



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

TEMA:

**Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas
fotovoltaicas utilizando MatLab**

AUTOR:

Baque Manzo, María Luisa

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

REVISOR:

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

20 de septiembre del 2021




**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 **Baque Manzo, María Luisa** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA**.

REVISOR



M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DIRECTOR DE CARRERA



M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2021



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Baque Manzo, María Luisa**

DECLARÓ QUE:

El **componente práctico del examen complejo, Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab** 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 20 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

BAQUE MANZO, MARÍA LUISA



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Baque Manzo, María Luisa**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

BAQUE MANZO, MARÍA LUISA

REPORTE DE URKUND

URKUND ➔ Abrir sesión

Documento	Luisa Baque_EC2021A.docx (D112240800)
Presentado	2021-09-08 10:31 (-04:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión EC Luisa Baque Mostrar el mensaje completo 2% de estas 14 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	-
+	>	metftcriollo18082021.pdf	-
+		http://201.159.223.180/bitstream/3317/539...	-
+		uta8acrespo02092021.pdf	-
+		uta5acrespo20082021.pdf	-
+		https://tethys.pnnl.gov/publications/curren...	-

Fuentes alternativas

Reiniciar Exportar Compartir

0 Advertencias

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA

DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

TEMA:

Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas
fotovoltaicas utilizando MatLab

AUTOR: Baque Manzo, María Luisa

Componente práctico del examen complejo

previo a la obtención del grado de INGENIERO EN
ELÉCTRICO MECÁNICA

DEDICATORIA

Dedicado a NM, JE y JS por ser mi inspiración y motivación en todo lo que hago.

EL AUTOR

BAQUE MANZO, MARÍA LUISA

AGRADECIMIENTO

Mi Agradecimiento a Dios y a mi Santa Martha por haberme guiado durante todo este camino. A mi papa por ser mi inspiración personal y profesional. A mi mama y hermanos que nunca dudaron de mí.

A mis maestros quienes con sus conocimientos enriquecieron cada día de este camino.

A todos aquellos que desde su espacio y en silencio fueron ese empujón de energías que nunca me faltó

EL AUTOR

BAQUE MANZO, MARÍA LUISA



**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. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS
DECANO

f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción del componente práctico	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivo General.	3
1.3. Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.....	4
2.1. Descripción general de fuentes de energía renovable.	4
2.2. Tipos de energías renovables.	5
2.2.1. Energía solar o fotovoltaica.	6
2.2.2. Energía hidroeléctrica.....	7
2.2.3. Energía eólica.....	8
2.2.4. Energía del mar.	8
2.3. Generalidades sobre energía solar fotovoltaica	9
2.4. Uso de generadores fotovoltaicos.....	10
2.5. Modelado de las características del módulo / campo fotovoltaico.....	11
2.6. Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.	13
Capítulo 3: Desarrollo del componente práctico.	15
3.1. Descripción general de un generador fotovoltaico.	15
3.2. Modelado de una celda fotovoltaica con un diodo.....	15
3.3. Análisis de resultados del modelo matemático de celdas fotovoltaicas.	20
Conclusiones.	29

Recomendaciones.....	30
Bibliografía.....	31

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Principales recursos energéticos renovables.....	5
Figura 2. 2: Proceso de conversión de la energía solar.....	6
Figura 2. 3: Esquema de una central hidroeléctrica con un depósito de compensación ascendente.	7
Figura 2. 4: Esquema general del parque de energía eólica Villonaco.	8
Figura 2. 5: Esquema del funcionamiento de una central mareomotriz.	9
Figura 2. 6: Célula solar fotovoltaica.....	10
Figura 2. 7: Sistema fotovoltaico acoplado a la red.	11
Figura 2. 8: Sistema fotovoltaico aislado.	11
Figura 2. 9: Esquema equivalente a un sistema fotovoltaico.	12
Figura 2. 10: Modelo eléctrico de un campo fotovoltaico.	13

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques de los componentes principales de un sistema fotovoltaico.	15
Figura 3. 2: Representación gráfica para materiales semiconductores en aplicaciones de energía solar fotovoltaica.	16
Figura 3. 3: Esquemático del circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica.....	17
Figura 3. 4: Gráfica de la potencia máxima ideal y la potencia práctica.	21
Figura 3. 5: Curva característica I-V de un generador fotovoltaico.	24
Figura 3. 6: Curvas I-V de un panel con distintos niveles de luz solar a T=25 °C.....	25
Figura 3. 7: Curvas P-V de un panel con distintos niveles de luz solar a T=25 °C.....	25
Figura 3. 8: Curvas I-V de un generador fotovoltaico para diferentes temperaturas a $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	27

Figura 3. 9: Curvas P-V de un generador fotovoltaico para diferentes temperaturas a $G=1000\text{W/m}^2$ 27

Índice de Tablas

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del módulo fotovoltaico en MatLab. . 23

Resumen

En el presente documento se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab. En el capítulo 1, se describe brevemente una introducción de las energías renovables, objetivo general y específicos del componente práctico. En el capítulo 2, se describe los fundamentos teóricos de las fuentes de energías renovables (solar, hidroeléctrica, eólica y mareomotriz) y específicamente de la energía solar fotovoltaica. Se presenta una introducción del modelado matemático de paneles fotovoltaicos utilizando el análisis de circuitos eléctricos y sobre el dimensionamiento de módulos fotovoltaicos (conexiones en serie, paralelo y mixta). En el capítulo 3, se desarrolla la parte práctica del examen complejo utilizando la plataforma de simulación MatLab. Se utiliza el principio físico de los semiconductores (diodo) abordado en Electrónica I y que sirve como modelado matemático de las celdas fotovoltaicas. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos en el entorno de simulación MatLab.

Palabras claves: Energías, Renovable, Fotovoltaica, Semiconductores, Módulos, Modelado.

Capítulo 1: Descripción del componente práctico

1.1. Introducción.

El sol proporciona una energía colosal a la tierra (10000 veces la energía requerida) en forma de luz. Pero el problema es que la forma en que se la recibe no es necesariamente en la que se puede utilizar. Por tanto, se tiene que utilizar procesos de conversión. Por ejemplo, las celdas solares fotovoltaicas convierten la energía luminosa del sol en energía eléctrica. El agotamiento de las fuentes de energía tradicionales (petróleo ...) por su mayor uso y el considerable aumento del precio del petróleo, hacen que el estudio de las energías renovables sea de crucial importancia en los próximos años.

