma en vapor, que se envía a una turbina. Un alternador, conectado a la turbina, produce entonces electricidad. (Bhatia, 2014)

2.6. Estructura de un sistema de bombeo fotovoltaico

Normalmente, un sistema de bombeo fotovoltaico consta de un conjunto fotovoltaico, de convertidores DC/AC, subsistema de bombeo (motor y bomba), tuberías y accesorios y, por último, un depósito de agua, tal como se observa en la Figura 2.5. En los sistemas de bombeo fotovoltaicos que funcionan con energía solar, el almacenamiento de agua en depósitos es la solución más adoptada, frente al almacenamiento electroquímico en baterías.

El bombeo de agua mediante energía fotovoltaica se utiliza para el suministro de agua potable y para el riego de agua a pequeña escala. (Singh, 2019)

Figura 2. 5
Diagrama esquemático de un sistema de bombeo fotovoltaico o solar.



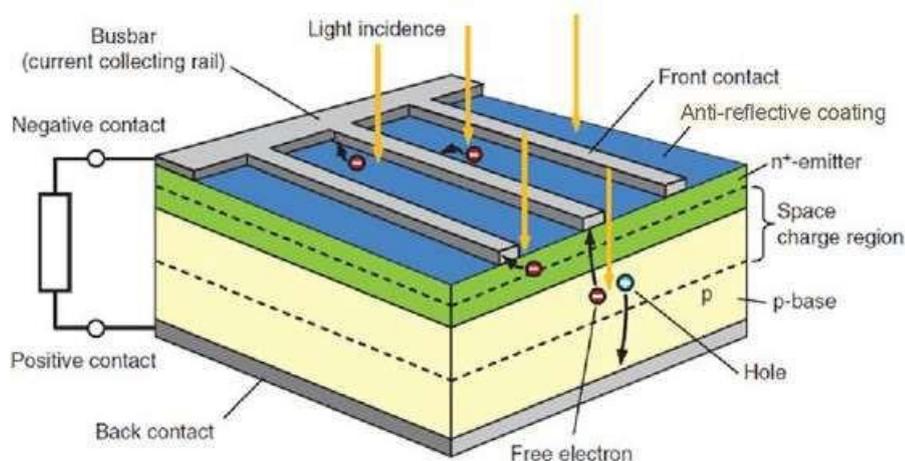
Fuente: (Singh, 2019)

2.6.1. Principio de operación y funcionamiento de las celdas fotovoltaicas.

Una celda fotovoltaica es un dispositivo semiconductor basado generalmente en el silicio. Está formado por dos capas, una dopada con P y otra con N, creando una unión PN con una barrera de potencial. Cuando los fotones son absorbidos por el semiconductor, transfieren su energía a los átomos de la unión PN para que los electrones de estos átomos se liberen y creen electrones (cargas N) y huecos (cargas P). Esto crea una diferencia de potencial entre las dos capas. Esta diferencia de potencial es medible entre las conexiones terminales positivas y negativas de la celda. La Figura 2.6 muestra la estructura de una celda fotovoltaica. (Guerra et al., 2018)

Figura 2. 6

Diagrama esquemático de la estructura interna de una celda fotovoltaica.



Fuente: (Guerra, 2018)

El generador fotovoltaico se compone de varios módulos ensamblados en serie y en paralelo en función de la potencia necesaria. Cada módulo se compone a su vez de celdas fotovoltaicas, generalmente ensambladas en serie. Estos se encapsulan en la misma estructura para formar un módulo. La encapsulación así conseguida tendrá dos funciones principales:

- Protección de las celdas contra las agresiones externas (golpes, humedad, corrosión, polvo, entre otros.).
- Control de la temperatura de las celdas que permita una buena disipación hacia el exterior de la parte de la energía incidente que no se transforma en energía eléctrica. (Guerra, 2018)

Como el voltaje suministrado por una celda fotovoltaica es muy bajo, y con el fin de obtener voltajes compatibles con las cargas a suministrar, es necesario combinar varias celdas en serie o en paralelo. Además, el generador fotovoltaico se obtiene interconectando módulos en serie y/o en paralelo para obtener una potencia aún mayor. A continuación, se describen las características de un módulo fotovoltaico (Guerra, 2018):

- La potencia máxima (P_{max}): potencia eléctrica máxima que el módulo puede proporcionar en condiciones estándar (25°C y 1000W/m² de irradiación).

- La característica I-V: curva que representa la corriente I entregada por el módulo en función del voltaje en sus terminales.
- Voltaje en circuito abierto (V_{oc}): voltaje en los bornes del módulo en ausencia de corriente, para una iluminación a "pleno sol".
- Punto de funcionamiento óptimo (V_{max}, I_{max}): cuando la potencia de (pico) es máxima a plena luz del sol.
- Eficiencia: relación entre la potencia eléctrica óptima y la potencia de radiación incidente.
- Factor de forma: relación entre la potencia óptima y la máxima que pueden tener las celdas.

2.6.2. Tipos de configuraciones del modelado de celdas fotovoltaicas.

a. Modelo de diodo único

Una celda fotovoltaica se presenta a menudo como un generador de corriente eléctrica cuyo comportamiento es equivalente a una fuente de corriente derivada por un diodo. (Guerra, 2018).

En el capítulo 3 se realiza el modelado matemático de celdas fotovoltaicas.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL COMPONENTE PRÁCTICO

3.1. Descripción general del componente práctico.

Hacer un modelo de un sistema constituirá un proceso esencial previo al dimensionamiento, optimización o simulación de este. El sistema objeto del presente estudio será un sistema de bombeo fotovoltaico compuesto por un sistema generador fotovoltaico (GPV), convertidores estáticos y motor-bomba. Este capítulo describe los principales modelos matemáticos de cada componente del sistema.

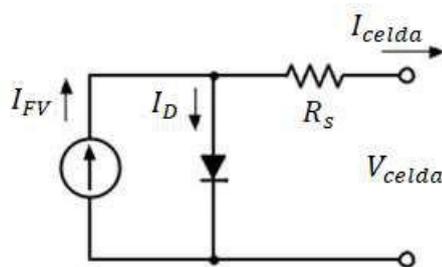
3.2. Modelo matemático de una celda solar fotovoltaica.

3.2.1. Celda ideal: modelo de diodo único sin resistencia de derivación.

Cuando se trata de un caso ideal, la unión PN de un conjunto fotovoltaico sometido desde el punto de vista energético puede representarse a través de una corriente generadora en paralelo con un diodo que representa la unión P-N en la celda. La Figura 3.1 será un circuito eléctrico equivalente al modelo de un diodo.

Figura 3. 1

Representación esquemática a base de diodos sin resistencia de derivación.



Elaborado por: Autor.

El modelo matemático de una celda fotovoltaica ideal con un sistema eléctrico basado en la ley de Kirchhoff estará definido por:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_D \quad (3.1)$$

Pero, la corriente en un diodo según Boylestad es:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_{celda}}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación 3.2 en 3.1, queda:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_s \left(e^{\frac{V_{celda}}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

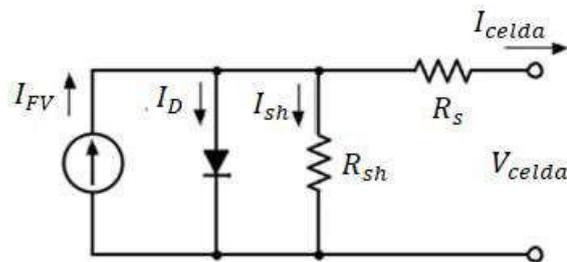
$$V_t = \frac{nkT}{q}$$

3.2.2. Celda real: modelo de diodo único.

Por lo general, habrá varias influencias de las resistencias parásitas en la producción de energía eléctrica, en la Figura 3.2 se representará el circuito esquemático de una celda fotovoltaica que representará el comportamiento estático de una celda fotovoltaica real. Este modelo se utilizará para modelar el comportamiento de una fuente de energía eléctrica de un colector fotovoltaico. Este es el modelo más clásico en la literatura, utilizando un generador de corriente, un diodo y dos resistencias (en serie y en derivación), que tienen cierta influencia en la curva característica I-V de la celda fotovoltaica.

Figura 3. 2

Representación esquemática a base de diodos con resistencia de derivación.



Elaborado por: Autor

Por ejemplo, la resistencia en serie (R_s) es la resistencia interna de la celda; y que dependerá principalmente de la resistencia del semiconductor utilizado, de la resistencia de contacto de las placas de los colectores y de la resistividad de estas placas. La resistencia de derivación (R_{sh}) se debe a una corriente de fuga en la unión y depende de la forma en que se haya realizado la unión.

La corriente del diodo viene dada por:

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \quad (3.4)$$

La corriente de derivación se define mediante la ley de Kirchhoff de voltaje como:

$$V_D = V_{s/} = I_{s/} R_{s/} = V_{celda} + R_s I_{celda}$$

$$I_{s/} = \frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{R_{s/}} \quad (3.5)$$

Mientras, que el voltaje del diodo está dado por:

$$V_D = V_{celda} + R_s I_{celda} \quad (3.6)$$

La corriente generada por la celda fotovoltaica está dada por la ley de Kirchhoff:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_D - I_{s/} \quad (3.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6 en la ecuación 3.7:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) - \left(\frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{R_{s/}} \right) \quad (3.8)$$

Además, para obtener una modelación más precisa de la celda fotovoltaica, es necesario considerar la incidencia de la intensidad luminosa y de la temperatura. A continuación, la Tabla 3.1 muestra los parámetros de la celda que serán indicados por el fabricante en condiciones de prueba estándar (STC) y en condiciones nominales.

Tabla 3. 1
Parámetros de la celda fotovoltaica en condiciones nominales y estándar.

Parámetros	Condiciones nominales	Condiciones de prueba estándar
Luminosidad (W/m ²)	800	1000
Temperatura ambiente (°C)	20	25
Velocidad del viento (m/s)	1	

Elaborado por: Autor.

En condiciones nominales, la temperatura nominal de funcionamiento de la celda (T_{NOCT}) se indicará en cualquier catálogo del fabricante. La temperatura de funcionamiento de la celda (T) depende de la intensidad luminosa (E) y de la temperatura ambiente (T_a), según la siguiente ecuación empírica:

$$T = T_a + \frac{T_{NOCT} - T_{a-n\acute{y}m}}{E_{n\acute{y}m}} E$$

Es decir, que la corriente fotoeléctrica está relacionada con la intensidad luminosa, la temperatura y la corriente fotoeléctrica medida en condiciones de prueba estándar; la siguiente expresión representará la corriente fotoeléctrica en función de la irradiación E a la temperatura de referencia (T_0) bajo STC:

$$I_{FV(T_0)} = \frac{E}{E_0} I_{CC0}$$

La corriente fotoeléctrica también dependerá de la temperatura, su expresión viene dada por:

$$I_{FV} = I_{FV(T_0)} [1 + K_0(T - T_0)] = \frac{E}{E_0} [I_{CC0} + K_0(T - T_0)]$$

La corriente de saturación dependerá de la temperatura. Para una temperatura determinada, el valor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_s = I_{S0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} e^{-\frac{E_g}{n\acute{y}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

Donde, V_g es la energía de la zona de separación de bandas, e I_{S0} es la corriente de saturación del diodo en condiciones estándar y estará dada por:

$$I_{S0} = \frac{I_{CC0} + k_0(T - T_0)}{e^{\left(\frac{E_g}{n\acute{y}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right)} \frac{N_s n\acute{y}}{2}} \quad 2 \quad 1$$

Entonces la corriente generada por la celda estará dada por la expresión:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_s \left(e^{\frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{n\acute{y}}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{R_s} \right) \quad (3.9)$$

3.2.3. Parámetros de la celda fotovoltaica.

Estos parámetros se determinarán a partir de las curvas de corriente-voltaje (I-V), o de la ecuación característica, siendo las más comunes. Por ejemplo, la corriente para que el voltaje a través de la celda fotovoltaica sea cero, se da cancelando V_{celda} en la ecuación anterior, se obtienen los siguientes parámetros:

- a. Corriente de corto circuito (I_{cc})

$$I_{cc} = I_{FV} - I_s \left(e^{\frac{R_s I_{celda}}{V_t}} - 1 \right) - \left(\frac{R_s I_{celda}}{R_{s'}} \right) \quad (3.10)$$

Para la mayoría de las celdas (con una resistencia en serie pequeña), el término se puede despreciar delante de I_{FV} , por lo que la expresión aproximada de la corriente de cortocircuito es:

$$I_{cc} \approx \frac{I_{FV}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{s'}} \right)}$$

Cuantitativamente, presenta el mayor valor de corriente generado por la celda (prácticamente $I_{cc} = I_{FV}$).