La electricidad solar es una fuente importante de energía renovable que podría ser una alternativa a otras fuentes convencionales para satisfacer las grandes necesidades energéticas en el futuro. Esta energía encuentra su ventaja en aplicaciones de pequeño y mediano consumo en regiones aisladas y alejadas de las líneas de distribución eléctrica.

La energía fotovoltaica (PV) es la transformación directa de luz en electricidad. A diferencia de la energía solar pasiva, que utiliza los elementos estructurales de un edificio para calentarlo mejor (o enfriarlo), y la energía solar activa, que utiliza un refrigerante (líquido o gaseoso) para transportar y almacenar el calor del sol (pensamos en el calentador de agua), la energía fotovoltaica no es una forma de energía térmica. Utiliza una celda solar para convertir la energía solar directamente en electricidad.

El efecto fotovoltaico, es decir, la producción de electricidad directamente a partir de la luz fue observado por primera vez en 1839 por el físico francés Edmond Becquerel. Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 que los investigadores de la empresa Bell-Lab en los Estados Unidos lograron fabricar la primera celda solar, el componente principal de un sistema fotovoltaico.

El presente estudio del examen complejo se enfoca en generar electricidad a partir de energía fotovoltaica. En el capítulo 2 se describe los fundamentos teóricos o estado del arte de los sistemas fotovoltaicos, y en el capítulo 3 se detallan los elementos relacionados con este recurso y su transformación en energía eléctrica mediante simulación en MatLab.

1.2. Objetivo General.

Evaluar el modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab.

1.3. Objetivos Específicos.

- a. Describir la fundamentación teórica de las fuentes de energía renovable y sistemas de energía solar fotovoltaica.
- b. Realizar el modelo matemático a nivel de semiconductores de celdas solares fotovoltaicas.
- c. Evaluar el modelo matemático mediante las curvas características de I-V y P-V utilizando el software MatLab.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

2.1. Descripción general de fuentes de energía renovable.

Las preocupaciones sobre el cambio climático y la creciente conciencia ambiental han llevado a gobiernos, industrias e investigadores a realizar esfuerzos significativos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, centrándose en fuentes alternativas de energía renovable. Según (Al-Najideen & Alwashdeh, 2017) la energía es uno de los candidatos más prometedores, que juega un papel importante en el crecimiento económico de las naciones del mundo. Varios factores como la urbanización, la modernización y el aumento de la población humana conducen a un fuerte aumento de la demanda de energía en el mundo.

En los países desarrollados, el consumo de energía está aumentando a una tasa del 1% anual y del 5% anual para los países en desarrollo (Borgstein et al., 2016; Panos et al., 2016). La tendencia energética del futuro muestra que la cantidad de energía necesaria se duplicará en 2025 según la Agencia Internacional de Energía (AIE).

En la actualidad, la generación de electricidad todavía está muy centralizada y, a menudo, se encuentra a gran distancia de sus usuarios finales. La nivelación de carga se basa inicialmente en la previsión de las necesidades diarias y estacionales, pero también, cuando la producción es insuficiente, en la contribución de modos secundarios como las centrales hidráulicas y térmicas. De hecho, estas plantas también utilizan energía almacenada: en forma de agua para instalaciones de almacenamiento por bombeo y combustibles fósiles para plantas térmicas.

La producción de electricidad reubicada por fuentes de energía renovable ofrece una mayor seguridad de suministro a los consumidores respetando el medio ambiente. Sin embargo, el carácter intermitente (energías renovables: solar, aerogeneradores, etc.) de estas fuentes requiere un estudio detallado de las mismas y el establecimiento de normas de dimensionamiento y uso para aprovecharlas al máximo.

De hecho, sus fluctuaciones aumentan la dificultad de estabilizar la red eléctrica, principalmente debido a un desequilibrio oferta/demanda. Por lo tanto, es conveniente generar energía, convertirla, transmitirla y luego almacenarla según sea necesario. Teniendo en cuenta sus respectivas características estacionales, las energías (solar y eólica) distan mucho de estar en competencia por el contrario se compensan si se gestionan de forma óptima. Si bien la rentabilidad de la puesta en común de estas dos fuentes parece convincente desde el punto de vista económico, esto no excluye que constituya un sistema bastante complejo desde el punto de vista tecnológico, por lo que requiere un estudio detallado sobre el tema.

Es por ello por lo que en las siguientes secciones se realiza una descripción cualitativa de energía solar mediante paneles fotovoltaicos y su principio de funcionamiento. Se presentará en las siguientes secciones los tipos de energías renovables, las generalidades de energía solar fotovoltaica, dimensionamiento y características básicas del sistema solar.

2.2. Tipos de energías renovables.

Las principales fuentes de energía renovable son: (a) solar, (b) hidráulica, (c) eólica, (d) biomasa y (e) geotérmica. La figura 2.1 ofrece una visión general de los principales recursos energéticos que pueden utilizarse para producir electricidad limpia.

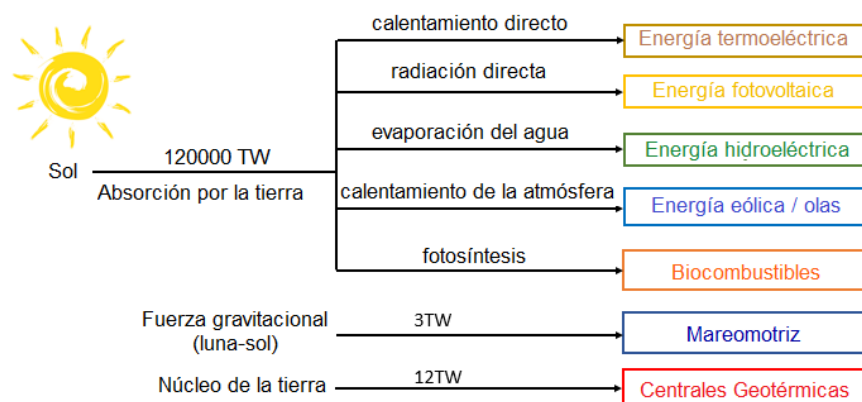


Figura 2. 1: Principales recursos energéticos renovables.
Fuente: (Freris & Infield, 2008)

A continuación, se presentan los diferentes tipos de fuentes de energía y en la sección 2.3 en adelante se enfocará en la energía solar fotovoltaica.

2.2.1. Energía solar o fotovoltaica.

El sol es una fuente de energía casi inagotable, ya que envía a la superficie de la Tierra una radiación que equivale a unas 8400 veces el consumo total de energía humana al año. La energía solar es abundante y gratuita. La energía fotovoltaica se obtiene directamente de la radiación solar. Los paneles fotovoltaicos son componentes semiconductores que utilizan sus propiedades fotoeléctricas para generar energía eléctrica según un principio llamado "efecto fotoeléctrico". La figura 2.2 muestra una cadena de generación de electricidad solar fotovoltaica.

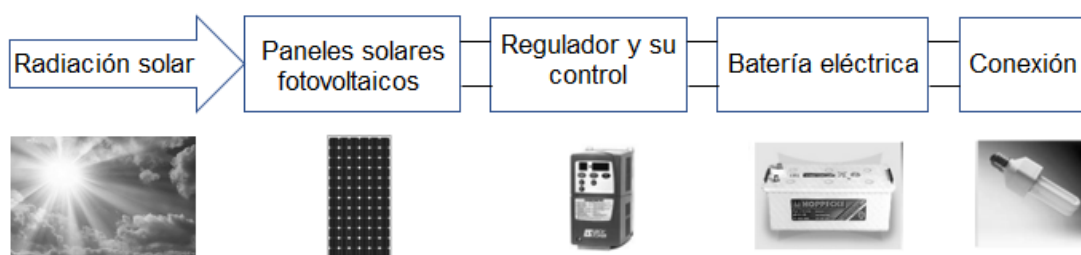


Figura 2. 2: Proceso de conversión de la energía solar.
Elaborado por: Autor.

Los sistemas fotovoltaicos se dividen en dos categorías principales:

- 1) Sistemas conectados a la red, en los que la electricidad producida se introduce en la red eléctrica
- 2) Instalaciones autónomas en las que la electricidad se produce para alimentar lugares o equipos aislados. No están conectados a la red eléctrica. Entre ellas, la electrificación rural, la alimentación de los relés de telecomunicaciones y los emplazamientos insulares.

Debido a las características eléctricas altamente no lineales de las células fotovoltaicas y a su fuerte dependencia de las condiciones meteorológicas, es necesario utilizar una etapa de adaptación en combinación con técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia. La mejora de la eficiencia, la reducción de los costes de producción y las nuevas tecnologías del sector fotovoltaico han permitido un rápido desarrollo de este tipo de instalaciones, ya sea para complementar la energía recibida por la red o para electrificar lugares aislados.

2.2.2. Energía hidroeléctrica.

La energía hidroeléctrica se utiliza para generar electricidad aprovechando la fuerza motriz de los ríos. La energía hidroeléctrica apareció a mediados del siglo XIX. La potencia producida por la instalación depende de dos parámetros: la altura y el caudal tomado del río. Las centrales hidroeléctricas se clasifican generalmente según su potencia y tamaño. Se distingue entre:

- 1) Grandes centrales hidroeléctricas (Potencia mayor a 10 MW).
- 2) Pequeñas centrales hidroeléctricas, subdivididas en:
 - a) Pequeña central eléctrica de 2000 kW a 10000 kW
 - b) Minicentral eléctrica para una potencia entre 500 kW y 2000 kW
 - c) Microcentral para una potencia entre 20 kW y 500 kW
 - d) Pequeña central eléctrica para una capacidad inferior a 20 kW

Una central hidroeléctrica es una forma de producción de energía que cumple los tres criterios establecidos en la definición generalmente aceptada de energía renovable: sostenibilidad de los recursos, respeto al medio ambiente (con ciertas precauciones) y posibilidad de producción deslocalizada. La figura 2.3 muestra el funcionamiento de una central hidroeléctrica con depósito de compensación ascendente.

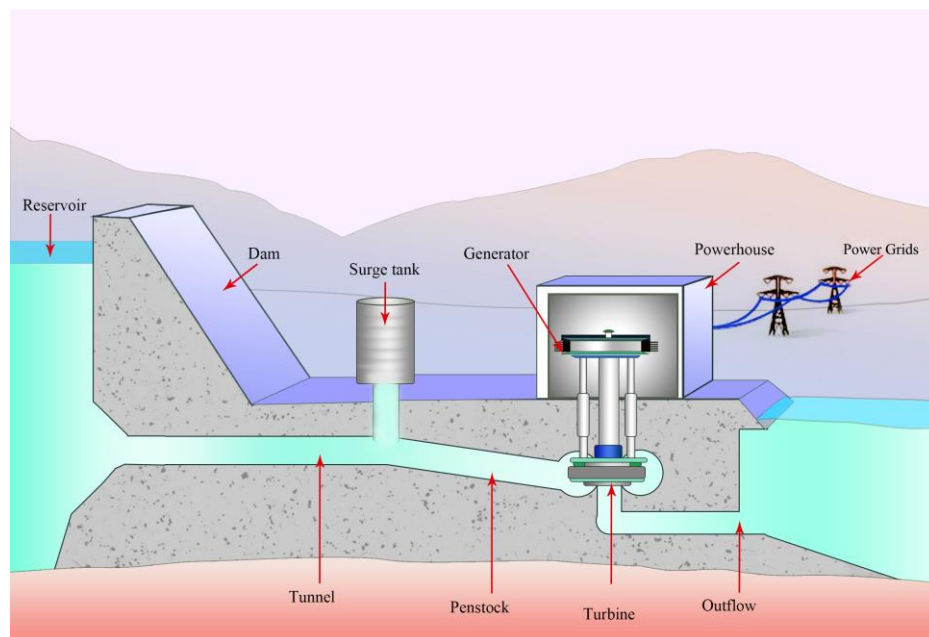


Figura 2. 3: Esquema de una central hidroeléctrica con un depósito de compensación ascendente.

Fuente: (Xu & Qian, 2015)

2.2.3. Energía eólica.

Limpia y renovable, la energía eólica está disponible en abundancia. Los aerogeneradores se han convertido en parte de nuestro entorno cotidiano. Este tipo de energía representa una parte creciente de la energía suministrada a la red pública. Existen varias estructuras de turbinas eólicas. Pueden elegirse en función de su potencia, rango de velocidad del viento y dimensiones deseadas. En Ecuador existe la central de energía eólica más grande del planeta. En la figura 2.4 se describe la estructura de los aerogeneradores que constituyen la central de energía eólica Villonaco en la Provincia de Loja.