- b. Voltaje de circuito abierto ($V_{\acute{y}c}$)

En este caso se trata del voltaje $V_{\acute{y}c}$, a partir del cual la corriente suministrada por el generador fotovoltaico es nula (es el voltaje máximo de una celda fotovoltaica). Anulando la corriente I_{celda} en la ecuación (3.14) se obtiene:

$$0 = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{V_{celda}}{V_t}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{celda}}{R_{s'}} \right) \quad (3.11)$$

- c. Potencia máxima

Para una celda ideal, la potencia máxima ideal ($P_{m\acute{a}x-ideal}$) en los terminales de la celda fotovoltaica es, por tanto, el voltaje de circuito abierto multiplicado por la corriente de cortocircuito:

$$P_{m\acute{a}x-ideal} = V_{\acute{y}c} I_{cc}$$

No obstante, la curva característica de una celda fotovoltaica es más curvada y su voltaje V_m en el punto de máxima potencia es menor que el voltaje en circuito abierto V_{oc} , al igual que la corriente suministrada I_m es menor para este mismo voltaje que la corriente de cortocircuito I_{cc} . La expresión de la potencia en este punto es:

$$P_{m\acute{a}x} = V_m I_m$$

d. Eficiencia energética.

La relación entre la potencia suministrada a la carga por el generador fotovoltaico (GFV) y la potencia máxima del GFV está dado por:

$$\eta = \frac{P_{carga}}{P_{m\acute{a}x}}$$

e. Factor de forma (FF).

La relación entre la potencia máxima suministrada por la celda $P_{m\acute{a}x}$ y el producto de la corriente de cortocircuito I_{cc} y el voltaje de circuito abierto V_{oc} (es decir, la potencia máxima de una celda ideal) se denomina factor de forma (FF), también conocido como factor de curva o factor de carga. El factor de forma indica la calidad de la celda y está definida por:

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{V_{oc} I_{cc}}$$

3.3. Modelización del generador fotovoltaico.

Se ha visto con anterioridad que el modelo matemático de una celda fotovoltaica está dado por:

$$I_{celda} = I_{FV} - I_s \left(e^{\frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{celda} + R_s I_{celda}}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

La expresión es una representación adecuada del comportamiento intrínseco de una celda fotovoltaica típica de silicio. Sin embargo, el generador fotovoltaico puede ser generalizado como un módulo fotovoltaico, es decir, como un conjunto de células idénticas conectadas en serie-paralelo. Entonces

el modelo matemático utilizado para modelar el funcionamiento del GPV se expresará como:

$$I_{celda}^p = N_p I_{celda}^c - 2 N_p I_{celda}^c \left(e^{\frac{V_{celda}^p + R_s^p I_{celda}^p}{N_s}} - 1 \right) - \frac{V_{celda}^p + R_s^p I_{celda}^p}{R_{s/}} \quad (3.13)$$

Los parámetros del panel llevan el subíndice "p" y los de las celdas fotovoltaicas el subíndice "c". En consecuencia, la corriente I_{FV} , es generada por el módulo fotovoltaico, en condiciones de funcionamiento arbitrarias. Por ejemplo:

La resistencia en serie equivalente:

$$R_s^p = \frac{N_s}{N_p} R_s^c$$

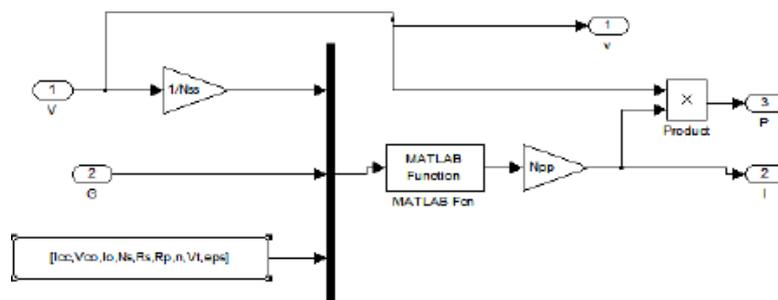
La resistencia paralelo equivalente ($R_p = R_{s/}$):

$$R_p^p = \frac{N_s}{N_p} R_p^c$$

3.3.1. Modelización del sistema en MatLab/Simulink.

Con el fin de disponer de un modelo sencillo de utilizar, en este trabajo de investigación se ha implementará un modelo del panel fotovoltaico en MatLab/Simulink que será utilizado durante todo el proyecto. En este modelo, se utilizará la ecuación 3.12, con dos parámetros de entrada: la temperatura y la intensidad de radiación, y dos parámetros de salida: voltaje y corriente. Se escogerá el módulo Shell SP 75 como modelo de simulación en MatLab/Simulink. El módulo consta de 36 células solares de silicio monocristalino en serie y proporciona 75 W de potencia nominal.

Figura 3. 3
Simulación del generador fotovoltaico en Simulink.

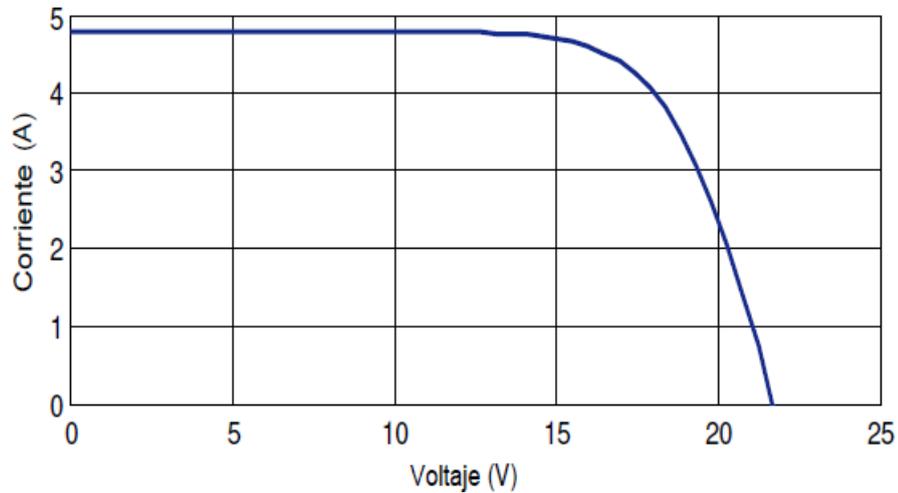


Elaborado por: Autor.

3.3.2. Característica voltaje-corriente del generador fotovoltaico.

La Figura 3.4 representará la característica no lineal I(V) del generador fotovoltaico (GFV) de silicio para una luminosidad $E=1000 \text{ W/m}^2$ y una temperatura $T=25^\circ\text{C}$ (condiciones de funcionamiento estándar).

Figura 3. 4
Respuesta al escalón de H(s).

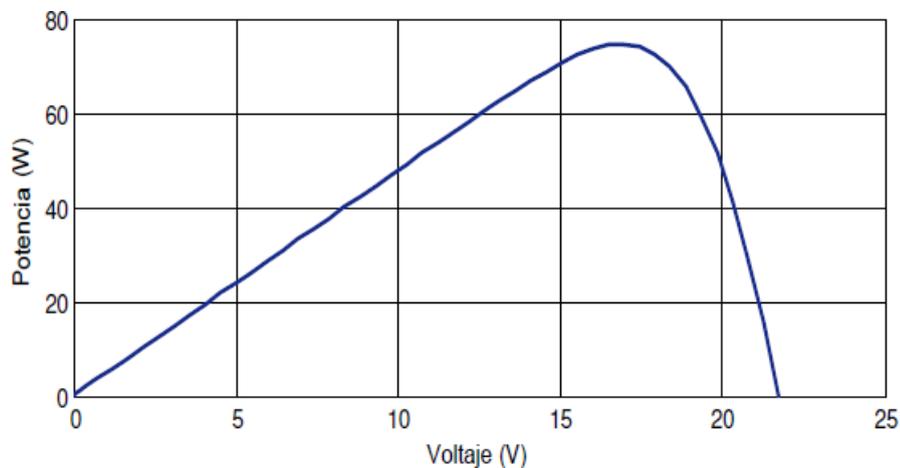


Elaborado por: Autor.

3.3.3. Característica de potencia-voltaje del generador fotovoltaico.

La Figura 3.5 mostrará la característica no lineal de potencia-voltaje (P-V) del GFV basado en silicio para una intensidad luminosa $E=1000 \text{ W/m}^2$ y una temperatura $T=25^\circ\text{C}$ (en condiciones estándar de funcionamiento).

Figura 3. 5
Diagrama de simulación del controlador V(k).

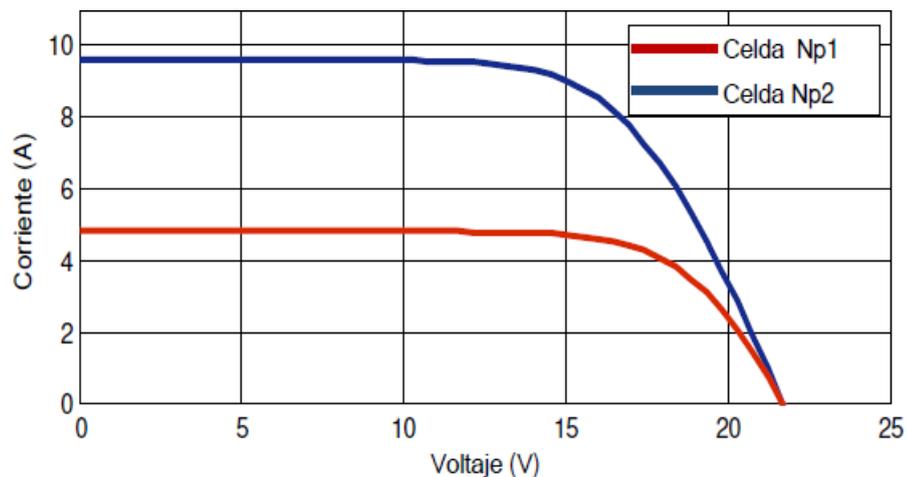


Elaborado por: Autor.

3.3.4. Conexión de celdas fotovoltaicas en paralelo.

Una asociación en paralelo de las celdas permitirá incrementar la corriente de salida del generador fotovoltaico que se ha creado en el modelo de simulación. Después, las celdas son sometidas al mismo voltaje y la característica del conjunto resultante se obtiene sumando las corrientes. La Figura 3.6 muestra la gráfica I-V resultante de celdas que se conectarán en paralelo.