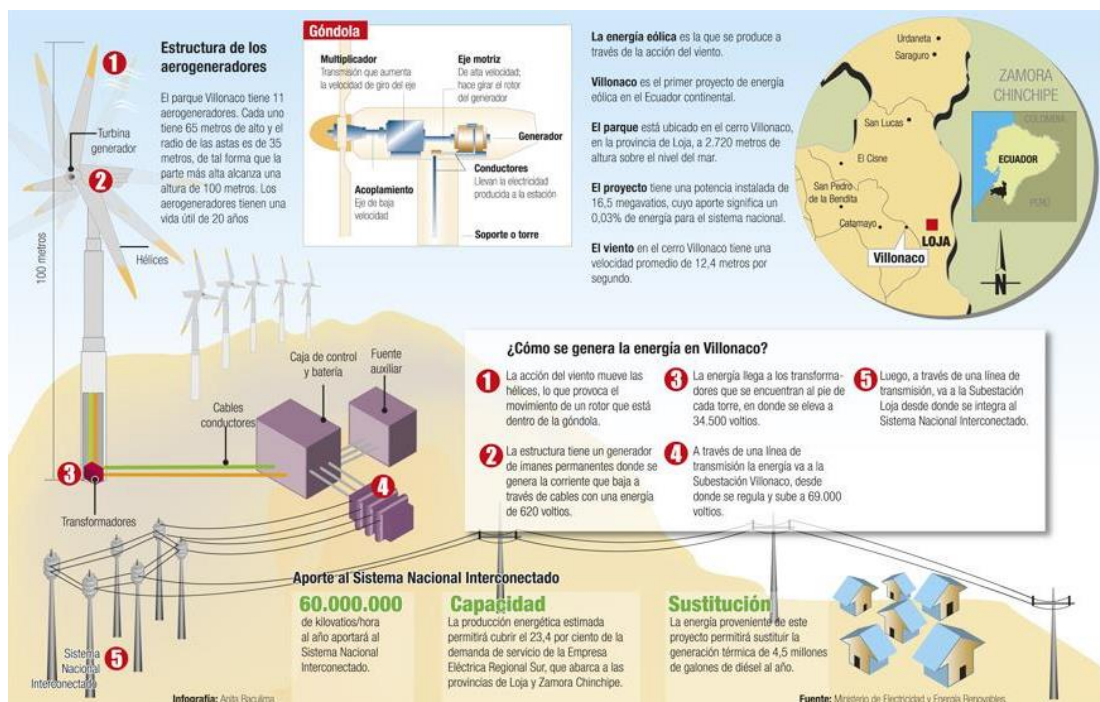


Figura 2. 4: Esquema general del parque de energía eólica Villonaco.
Fuente: (Sarmiento Rivera & Valarezo Borrero, 2014)

2.2.4. Energía del mar.

Los campos gravitacionales de la Luna y el Sol hacen que el agua suba y baje de forma natural en la costa. La Luna está más cerca de la Tierra, por lo que se podría considerar que la energía de las mareas es principalmente de origen lunar. Los diferentes tipos de energía marina son:

- 1) La energía mareomotriz: en una central mareomotriz se aprovecha la fuerza del flujo y reflujo de la marea para generar electricidad en tiempo real. Cuando la marea sube y baja, hace girar las turbinas.

Las turbinas accionan a su vez un alternador que produce una corriente eléctrica alterna.

- 2) Energía de las corrientes marinas: se capta para producir electricidad mediante turbinas mareomotrices, al igual que las turbinas eólicas aprovechan la fuerza del viento.
- 3) La energía térmica de los mares aprovecha la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y las aguas profundas de los océanos.
- 4) La energía de las olas es la energía marina que utiliza la energía contenida en el movimiento del oleaje.
- 5) La energía osmótica aprovecha el fenómeno de la ósmosis entre el agua dulce y la salada.
- 6) La biomasa marina aprovecha las algas y el fitoplancton mediante gasificación, fermentación o combustión.

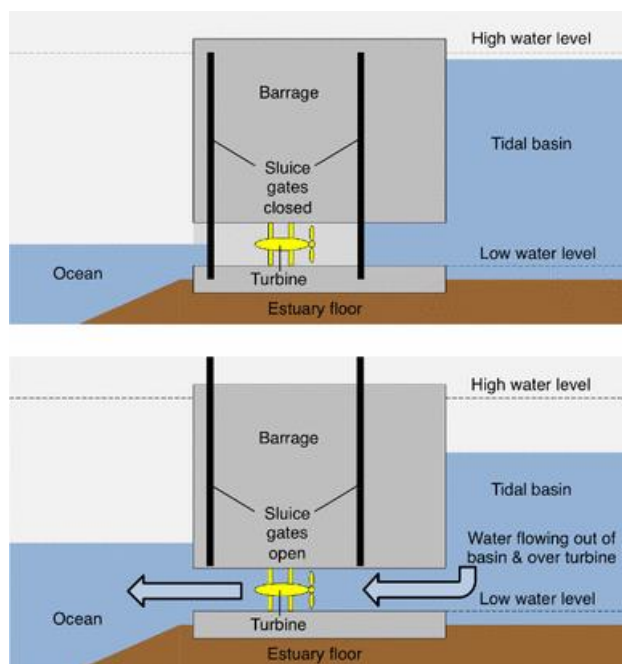


Figura 2. 5: Esquema del funcionamiento de una central mareomotriz.

Fuente: (Roberts et al., 2016)

2.3. Generalidades sobre energía solar fotovoltaica

El efecto fotovoltaico se manifiesta por la aparición de una diferencia de potencial en la unión entre un metal y un semiconductor o entre dos semiconductores cuando el dispositivo recibe radiación luminosa de longitud de onda adecuada. Así, una célula fotovoltaica puede convertir la energía

solar en energía eléctrica poniendo en juego este fenómeno físico optoelectrónico. Industrialmente, los materiales más utilizados son a base de silicio. El rendimiento de eficiencia energética alcanzado industrialmente es del 13 al 14% para las células basadas en silicio monocristalino, del 11 al 12% con polisilicio y finalmente del 7 al 8% para el silicio amorfo.

El cambio de un módulo a un panel se realiza agregando diodos de protección, uno en serie para evitar corrientes inversas y otro en paralelo, llamado diodo de bypass (en el capítulo 3 se realiza el modelado y simulación). Esto solo interviene en el caso de un desequilibrio de un conjunto de celdas para limitar la tensión inversa en los terminales de este conjunto y minimizar la pérdida de producción asociada.

En la figura 2.6 se puede apreciar los componentes básicos de una célula solar fotovoltaica. (Díaz de Corcuera Urretavizcaya, 2020)

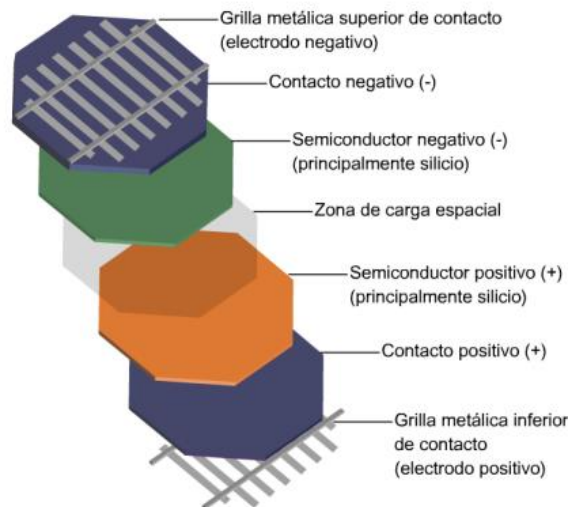


Figura 2. 6: Célula solar fotovoltaica.
Fuente: (Díaz de Corcuera Urretavizcaya, 2020)

2.4. Uso de generadores fotovoltaicos.

El campo de aplicación de los generadores fotovoltaicos es diverso entre los que se mencionan dos principales:

- Distinguir el caso de las instalaciones conectadas a la red: la ventaja de la conexión a la red es prescindir del problema del almacenamiento eléctrico. Pero cuando el sitio de consumo está

aislado o lejos de la red local, sería prudente en términos de economía preferir una instalación descentralizada, tal como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2. 7: Sistema fotovoltaico acoplado a la red.
Fuente: (Vega Rojas, 2019)

- El sistema también puede ser autónomo, la energía producida por los paneles solares fotovoltaicos se aprovecha de forma inmediata (bombeo, ventilación, etc.) o se almacena en baterías para su posterior uso. La corriente continua producida alimenta directamente los dispositivos destinados a este fin o se transforma en corriente alterna a través de dispositivos electrónicos de potencia, tal como se muestra en la figura 2.8.



Figura 2. 8: Sistema fotovoltaico aislado.
Fuente: (Vega Rojas, 2019)

2.5. Modelado de las características del módulo / campo fotovoltaico.

El principio físico de una celda fotovoltaica está representado por el circuito eléctrico equivalente, mostrado esquemáticamente en la figura 2.9. Ampliamente utilizado en la literatura, el modelado de sistemas fotovoltaicos viene dado por:

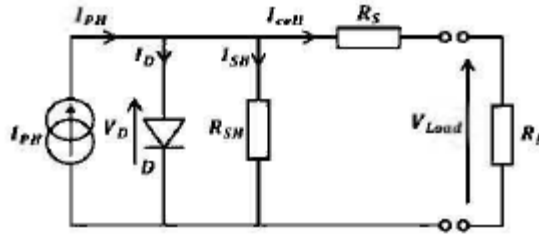


Figura 2. 9: Esquema equivalente a un sistema fotovoltaico.
Fuente: (Vega Rojas, 2019)

Se han realizado estudios en el pasado y muchos investigadores han desarrollado con éxito varios modelos (células/módulos/paneles fotovoltaicos). Principalmente citamos dos modelos de uso común: el modelo con dos diodos (Ecuación 2.1) y el modelo con un diodo (Ecuación 2.2). Este último es el más utilizado, y su modelo eléctrico se muestra en la figura 2.10.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{n_1 V_T} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{n_2 V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{(V+R_S I)}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{(V+R_S I)}{n V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{(V+R_S I)}{R_p} \quad (2.2)$$

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S \left(\frac{N_s}{N_p} \right)}{n N_s V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_S \left(\frac{N_s}{N_p} \right)}{R_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right)} \quad (2.3)$$

Con

$$V_T = \frac{k \times T}{q}$$

- V es el voltaje en el módulo e I es la corriente de salida.
- q es la carga eléctrica del electrón, $q = 1,602177 \times 10^{-19}$ Coulomb.
- k es la constante de Boltzmann, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]
- T es la temperatura de la unión [K]
- n es el factor de idealidad de la unión.
- R_{SH} es la resistencia de derivación (paralelo)
- R_s , es la resistencia en serie

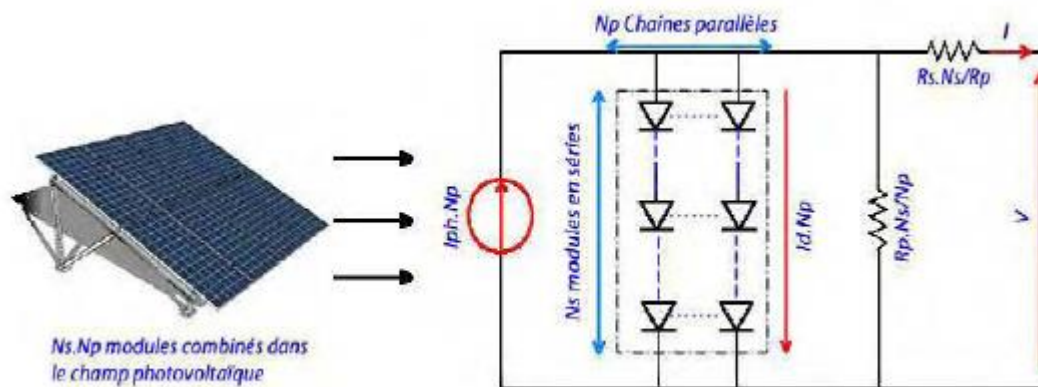


Figura 2. 10: Modelo eléctrico de un campo fotovoltaico.

Fuente: (Vega Rojas, 2019)

El panel fotovoltaico consta de un conjunto de módulos fotovoltaicos montados en serie (módulos N_s) y en paralelo (módulos N_p). Aquí se asume que las células y los módulos se colocan juntos de manera uniforme y se iluminan por igual. La ecuación (2.3) representa su modelo matemático y la figura 2.6 su modelo eléctrico

2.6. Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico generalmente depende de varios parámetros, entre otros, el perfil de carga a suministrar, pero también las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos y la disposición en serie o paralelo de estos últimos. De hecho, la agrupación en serie permite aumentar la tensión de salida del sistema fotovoltaico, mientras que una asociación en paralelo aumentará su corriente. La referencia da los detalles de una instalación fotovoltaica.