Figura 3. 6
Características obtenidas de una agrupación de Np celdas en paralelo



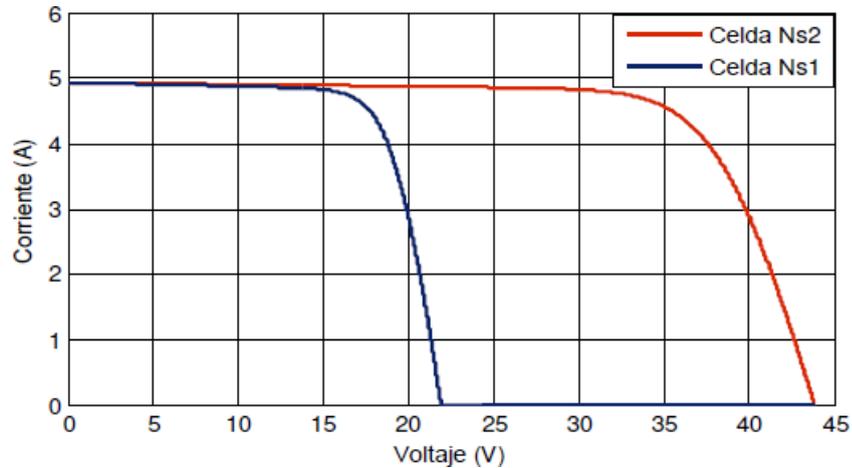
Elaborado por: Autor.

3.3.5. Conexión de celdas fotovoltaicas en serie.

Una agrupación en serie de celdas permite incrementar el voltaje del generador fotovoltaico (GFV). Es decir, que por las celdas fluye la misma corriente y la característica resultante de la combinación en serie se obtiene sumando los voltajes de cada celda.

Figura 3. 7

Características obtenidas de una agrupación de N_s celdas en serie.



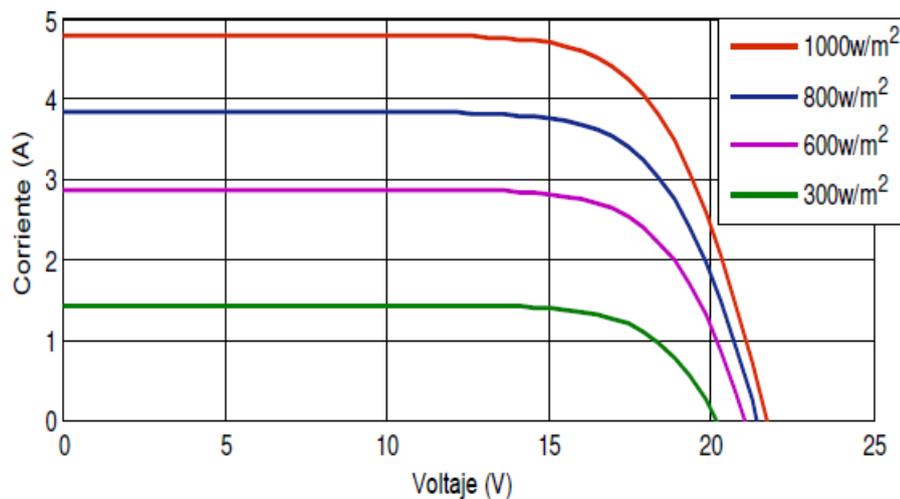
Elaborado por: Autor.

a) Efecto del nivel de luminosidad.

La Figura 3.8 muestra la influencia que ejerce el factor de luminosidad en la curva característica I-V. Se observa que, a una temperatura constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la intensidad de la corriente se incrementa y las curvas I-V varían hacia valores crecientes, pero el voltaje varía ligeramente, porque la corriente de cortocircuito (I_{cc}) es una función lineal del factor de luminosidad, mientras que el voltaje en circuito abierto (V_{yc}) es una función logarítmica.

Figura 3. 8

Influencia de la intensidad luminosa en la curva característica I-V.

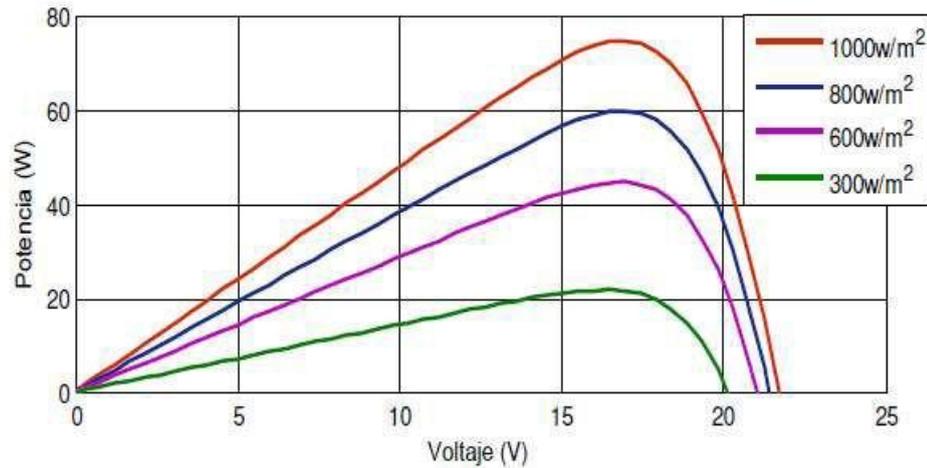


Elaborado por: Autor.

Del mismo modo sucede con la curva característica P-V, que, al aumentar la intensidad luminosa solar, también aumenta la potencia suministrada por el generador, lo que permite suponer los efectos de la iluminancia sobre la curva característica P-V, tal y como se observa en la Figura 3.9.

Figura 3. 9

Influencia de la intensidad luminosa en la curva característica P-V.



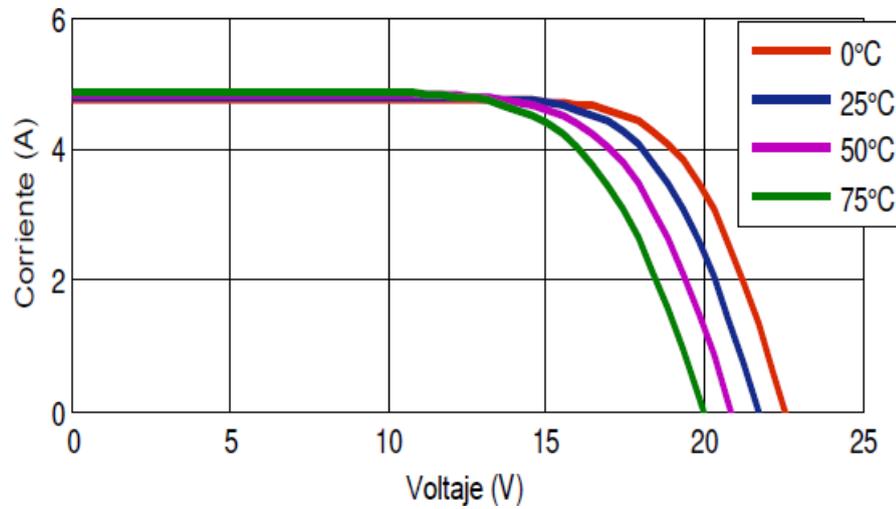
Elaborado por: Autor.

b) Efecto de la temperatura.

Las Figuras 3.10 y 3.11 muestran el efecto de la variación de la temperatura en el generador fotovoltaico (GFV) sobre las curvas características I-V y P-V con una intensidad luminosa constante de 1 000 W/m². Al aumentar la temperatura, el voltaje de circuito abierto ($V_{c\acute{o}}$) disminuirá, mientras que la corriente de corto circuito (I_{cc}) cambia ligeramente. En consecuencia, la potencia máxima del generador disminuye.

Figura 3. 10

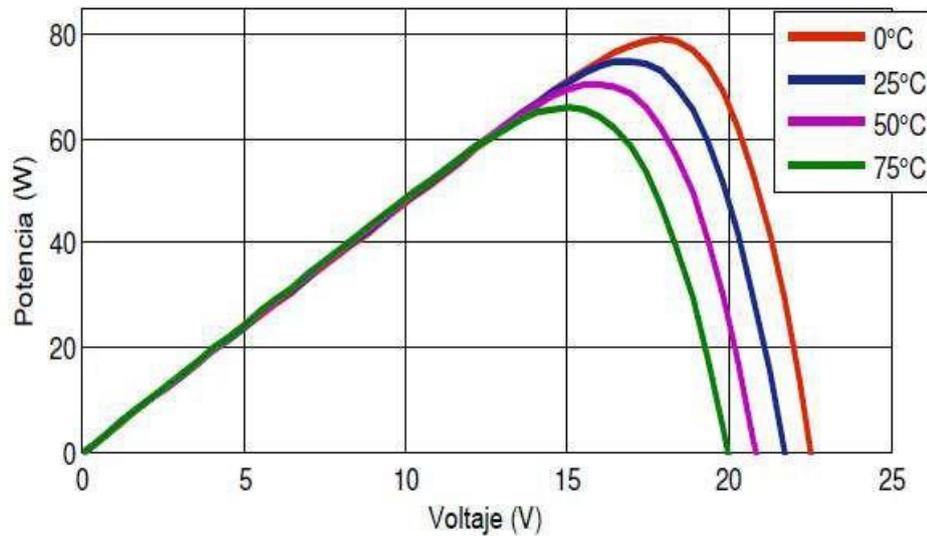
Efecto de la intensidad luminosa en la curva característica I-V.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 11

Efecto de la intensidad luminosa en la curva característica P-V.



Elaborado por: Autor.

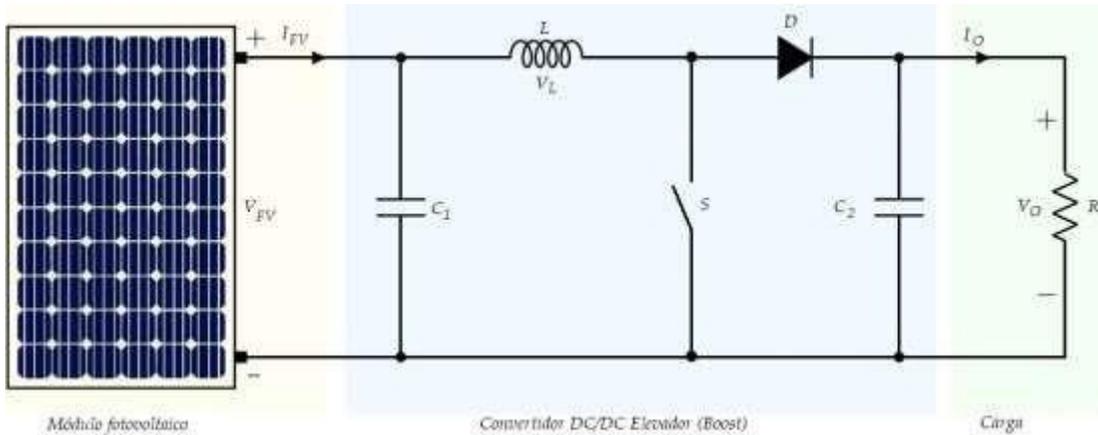
3.4. Modelización del dispositivo de potencia tipo Boost (elevador).

La Figura 3.12 representa el modelado de un dispositivo elevador de potencia. Cuando el switch S está cerrado (véase la Figura 3.13) durante el tiempo αT , la corriente en el inductor (I_L) aumenta linealmente y el voltaje a través de S es cero. En el segundo tiempo $[(1 - \alpha)T]$, el conmutador S se abre (véase la Figura 3.14) y la energía almacenada en el inductor controla la

corriente que circula por el diodo D. Suponiendo que el voltaje a través del inductor (V_L) es nulo, se obtiene que $V_C(1 - 2\alpha) = V_{FV}$.

Figura 3. 12

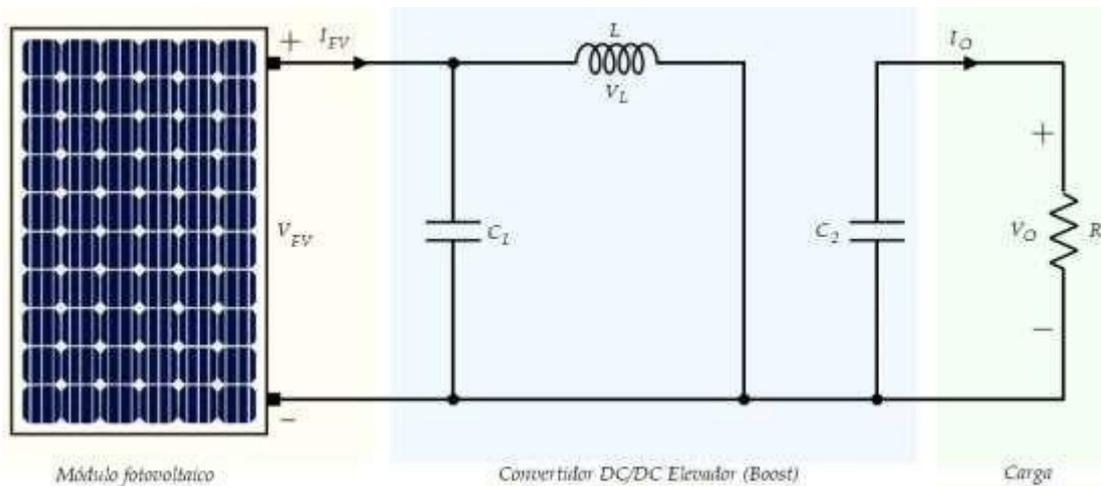
Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost).



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 13

Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost) cuando el switch está cerrado.



Elaborado por: Autor.

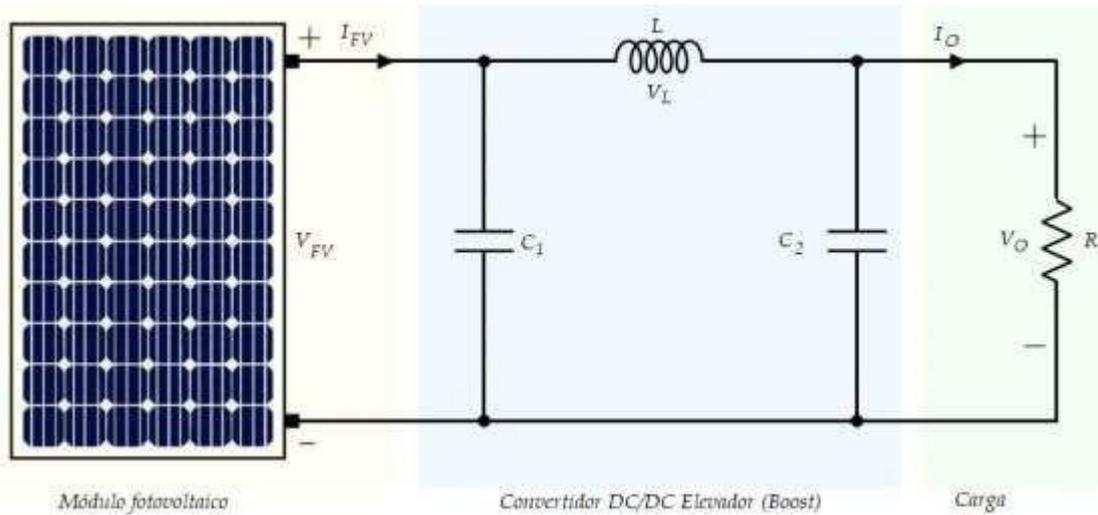
De la Figura 3.13 se deducirán las corrientes en cada capacitor (así como la ley de Kirchhoff de corriente) y el voltaje en el inductor:

$$I_{C_1} = C_1 \frac{dV_{FV}}{dt} = I_{FV} - I_L$$

$$I_{C_2} = C_2 \frac{dV_O}{dt} = I_L - I_O$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{FV} = V_{C_1}$$

Figura 3. 14
Representación esquemática del circuito convertidor DC/DC elevador (boost) cuando el switch está abierto.



Elaborado por: Autor.

De la Figura 3.14 se deducirán las corrientes en cada capacitor (así como la ley de Kirchhoff de corriente) y el voltaje en el inductor:

$$I_{C_1} = C_1 \frac{dV_{FV}}{dt} = I_{FV} - I_L$$

$$I_{C_2} = C_2 \frac{dV_O}{dt} = I_L - I_O$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{FV} - V_O = V_{C_1} - V_{C_2}$$

3.5. Modelización del inversor en el sistema fotovoltaico.

La Figura 3.15 muestra la modelización del inversor de voltaje trifásico que se utilizarán en motores de corriente alterna. El estado de los interruptores, que se supone perfecto, puede definirse mediante tres magnitudes de control booleanas S_i con $i = a, b, c$.

- Si el transistor superior es conductor, las variables $S_i = 1$;
- Si el transistor inferior es conductor, las variables $S_i = 0$;

Los voltajes simples aplicadas a las tres fases del estator del motor AC se obtienen a partir de las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} V_{an} = V_{a'y} + V_{y'n} \\ V_{bn} = V_{b'y} + V_{y'n} \\ V_{cn} = V_{c'y} + V_{y'n} \end{cases}$$

Pero, por añadidura se sabe que:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y} + 3V_{y'n}$$

El sistema de voltaje del estator del motor AC (trifásico) es simétrico, por lo que:

$$V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y} + 3V_{y'n} = 0$$

En consecuencia $V_{y'n}$ que definida como:

$$V_{y'n} = -\frac{1}{3}(V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y})$$

$$\begin{cases} V_{an} = V_{a'y} - \frac{1}{3}(V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y}) = \frac{2}{3}V_{a'y} - \frac{1}{3}V_{b'y} - \frac{1}{3}V_{c'y} \\ V_{bn} = V_{b'y} - \frac{1}{3}(V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y}) = \frac{2}{3}V_{b'y} - \frac{1}{3}V_{a'y} - \frac{1}{3}V_{c'y} \\ V_{cn} = V_{c'y} - \frac{1}{3}(V_{a'y} + V_{b'y} + V_{c'y}) = \frac{2}{3}V_{c'y} - \frac{1}{3}V_{a'y} - \frac{1}{3}V_{b'y} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{a'y} - V_{b'y} - V_{c'y}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{b'y} - V_{a'y} - V_{c'y}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{c'y} - V_{a'y} - V_{b'y}) \end{cases}$$

Una vez ordenadas las ecuaciones de los dos sistemas se obtiene una matriz del sistema siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a'y} \\ V_{b'y} \\ V_{c'y} \end{bmatrix}$$

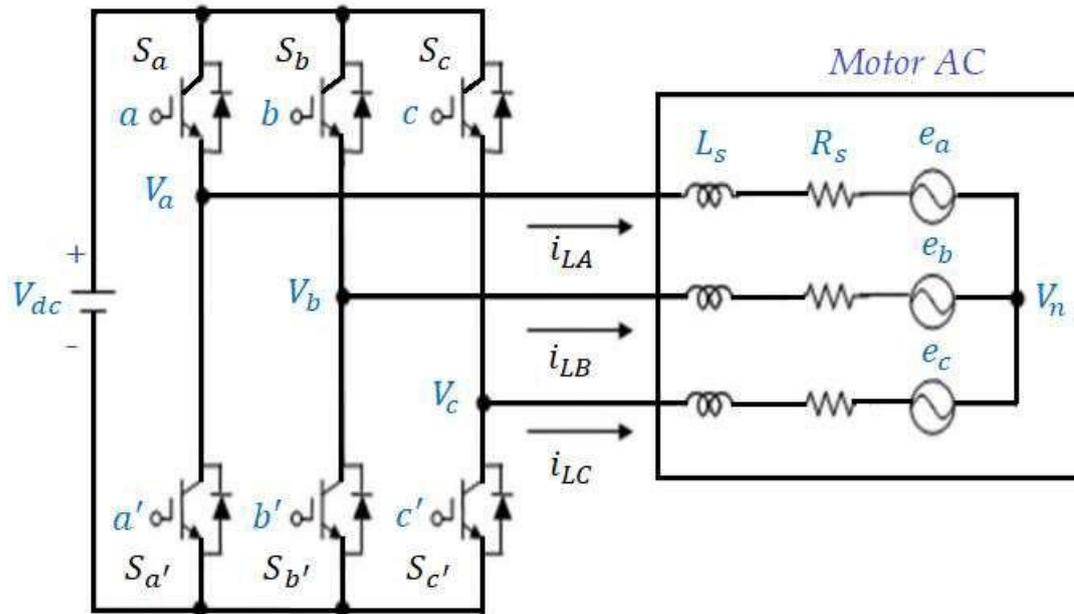
Pero, $V_{a'y} = V_{dc}S_a$; $V_{b'y} = V_{dc}S_b$; $V_{c'y} = V_{dc}S_c$

Por lo tanto, la matriz para el dispositivo inversor DC/AC queda definida por:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & 21 & 21 \\ 21 & 2 & 21 \\ 21 & 21 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Figura 3. 15

Circuito esquemático del inversor DC/AC para el motor AC.



Elaborado por: Autor.

3.5.1. Mecanismo de funcionamiento de la modulación por ancho de pulso (PWM) en el inversor de onda sinusoidal.

La técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) se consigue comparando una onda moduladora de baja frecuencia (voltaje de referencia) con una onda portadora de alta frecuencia de forma triangular, tal como se muestra en la Figura 3.16. Los tiempos de conmutación están determinados por los puntos de intersección entre la onda portadora y la moduladora. La frecuencia de conmutación de los interruptores viene determinada por la portadora. En sistemas trifásicos, las tres referencias sinusoidales están desfasadas en $2\pi/3$ a la misma frecuencia f .

Existen dos parámetros que caracterizan este control si la referencia es sinusoidal:

1. El índice de modulación "m" que define la relación entre la frecuencia de la portadora (f_p) y la frecuencia de referencia (f_{ref}):

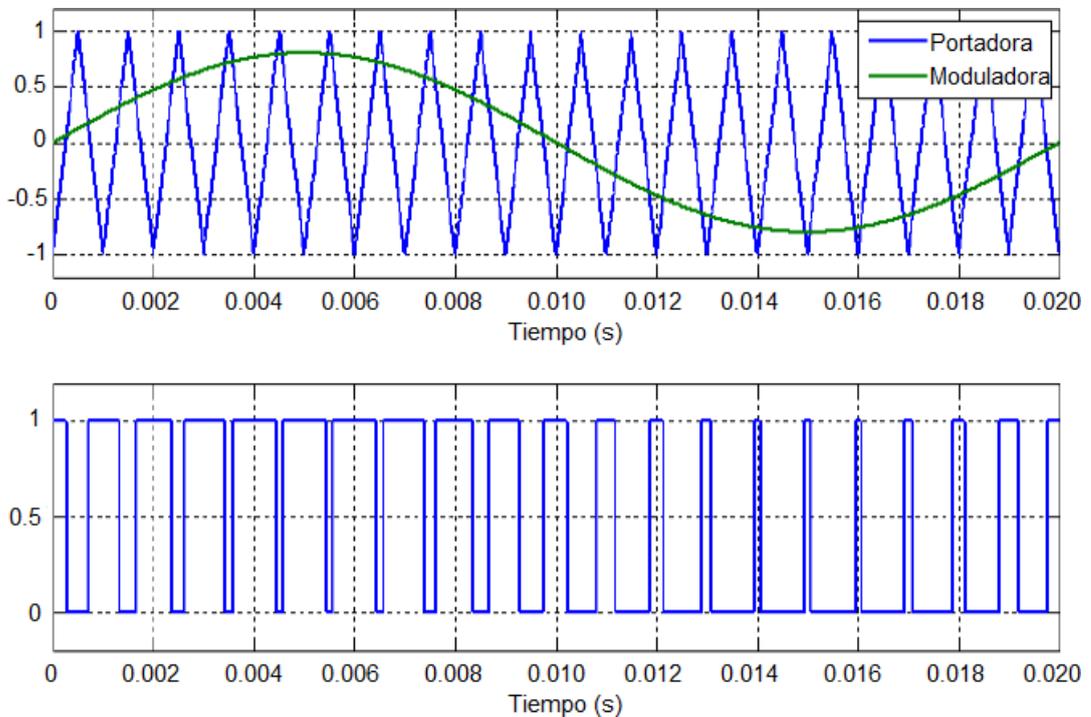
$$m = \frac{f_p}{f_{ref}}$$

2. Coeficiente de regulación del voltaje "r" o ciclo de trabajo (índice de modulación) que da la relación entre la amplitud de modulación V_{ref} y el máximo valor V_p de la portadora:

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p}$$

La portadora es una señal triangular caracterizada por su frecuencia f_p y su valor máximo V_p .