En efecto, conociendo la potencia de la carga a suministrar, y descuidando las pérdidas (consumo diario deducido = 0), tenemos las siguientes relaciones:

El consumo diario se escribe:

$$Cons = P \times t \left(\frac{Wh}{j} \right) \quad (2.4)$$

La potencia máxima viene dada por:

$$P_c = \frac{Cons}{K.E} (W_c) \quad (2.5)$$

donde,

Cons, es el consumo diario (Wh/j);

K, es el factor de corrección que incluye varias salidas, así como un coeficiente de seguridad, generalmente se encuentra entre 0.55 y 0.65 y

E, es la energía incidente en el plano de los módulos ($Kwh / m^2 / j$).

El cálculo del número de módulos a colocar en serie y en paralelo viene dado por:

$$n_s = \frac{U_u}{U_m} = \text{módulos en serie} \quad (2.6)$$

$$n_p = \frac{P_c}{P_{c_{mod}} \times n_s} = \text{módulos en paralelo} \quad (2.7)$$

El número de módulos solares a instalar es entonces el producto $n_s \times n_p$

El rendimiento solar viene dado por:

$$n = \frac{P_c}{G \times S} \quad (2.8)$$

donde

- P_c : potencia pico del módulo(W)
- G : Irradiación ($\frac{Wh}{m^2}$)
- S : superficie (m^2)
- U_u : voltaje útil del módulo(V)
- U_m : voltaje del módulo(V)
- $P_{c_{mod}}$: potencia del módulo(W)

Capítulo 3: Desarrollo del componente práctico.

3.1. Descripción general de un generador fotovoltaico.

El generador fotovoltaico es un conjunto de equipos configurados para aprovechar la energía fotovoltaica para satisfacer las necesidades de carga. Dependiendo de la potencia deseada, los módulos se pueden ensamblar en paneles para formar un "campo fotovoltaico". Conectado al receptor sin ningún otro elemento, el panel solar funciona "sobre el sol", es decir que la energía eléctrica suministrada al receptor es función de la energía solar. Por lo tanto, está en su máximo cuando el sol está en su cenit y cero en la noche.

Pero, muy a menudo, las necesidades eléctricas no se corresponden con las horas de sol y requieren una intensidad regular (iluminación o alimentación de frigoríficos, por ejemplo). Luego, el sistema está equipado con baterías de acumuladores que permiten almacenar la electricidad y devolverla a tiempo. Entonces, un regulador es esencial para proteger las baterías contra sobrecargas o descargas profundas dañinas para su vida útil. Para varias aplicaciones, la corriente continua producida por el generador fotovoltaico se convierte mediante un inversor en corriente alterna, tal como se muestra en la figura 3.1.

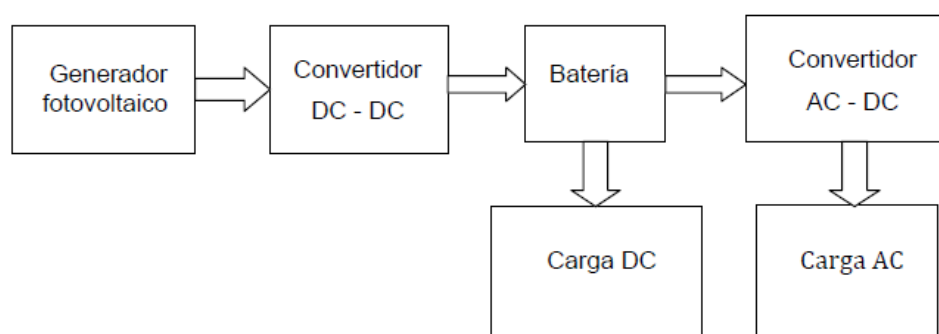


Figura 3. 1: Diagrama de bloques de los componentes principales de un sistema fotovoltaico.

Elaborado por: Autor.

3.2. Modelado de una celda fotovoltaica con un diodo.

El uso de células solares comienza en el campo espacial. La investigación ha mejorado su rendimiento y tamaño, pero no fue hasta la

crisis energética de 1973 que los gobiernos y la industria invirtieron en tecnología fotovoltaica y sus aplicaciones terrestres. Las celdas están hechas de un material semiconductor que absorbe energía luminosa y la convierte directamente en corriente eléctrica. Un semiconductor es un material cuya concentración de carga libre es muy baja en comparación con los metales. Para que un electrón unido a su átomo (banda de valencia) se libere en un semiconductor y participe en la conducción de la corriente, se le debe suministrar una energía mínima para que pueda alcanzar mayores niveles de energía (banda de conducción).

Esta es la energía de la "banda prohibida", por ejemplo, en electronvoltios (eV). Este valor umbral es específico para cada material semiconductor y varía entre 1 y 1.8 eV para aplicaciones fotovoltaicas. Para el silicio cristalino es 1.1 eV y para el silicio amorfo es 1.7 eV. La figura 3.2 muestra el fenómeno de conducción en materiales semiconductores algo fundamental que fue tratado en la materia de Electrónica Analógica.

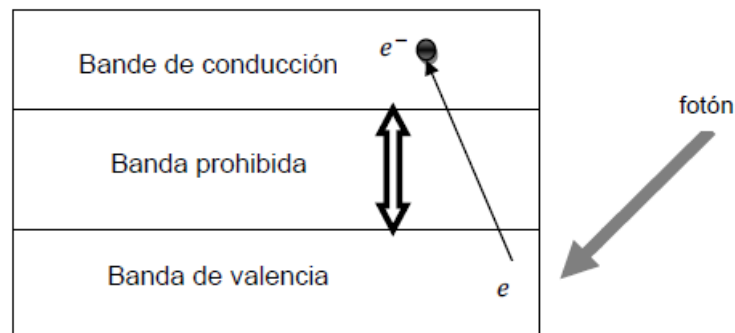


Figura 3. 2: Representación gráfica para materiales semiconductores en aplicaciones de energía solar fotovoltaica.

Elaborado por: Autor.

La radiación que llega a la celda solar se reflejará en parte, otra parte será absorbida y el resto pasará por el espesor de la celda. Los fotones absorbidos cuya energía es mayor que el ancho de la banda prohibida liberará un electrón negativo, dejando un "agujero" positivo. Para separar este par de cargas eléctricas de signos opuestos y recoger una corriente eléctrica, es necesario introducir un campo eléctrico, E , a cada lado de la celda. El método utilizado para crear este campo es el de dopaje con impurezas. Son posibles dos métodos de dopaje: (a) tipo N y (b) tipo P.