Figura 3. 16
Representación gráfica del funcionamiento de la modulación por ancho de pulso (PWM).



Elaborado por: Autor.

3.6. Modelización del motor AC asíncrono.

El motor AC asíncrono es actualmente el motor eléctrico más utilizado en la industria. Su principal ventaja es la ausencia de contactos eléctricos deslizantes, lo que da lugar a una estructura sencilla, robusta y fácil de construir, su estator se conecta directamente a la red industrial a voltaje y frecuencia constantes, y gira a una velocidad inferior a la velocidad sincrónica; además, se utiliza para la realización de casi todos los accionamientos de velocidad constante. También puede utilizarse para fabricar variadores de velocidad y cada vez es más importante en este campo. (Hernández, 2017)

Figura 3. 17

Motor AC asíncrono de 1.5 kW.



Elaborado por: Autor.

La modificación de la máquina asíncrona sólo puede hacerse en el contexto habitual de las siguientes suposiciones de simplificación:

1. La máquina es simétrica con un espacio de aire constante.
2. No se tienen en cuenta los efectos de las muescas y los engranajes.
3. La inducción en el desfase tiene una distribución espacial sinusoidal.
4. El circuito magnético es lineal, no saturado, lo que significa que los flujos son funciones lineales de las corrientes.
5. La densidad superficial de las corrientes en los conductores es uniforme, la influencia de la incidencia de la calefacción está ausente.
6. Las pérdidas de energía debidas a la histéresis y a las corrientes de fuga no se tienen en cuenta.

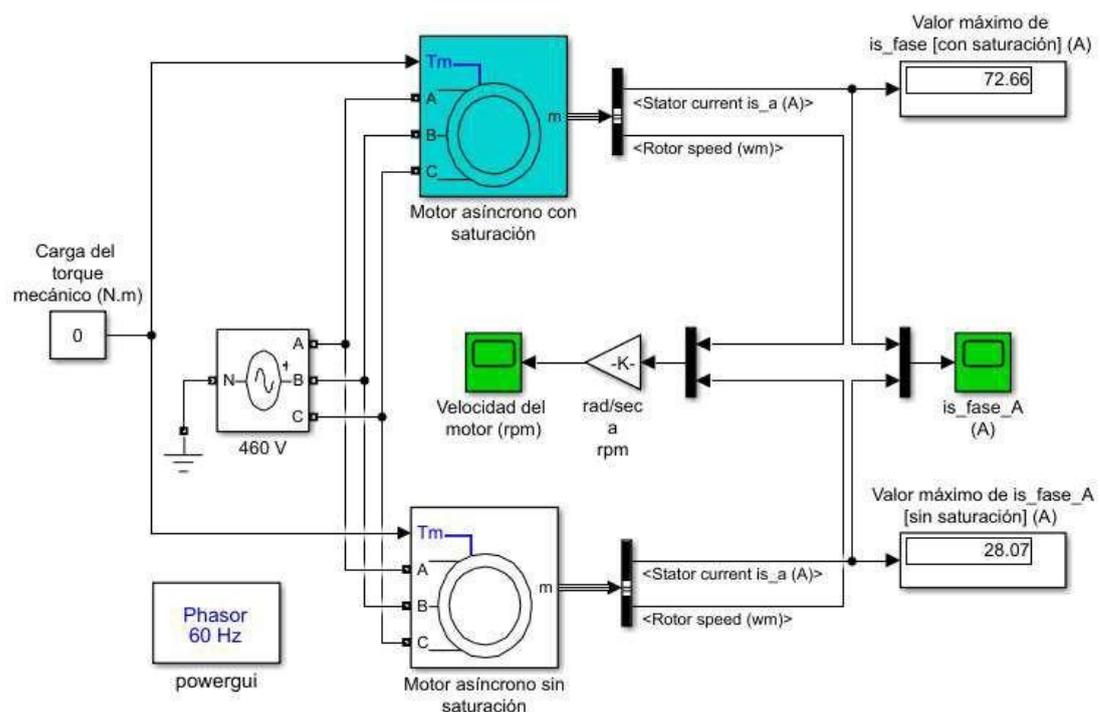
Para una máquina asíncrona trifásica alimentada con voltaje, se considerarán los voltajes del estator (V_{ds} ; V_{qs}) y la velocidad del campo giratorio como variables de control, el par resistivo C_r como perturbación. Esta elección de la variable se justifica, por un lado, por el hecho de que las

corrientes del estator son medibles y, por otro, porque se desea controlar la norma del flujo del rotor. (Hernández, 2017)

La Figura 3.18 muestra la simulación de un motor asíncrono trifásico disponible en la librería de Simulink/MatLab y que se modificará para el presente trabajo. La ventaja de usar este modelo de simulación es que ya viene definido el bloque del motor asíncrono y que sirve para efectos de dimensionamiento del sistema de bombeo de agua. Además, se disponen de bloques de visualización de la corriente del estator, así como de la velocidad del motor asíncrono. Este modelo sirve de manera referencial ya que el costo de comprar un motor asíncrono trifásico es muy alto y no es parte del desarrollo del presente documento.

Figura 3. 18

Modelado del motor AC asíncrono.



Elaborado por: Autor.

3.7. Modelización de la bomba de agua.

Las bombas suelen seleccionarse en función de la altura total del pozo. Las bombas de agua suelen clasificarse según su principio de funcionamiento, es decir, ya sea de desplazamiento positivo o centrífugas. Además de estas

dos clasificaciones, también se distinguen otros dos tipos de bombas según la ubicación física de la bomba en relación con el agua que se bombea: (1) bomba de aspiración y (2) bomba de descarga. (Martínez, 2012)

Figura 3. 19

Equipo de bomba de agua centrífuga acoplada al motor asíncrono.



Elaborado por: Autor.

La tecnología de las bombas centrífugas es la más utilizada en los sistemas de bombeo fotovoltaicos. Las bombas centrífugas están diseñadas para una altura fija y un rendimiento del agua que aumenta con la velocidad de rotación. Estas bombas son sencillas, de bajo coste y están disponibles para una amplia gama de caudales. La característica de caudal de una bomba centrífuga puede estimarse mediante el modelo "Pleider-Peterman", y puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$H_m = a_0\omega^2 + a_1\omega y + a_2y^2 = H_y + \&P$$

Donde, H_m es la altura manométrica o de elevación, a_0 , a_1 , a_2 son las constantes de la bomba de agua dadas por el fabricante, ω es la velocidad rotacional de eje de la bomba de agua, H_y es la altura estática que es la distancia desde el nivel estático del agua en el pozo hasta el punto más alto en el que se va a bombear el agua, y $\&P$ es la suma de las pérdidas lineales y singulares.

La característica principal de la bomba centrífuga es que convierte la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y luego en energía de presión. La función de una bomba es, de hecho, transferir energía al líquido bombeado (energía que luego se transforma en caudal y altura de elevación) según las características de

fabricación de la propia bomba y según las necesidades específicas de la instalación. La potencia hidráulica suministrada por la bomba viene dada por:

$$P_H = 5P_E = \rho g H_m \dot{y}$$

3.8. Dimensionamiento de la instalación de bombeo.

En esta sección se presentará el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

3.8.1. Dimensionamiento de la irradiación solar.

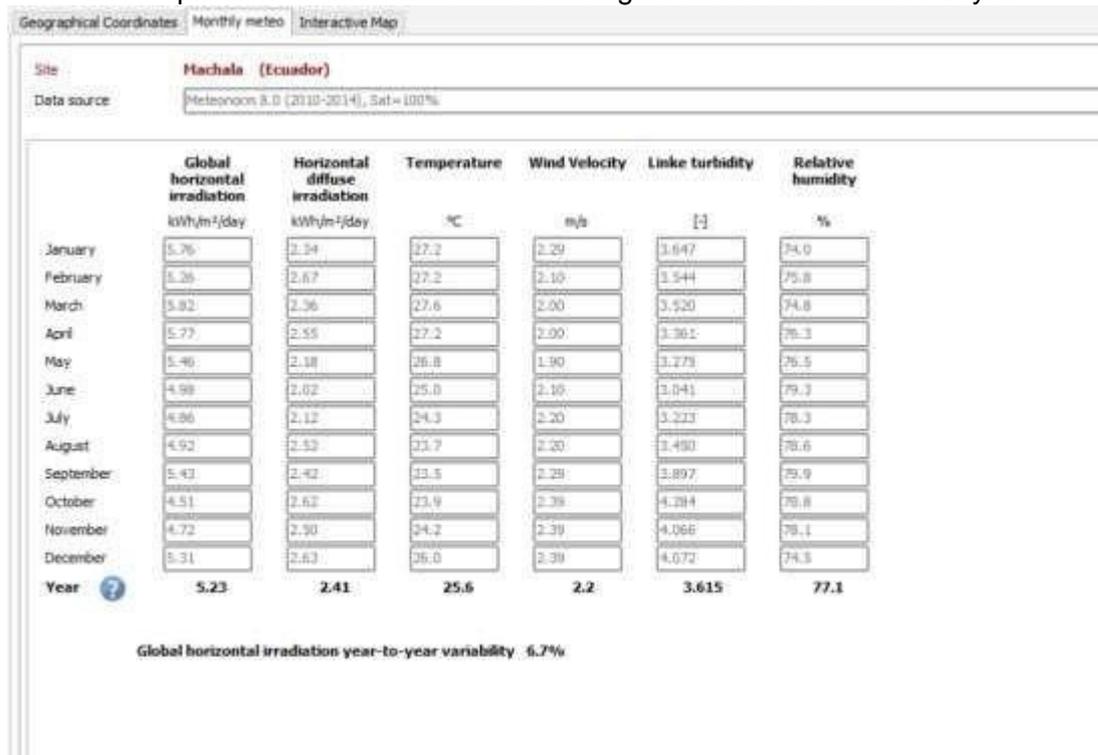
En la tabla 3.1 el resumen de los datos que representará la irradiación solar durante todo el año de la zona estudiada. Este método consiste en que se considerará la irradiación media de todo el año (para Machala, la irradiación media anual es igual a 5,23 kWh /m²/día). Para respaldar la información de los datos presentados (ver tabla 3.2) la Figura 3.20 muestra los datos meteorológicos de la irradiación solar que serán obtenidos del software PVsyst (se usará la versión de prueba de 30 días).

Tabla 3. 2
Valores mensuales de irradiación solar en Machala.

Mes	Irradiación solar (kWh/m ² /día)
Enero	5.76
Febrero	5.26
Marzo	5.82
Abril	5.77
Mayo	5.46
Junio	4.98
Julio	4.86
Agosto	4.92
Septiembre	5.43
Octubre	4.51
Noviembre	4.72
Diciembre	5.31
Promedio anual	5.23

Elaborado por: Autor.