La elección del modelo de cinco parámetros permite realizar un análisis y una evaluación del rendimiento del módulo fotovoltaico más cercano a la realidad. Este modelo representa la celda solar como una fuente de corriente que modela la conversión del flujo de luz en energía eléctrica. La resistencia montada en la serie R_s representa la resistencia de contacto y conexión, otra resistencia en paralelo llamada resistencia en derivación R_p representa la corriente de fuga.

La figura 3.3 muestra al circuito equivalente de una celda fotovoltaica con el diodo en paralelo que es similar al modelo de unión de tipo PN tratado en Electrónica Analógica.

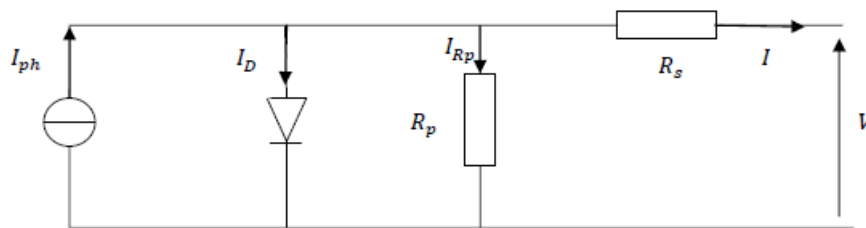


Figura 3. 3: Esquemático del circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica.
Elaborado por: Autor

Del circuito equivalente (véase la figura 3.3) se aplica la Ley de Kirchhoff de Corriente (LKC) y queda:

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp}$$

Para la corriente que fluye a través de la resistencia R_p se aplica la Ley de Kirchhoff de Voltaje (LKV) y viene dada por:

$$I_{Rp}R_p = V + IR_s$$

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_s}{R_p}$$

La corriente en el diodo viene dada por:

$$I_D = I_s \left[e^{\frac{V+IR_s}{nVT}} - 1 \right]$$

donde, I_s es la corriente de saturación del diodo definida por:

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

donde,

V_t , es el voltaje térmico a temperatura T e igual a $V_t = \frac{KT}{q}$

K , es la constante de Boltzmann

K , es la constante de Boltzmann

n , es el factor de no idealidad de la unión

T , es la temperatura efectiva de la celda en grados Kelvin

E_g , es la energía de banda prohibida (para el silicio cristalino es igual a 1,12 eV)

Entonces la expresión de la característica $I(V)$ es:

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

La corriente de cortocircuito I_{CC} representa la corriente máxima generada por la celda. Se produce cuando se somete a un cortocircuito $V = 0$. Como $R_s \ll R_p$, se puede suponer que $I_{ph} \approx I_{CC}$ para ($G=1000 \text{ W/m}^2$). La ecuación anterior se convierte en:

$$I = I_{CC} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

La tensión de circuito abierto V_{CO} se calcula cuando la corriente es cero, de la siguiente manera:

$$V_{CO} = nV_T \ln \left(1 + \frac{I_{CC}}{I_s} \right)$$

Al igual que $I_{CC} \gg I_s$, también es posible calcular V_{CO} mediante la siguiente relación:

$$V_{CO} = nV_T \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_s} \right)$$

La corriente de saturación inversa de referencia del primer diodo viene dada por:

$$I_{ST} = \frac{I_{CCT}}{e^{\frac{V_{CO}}{nV_{Tref}}} - 1}$$

$V_{T_{ref}}$, es el voltaje térmico para una temperatura de referencia T_{ref}

Asumiendo que la resistencia en paralelo es infinita ($R_p = \infty$) la ecuación de la corriente I se simplifica a:

$$I = I_{CC} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right]$$

donde,

I , es la corriente que fluya por la celda fotovoltaica

V , es el voltaje a través de la celda fotovoltaica

La diferenciación de la ecuación anterior da:

$$dI = -I_s \left(\frac{dV + R_s dI}{nV_t} \right) \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} \right]$$

Las ecuaciones establecidas hasta ahora solo son válidas para un modo de funcionamiento específico en términos de iluminación y temperatura. Para generalizar el modelado para diferentes iluminancias y temperaturas, se utiliza el modelo que mueve la curva de referencia a nuevas ubicaciones. Luego, el nuevo valor de la corriente de cortocircuito I_{CC} para una irradiación G dada y una temperatura T dada se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{CC}(G, T) = I_{CCT} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})]$$

donde,

I_{CCT} , es la corriente de cortocircuito medida con una irradiación de 1000 W/m^2 .

a , es el coeficiente de variación de la corriente en función de la temperatura ($a = 0.65 \times 10^{-3}$).

T_{ref} , es la temperatura de referencia, 298 ° K (25 ° C).

La corriente de saturación del diodo depende de la temperatura. Su valor para una temperatura dada T se calcula mediante:

$$I_s(T) = I_{sr}(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{s}{n_e} \left(\frac{-qEg}{n_k} \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}$$

En condiciones de funcionamiento ambientales fijas (iluminación, temperatura, velocidad de circulación del aire ambiente, etc.), la potencia eléctrica P (W) disponible en los terminales de una celda fotovoltaica es:

$$P = VI$$

$P(W)$, energía suministrada por la celda fotovoltaica

$V(V)$, voltaje medido en los terminales de la celda fotovoltaica

$I(A)$, corriente medida por la celda fotovoltaica

Para una celda fotovoltaica ideal, la potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$) ideal correspondería por tanto al voltaje de circuito abierto (V_{CO}) multiplicada por la corriente de cortocircuito (I_{CC}):

$$P_{m\acute{a}x} = V_{CO}I_{CC}$$

donde,

$P_{m\acute{a}x}(V)$, es la potencia suministrada por la celda fotovoltaica.

$V_{CO}(V)$, es el voltaje de circuito abierto medido a través de la celda fotovoltaica.

I_{CC} , es la corriente de salida de cortocircuito de la celda fotovoltaica.