Figura 3. 20
Recopilación de información meteorológica desde el software PVsyst.



Elaborado por: Autor.

3.8.2. Dimensionamiento de la bomba de agua centrífuga.

En este proyecto el caudal diario (\dot{y}) estimado es $22 \text{ m}^3//$ y la altura de elevación (H_m) se estima en 12 m. La bomba seleccionada tiene un rendimiento (5_p) del 55%, y el rendimiento del motor ($5_{m\acute{y}tr}$) es del 85% en el punto de funcionamiento nominal. El rendimiento total del sistema (n_{mp}) es del 47%. La potencia eléctrica requerida por la bomba se describe como:

$$P_E = \frac{\rho g H_m \dot{y}}{5_{mp}}$$

$$P_E = \frac{(9.81 \frac{m}{s^2}) (\frac{1000}{3600} kg/m^3) (12 m) (22 \frac{m^3}{s})}{0.47} = 1530.638 \text{ W}$$

$$P_E = 1.530 \text{ kW}$$

Es decir, que se requerirá una bomba de agua cuya potencia sea superior a 1530 kW.

3.8.3. Dimensionamiento del módulo fotovoltaico.

Se elegirá trabajar con el módulo de paneles solares monocristalino de alta eficiencia SES 80-P, tal como se muestra en la Figura 3.21. Se calcula la energía eléctrica (E_e) consumida durante el tiempo de bombeo ($t_{b\acute{o}mbe\acute{o}}$) en un día: si se tiene un reservorio (depósito de agua) de volumen 100 m^3 . El tiempo de bombeo y de la energía eléctrica se calcula como:

$$t_{b\acute{o}mbe\acute{o}} = \frac{V_{reserv\acute{o}r\acute{i}o}}{\acute{y}} = \frac{100}{22} = 4.5 \text{ /}\acute{y}ras$$

$$E_e = P t_{b\acute{o}mbe\acute{o}} = 1.5 \text{ kW}(4.5 \text{ /})$$

$$E_e = 6.75 \text{ kW//J}$$

La energía eléctrica que se generará ($E_{\acute{y}}$) por un campo fotovoltaico es igual a:

$$E_{\acute{y}} = \frac{E_e}{K} = \frac{6.75 \text{ kW//J}}{0.7}$$

$$E_{\acute{y}} = 9.64 \text{ kW//J}$$

K es un coeficiente de corrección que depende de la incertidumbre meteorológica, de la inclinación de los módulos solares y de la eficiencia global del sistema fotovoltaico. Su valor teórico está entre 0.55 y 0.75

Figura 3. 21

Módulo fotovoltaico monocristalino SES 75-P.



Elaborado por: Autor.

3.8.4. Dimensionamiento de la potencia máxima del generador fotovoltaico.

La potencia máxima del generador fotovoltaico dependerá de la irradiación solar del sector geográfico (Machala) elegido:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E_y}{I_r} = \frac{9.642}{5.23} = 1.84 \text{ kW}$$

Donde, I_r será irradiación media diaria, estimada en la región de Machala en 5.23 kWh/m²/día (véase la tabla 3.2).

3.8.5. Dimensionamiento de la cantidad de módulos fotovoltaicos.

El número total de módulos fotovoltaicos se calculará dividiendo la potencia total del conjunto por la potencia de un solo módulo (P_m):

$$N = \frac{P_{FV}}{P_m} = \frac{1840 \text{ kW}}{80} = 23 \text{ módulýs}$$

El número de módulos conectados en serie será:

$$N_s = \frac{V}{V_m} = \frac{380}{17.2} = 22 \text{ módulýs}$$

Donde, V y V_m son los voltajes del sistema y del módulo fotovoltaico, respectivamente. El número de ramas (módulos en paralelo) está definido como:

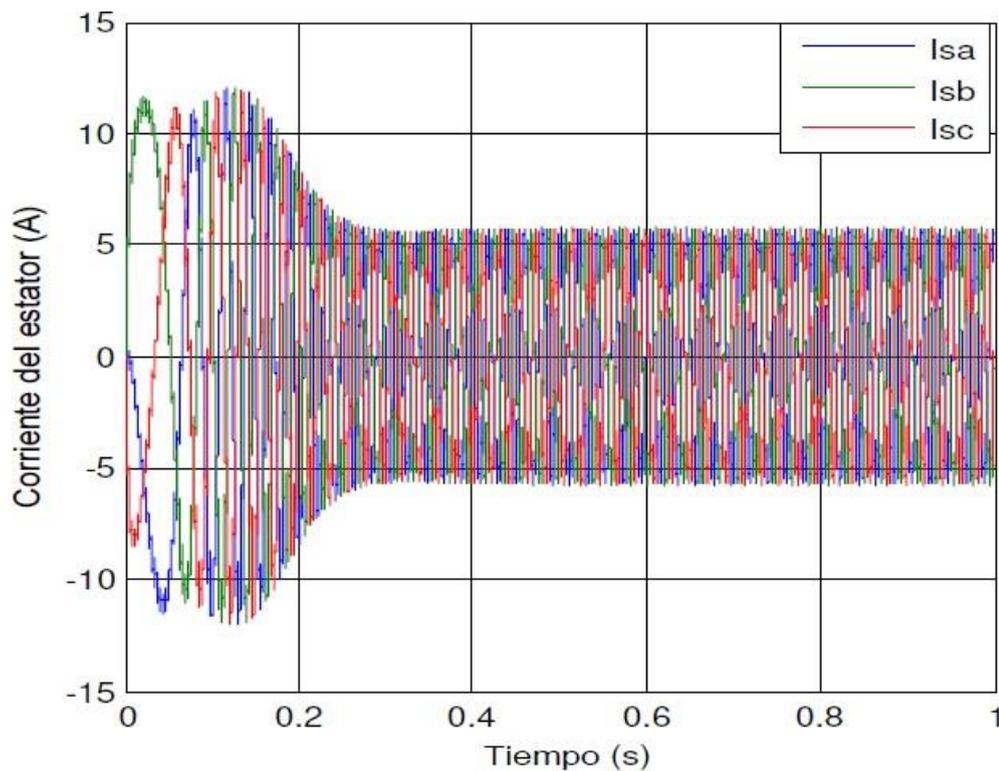
$$N_p = \frac{N}{N_s} = \frac{23}{22} \text{ j } 1$$

3.9. Análisis de los resultados obtenidos en la simulación en MatLab/Simulink.

La simulación del sistema fotovoltaico de bombeo de agua se realizará en el software MatLab/Simulink. La bomba centrífuga es accionada por la máquina de inducción asíncrona, que es alimentada por un inversor de voltaje de dos niveles (con $m=30$, $r=0,9$) asociado a un módulo fotovoltaico de 22 celdas solares conectadas en serie. La consigna de velocidad de la

motobomba se fija en 157 rad/s con un cambio de irradiación G de 1 000 W/m² a 800 W/m² en el tiempo $t=0,5s$. En las siguientes Figuras 3.22 a 3.29 se muestran los resultados obtenidos durante la simulación del sistema de bombeo fotovoltaico. La Figura 3.22 muestra las curvas de las corrientes del estator del motor asíncrono en cada línea de fase.

Figura 3. 22
Gráfica de la corriente del estator.

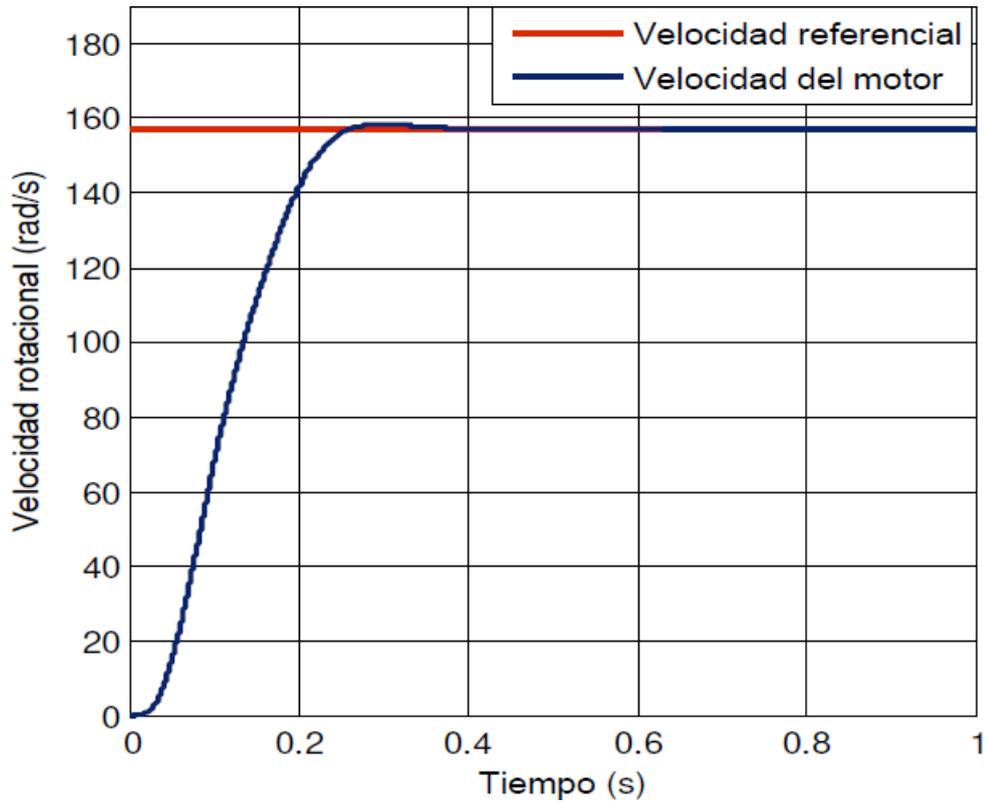


Elaborado por: Autor.

En la Figura 3.23 se muestra las curvas de las velocidades de referencia (consigna) o punto de ajuste y del motor AC asíncrono. Se podrá observar que la velocidad rotacional del motor se estabiliza en 157 rad/s en un tiempo de 0.25 s (véase las figuras 3.23 y 3.24). El resultado obtenido en las figuras 3.23 y 3.24 indican que el algoritmo (código de programación) implementado en el software de simulación MatLab/Simulink y junto con los parámetros del motor AC asíncrono, cumplirán con el propósito de controlar la velocidad rotacional del motor.

Figura 3. 23

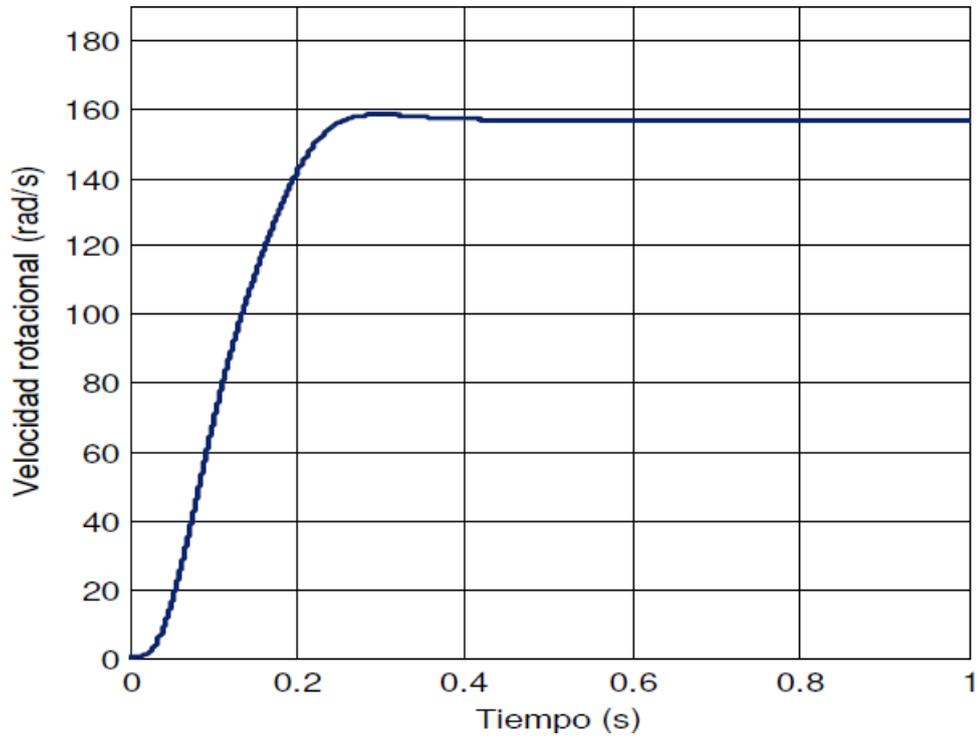
Curva de velocidad del motor para una referencia de 157 rad/s.



Elaborado por: Autor.

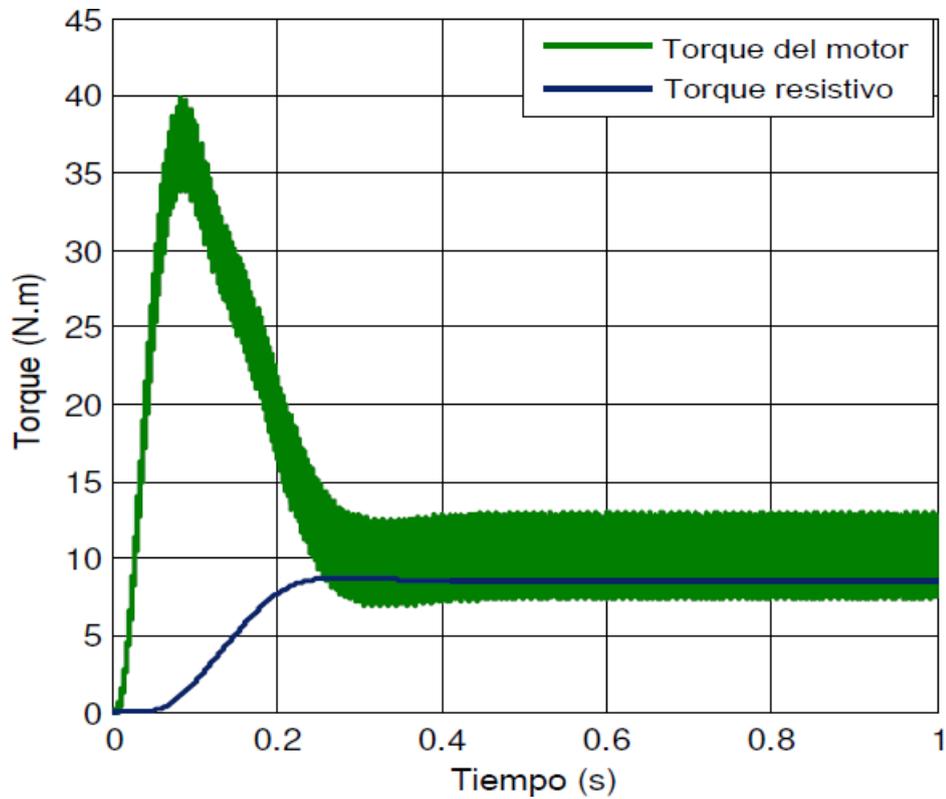
En las Figuras 3.25 y 3.26 se presentan las curvas del par o torque del motor debido al torque resistivo. Se podrá apreciar en la Figura 3.25 que el par del motor AC asíncrono logra estabilizarse al torque resistivo en el mismo instante de tiempo de la velocidad rotacional. Esto indica que el torque del motor logra un par o torque adecuado para lograr controlar la velocidad rotacional del motor. La Figura 3.26 muestra la curva del torque en relación con la velocidad rotacional del motor AC asíncrono.

Figura 3. 24
Curva de velocidad de rotación de la bomba (rad/s).



Elaborado por: Autor.

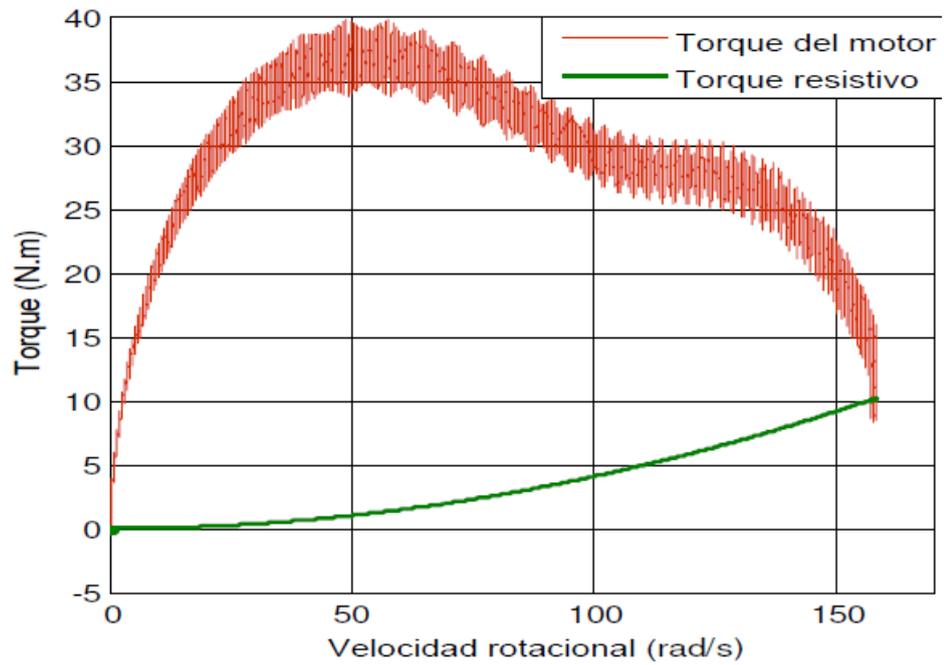
Figura 3. 25
Curva de torque del motor debido a la aplicación del torque resistivo de la bomba.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 26

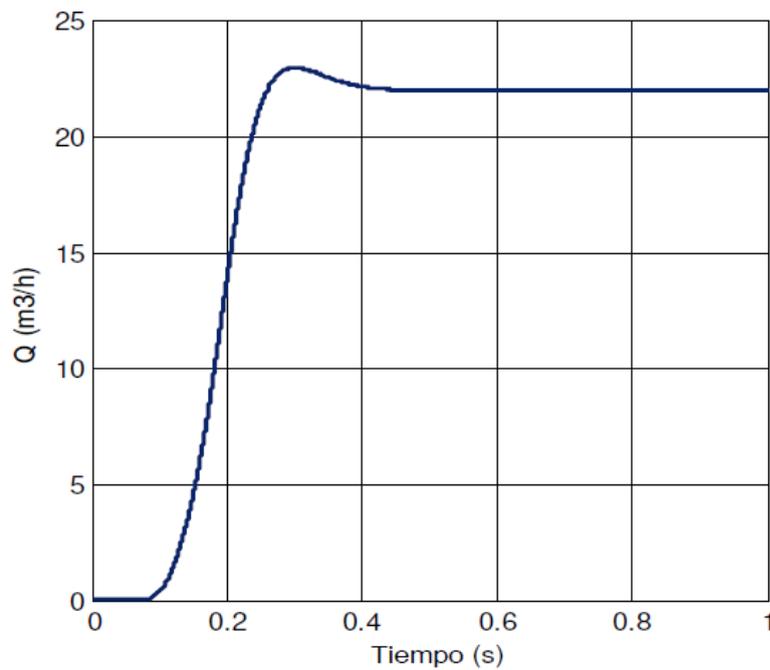
Característica de torque versus velocidad y punto de funcionamiento.



La Figura 3.27 muestra la curva de la capacidad del caudal (Q) de la bomba que se ajusta en $22 \text{ m}^3//.$

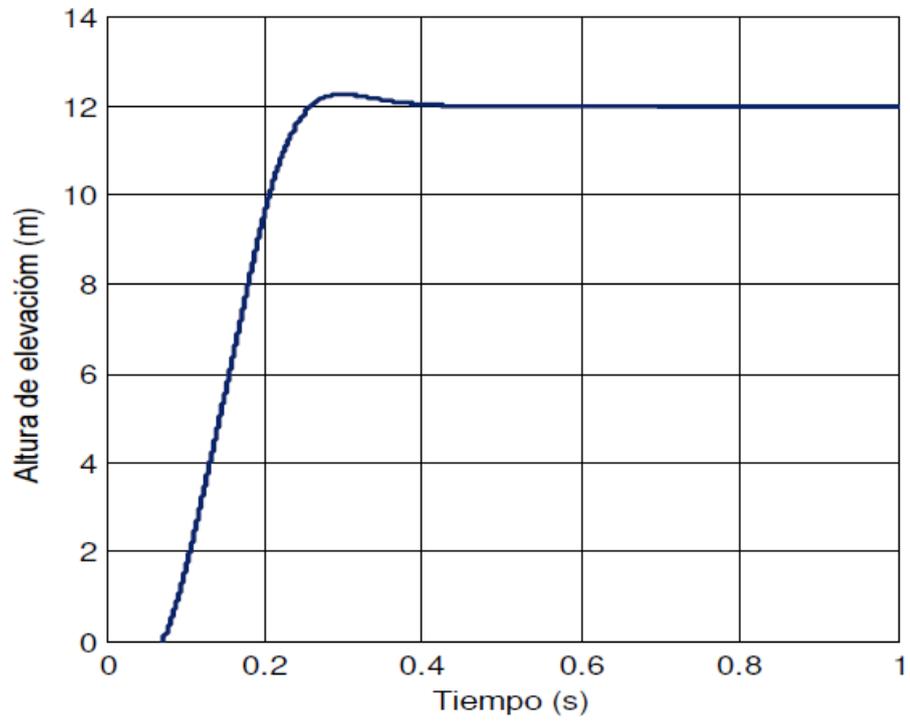
Figura 3. 27

Curva de la capacidad del caudal (Q) de la bomba.



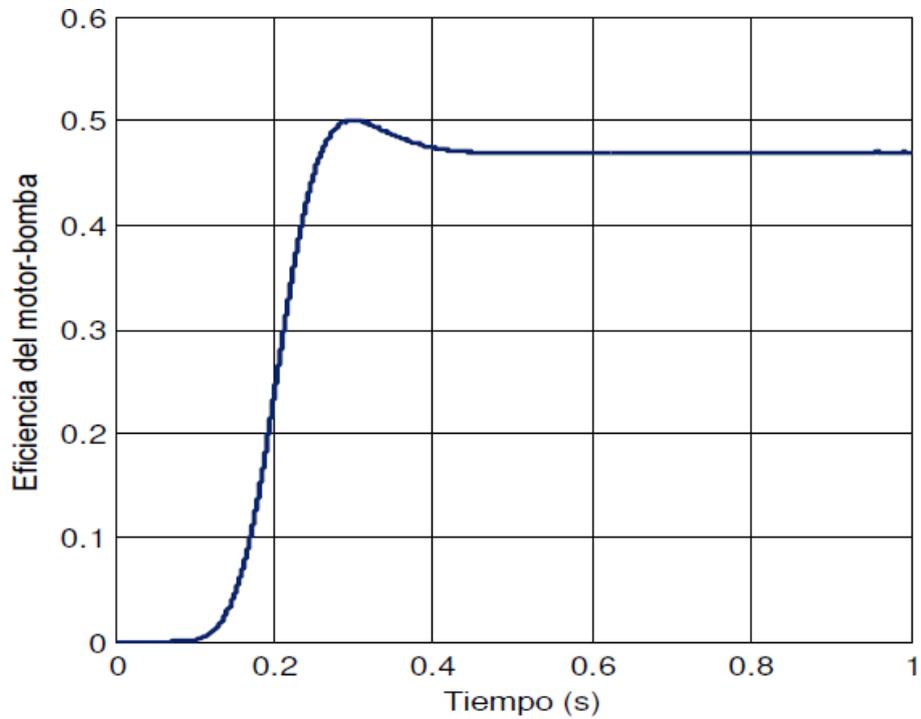
Elaborado por: Autor.

Figura 3. 28
Curva de altura de la bomba (m).



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 29
Curva de rendimiento del motor-bomba a velocidad constante.



Elaborado por: Autor.

3.10. Análisis de Factibilidad del Sistema de Bombeo Fotovoltaico.

Se define la autogeneración (también denominada autoconsumo) de energía como el desarrollo de un proyecto de producción de electricidad, basado en energías renovables, que se destina al suministro propio de un agricultor (o de una industria agroalimentaria). En este contexto, se considera que el sistema fotovoltaico genera electricidad que el abonado consume íntegramente in situ.

La metodología del consumo tiene la ventaja de incrementar la rentabilidad del proyecto de generación de electricidad a partir de una instalación fotovoltaica conectada a la red, en el supuesto de que los precios de suministro de la energía eléctrica procedente de la red sean superiores con respecto al costo de instalar el sistema fotovoltaico. Si este sistema fotovoltaico producirá más electricidad de la que se necesita en ese momento, el excedente pasa a la red; de lo contrario, el consumidor extrae de la red la electricidad que necesita. electricidad de la red.

En el mercado fotovoltaico ecuatoriano existen dos tecnologías principales. La primera emplea el silicio como material de base (monocristalino o policristalino). En la segunda, que se basa en la tecnología de capa fina, es posible combinar varios materiales proyectándolos en capas muy finas sobre un soporte. La primera tecnología es, con diferencia, la más utilizada en el mercado ecuatoriano, y está caracterizada por la implantación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en los tejados, lo que implica la necesidad de instalar colectores de mayor rendimiento en términos de potencia por superficie.

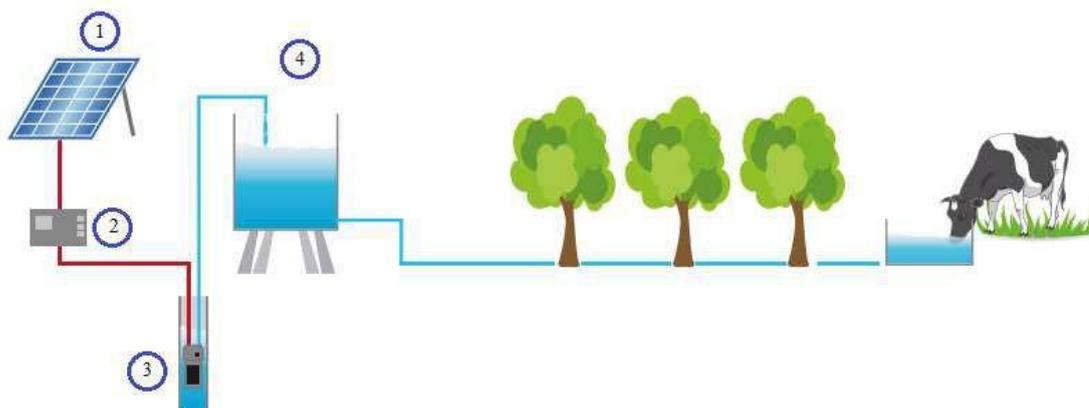
El sector agrario de la ciudad de Machala, en la provincia de El Oro está caracterizado por la abundante disponibilidad de superficies aptas para la instalación de sistemas fotovoltaicos de producción de electricidad, que pueden adoptar la forma de

- bombeo fotovoltaico de agua para aspersión en tierras de cultivo de producción agrícola,

- edificios residenciales, especialmente para pequeñas explotaciones con conexiones de baja tensión
- edificaciones ganaderas,
- edificios de empaquetado.
- en otras aplicaciones

La Figura 3.30 muestra el esquema de la propuesta del sistema de bombeo de agua para producción agrícola en la ciudad de Machala mediante el uso de energía renovable fotovoltaica. Un sistema de bombeo basado en energía fotovoltaica consta de una bomba (3), un generador solar (1), un regulador/caja de transmisión (2), depósito o reservorio elevado de agua (4), accesorios y componentes de seguridad. Por lo general, el agua se bombea a un depósito donde se almacena para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, el riego y el agua potable para el ganado (si hubiere). Otras configuraciones son posibles con bombeo directo desde el pozo al sistema de goteo siempre que no se disponga del reservorio de agua.

Figura 3. 30
Esquema del diseño del sistema de bombeo de agua usando sistema solar fotovoltaico enfocado al sector agrícola.



Elaborado por: Autor.

Muy importante, el generador fotovoltaico y el regulador deben elegirse bien en función de la potencia de la bomba. De lo contrario, pueden producirse caídas de rendimiento y una reducción significativa de la eficiencia hidráulica. En la Figura 3.31 se muestra los componentes (1) módulos fotovoltaicos y estructura de soporte de acero/aluminio, (2) controlador/inversor DC/DC o

DC/AC en función de la tecnología con protección eléctrica y cableado DC/AC, (3) bomba sumergible, y (4) Bomba de superficie.

La Tabla 3.3 muestra el costo de los equipos que harán posible la implementación de un sistema de bombeo de agua para el sector agrícola de la ciudad de Machala mediante aprovechamiento de energía solar fotovoltaica.

Figura 3. 31

Dispositivos del sistema de bombeo fotovoltaico en el sector agrícola.



Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3
 Costos del proyecto de implementación del sistema de bombeo de agua mediante paneles solares fotovoltaicos.

Mes	Costo unitario (USD)
Módulos de paneles solares fotovoltaico	\$ 650.00
Controlador/Inversor	\$ 1,800.00
Bomba sumergible	\$ 673.50
Bomba de superficie y sistema de aspersión	\$ 195.65
Mano de obra	\$ 1000
Costo Total (USD)	\$ 4,319.15

Elaborado por: Autor.

El costo puede parecer un poco elevado, pero si se considera, que no se pagará costos altos por consumo de energía eléctrica a CNEL EP, así como automatizar el sistema de riego en el sector agrícola, y no realizar gastos en extracción manual de agua al personal a cargo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.

- La revisión de literatura desarrollada en el capítulo 2 fue relevante para poder realizar el modelo del sistema propuesto en el presente trabajo.
- La modelización de cada uno de los componentes del sistema del conjunto fotovoltaico fue diseñado e implementado a partir de modelos de la literatura (celdas, inversor (CC/CC, CC/CA), motor asíncrono; bomba centrífuga) utilizando el software de simulación MATLAB/SIMULINK.
- En el análisis de factibilidad de implementación se pudo evidenciar que el costo de implantación no es muy alto y esto beneficia en mejorar los procesos de producción en el sector agrícola de la ciudad de Machala.

4.2 Recomendaciones.

- Fortalecer la valoración del impacto energético de la integración fotovoltaica mediante la optimización y determinación realista de los segmentos de mercado (residencial de baja tensión / no residencial de baja tensión / industrial de media tensión / comercial de media tensión / público de media tensión) con el fin de adaptar y ajustar el marco regulador y de incentivos al perfil del consumidor.
- En el caso de las instalaciones fotovoltaicas en el sector agrícola conectadas a media tensión, pueden ser objeto de un plan de acción nacional a través del Ministerio de Energía y de Finanzas Ecuatoriano que proporcione a los beneficiarios fondos para la financiación del proyecto, que pueden tener procedencia de donantes internacionales y de organizaciones interesadas en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

REFERENCIAS

- Abella, M. (2016). Dimensionado de Sistemas fotovoltaicos Madrid: CIEMAT. Centro de Investigaciones Energética.
- Bhatia, S. C. (2014). Solar devices. En *Advanced Renewable Energy Systems* (pp. 68–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-269-3.50003-6>
- David Arija González. (2010). Prototipo de sistema de bombeofotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas.
- Decreto, N. (2008). "Ordenamiento del uso de la energía". Managua-Nicaragua.
- GARCIA., M. J. (2010). Energía solar fotovoltaica. FC EDITORIAL. 2DA EDICION
- GRUNDFUS. (s.f.). Catalogo de selección de bombas.
- Guerra, N., Guevara, M., Palacios, C., & Crupi, F. (2018). Operation and physics of photovoltaic solar cells: An overview. *I+D Tecnológico*, 14(2), 84–95. <https://doi.org/10.33412/idt.v14.2.2077>
- Hernández Gallegos, R. (2017). *Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el ITSLV* [Tesis de Maestría].
- Martínez, J. C. (2012). Manual técnico para bombeo fotovoltaico.
- Mathew, M., Kumar, N. M., & Koroth, R. P. (2018). Outdoor measurement of mono and poly c-Si PV modules and array characteristics under varying load in hot-humid tropical climate. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3456–3464. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.592>

- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos Del Ecuador. (2014).
Balance Nacional de Energía. Quito, Ecuador: MICSEE
- Ndiaye, A., Kébé, C. M. F., Charki, A., Ndiaye, P. A., Sambou, V., & Kobi, A.
(2014). Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic
modules after a few operation years in a tropical environment. *Solar
Energy*, 103, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.006>
- Serrano, J. S. (2009). CONFIGURACION DE INSTALACIONES SOLARES
FOTOVOLTAICAS.
- Singh, V. (2019). Influence of Manually Adjustable Photovoltaic Array on the
Performance of Water Pumping Systems. *Global Challenges*, 3(11),
1900009. <https://doi.org/10.1002/gch2.201900009>

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **García Gutiérrez, Kevin Gabriel** con C.C: # **0926334368** autor del componente práctico del examen complejo: **Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 15 de enero de 2023



GARCÍA GUTIERREZ, KEVIN GABRIEL

C.C: 0926334368



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico		
AUTOR(ES)	García Gutiérrez, Kevin Gabriel		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Bohórquez Heras, Daniel Bayardo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico Mecánica		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico Mecánica		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	15 de enero del 2023	No. DE PÁGINAS:	50
ÁREAS TEMÁTICAS:	Energías Renovables, Sistemas Fotovoltaicos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Energía, Fotovoltaica, Factibilidad, Convertidores, Rendimiento, Celdas		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>En el presente trabajo se desarrolla el tema <Análisis de Factibilidad de un Sistema de Bombeo en el sector Agrícola de la ciudad de Machala usando un Sistema Fotovoltaico= previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Eléctrico-Mecánico. En la actualidad los sistemas de paneles solares fotovoltaicos son tendencia en el ámbito investigativo y de generación de energía eléctrica limpia lo que reduce la contaminación ambiental. Uno de las aplicaciones más relevante en el uso de energía renovable mediante el uso de celdas fotovoltaicas se da en el sector agrícola, en este caso se hizo un análisis de luminosidad solar en la ciudad de Machala para ver la factibilidad de implantación en el sector agrícola de la región en mención. En el capítulo 3 se presenta el modelado del sistema propuesto, así como el dimensionamiento del sistema de bombeo en el sector agrícola de la Ciudad de Machala, y finalmente el costo aproximado de la implantación del sistema propuesto en el presente trabajo.</p>		
ADJUNTO PDF:	SI	NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-39198114	E-mail: Kevin.garcia03@cu.ucsg.edu.ec	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo		
	Teléfono: +593-9-95147293		
	E-mail: Celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			