3.3. Análisis de resultados del modelo matemático de celdas fotovoltaicas.

En la práctica, la curva característica de una celda fotovoltaica es más "redondeada" (véase la figura 3.4), y el voltaje en el punto de máxima potencia $V_{PM\acute{a}x}$ es menor que el voltaje de circuito abierto V_{CO} , al igual que la corriente suministrada $I_{PM\acute{a}x}$ es menor, para este mismo voltaje, que la corriente de cortocircuito I_{CC} . La expresión de la potencia en este punto viene dada por:

$$P_{M\acute{a}x} = V_{PM\acute{a}x}I_{PM\acute{a}x}$$

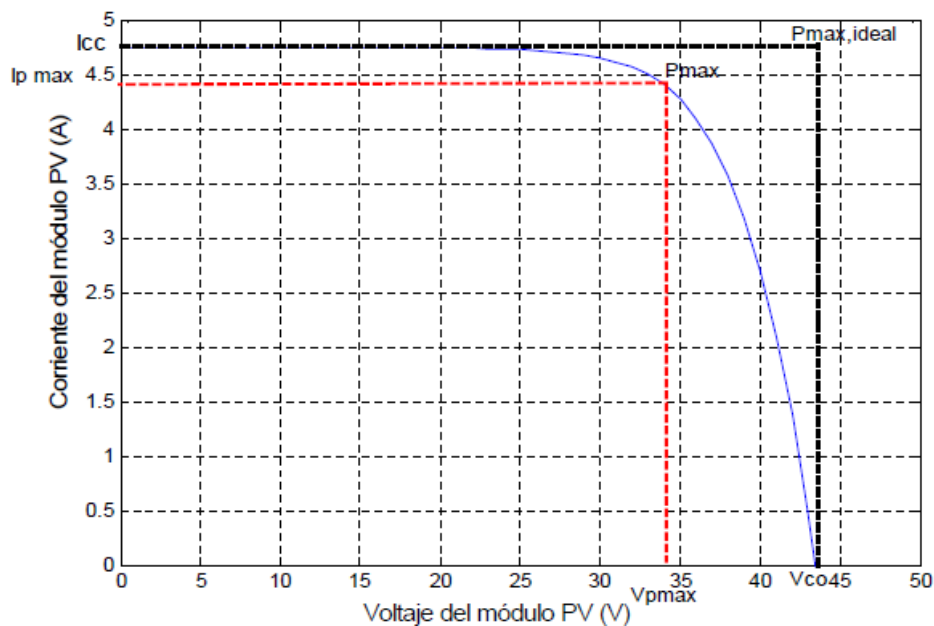


Figura 3. 4: Gráfica de la potencia máxima ideal y la potencia práctica.
Elaborado por: Autor

Para aumentar el voltaje de funcionamiento, las celdas fotovoltaicas se deben conectar en serie. Las celdas fotovoltaicas son frágiles (romperse y corrosión) para lo cual requiere protección de su entorno y generalmente están encapsuladas bajo vidrio. Todo se llama módulo fotovoltaico.

Los módulos también se pueden conectar en serie y en paralelo para construir el módulo fotovoltaico con el fin de aumentar el voltaje y la intensidad de corriente. Sin embargo, es importante tomar algunas precauciones porque la existencia de celdas menos eficientes y la oclusión de una o más celdas (por sombras, polvo, etc.), pueden dañar las celdas de forma permanente.

Las principales ecuaciones utilizadas en el modelo matemático del módulo son las siguientes [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_M = n_p I \\ I_{ccM} = n_p I_{cc} \\ V_M = n_s V \\ V_{coM} = n_s V_{co} \\ I_{sM} = n_p I_s \end{array} \right.$$

donde,

M , es el índice asignado al módulo.

n_s , es el número de celdas en serie.

n_p , es el número de celdas en paralelo.

Lo que da para un módulo:

$$I_M = I_{ccM} - I_{sM} \left[e^{\frac{(V_M + I_M R_{sM})}{n_s n_p V_T}} - 1 \right]$$

donde,

R_{sM} , es la resistencia en serie del módulo fotovoltaico y es igual a

$$R_{sM} = \frac{n_s}{n_p} R_s$$

En circuito abierto y dado que $T = T_{ref}$, entonces la corriente I_{sM} se puede escribir para un módulo de la siguiente manera:

$$I_{sM} = \frac{I_{ccrM}}{e^{\frac{V_{coM}}{n_s n_p V_{tref}}} - 1}$$

donde,

I_{sM} , es la corriente de saturación de referencia del módulo PV.

I_{ccrM} , es la corriente de cortocircuito de referencia del módulo PV.

Para generalizar el modelado para diferentes iluminancias y temperaturas, se utiliza el modelo que mueve la curva de referencia a nuevas posiciones o ubicaciones. El nuevo valor de la corriente de cortocircuito I_{ccM} del módulo para una irradiación G dada y una temperatura T dada se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{ccM}(G, T) = I_{ccrM} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})]$$

La corriente de saturación depende de la I_{sM} de la temperatura. Su valor para una temperatura dada T se calcula mediante:

$$I_{SM}(T) = I_{srM} T_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left(-\frac{qE_g}{nk} \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}$$

Para realizar esta simulación, fue elegido el módulo de energía solar fotovoltaica BP-SX-150S. La serie SX proporciona energía fotovoltaica rentable para uso general operando directamente cargas de corriente continua o cargas de corriente alterna en sistemas equipados con inversores. El generador elegido está compuesto por 8 módulos conectados en serie y 7 módulos conectados en paralelo. Las características o parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del módulo fotovoltaico en MatLab.

Potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	150 W
Voltaje a $P_{m\acute{a}x}$ ($V_{P_{m\acute{a}x}}$)	34.5 V
Corriente a $P_{m\acute{a}x}$ ($I_{P_{m\acute{a}x}}$)	4.35 A
Voltaje de circuito abierto (V_{CO})	43.5 V
Corriente de cortocircuito de referencia (I_{CCr})	4.75 A
Coeficiente de temperatura para V_{CO}	-160±20 mV/°C
Coeficiente de temperatura de $I_{CC}(a)$	0.065±0.015% / °C
Coeficiente de temperatura para la potencia	-0.5±0.05% °C
Temperatura nominal de operación de celda PV	47±2 °C

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.5 se muestra la curva característica corriente-voltaje que describe el comportamiento del generador fotovoltaico bajo la influencia de condiciones meteorológicas específicas (nivel de iluminación $G=1000 \text{ W/m}^2$ y temperatura ambiente $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

La curva característica $I(V)$ del módulo fotovoltaico pasa por tres puntos importantes que son:

- La corriente de cortocircuito I_{ccM} en C.
- El voltaje de circuito abierto V_{coM} en S.
- La potencia máxima $P_{m\acute{a}x}$ en M.

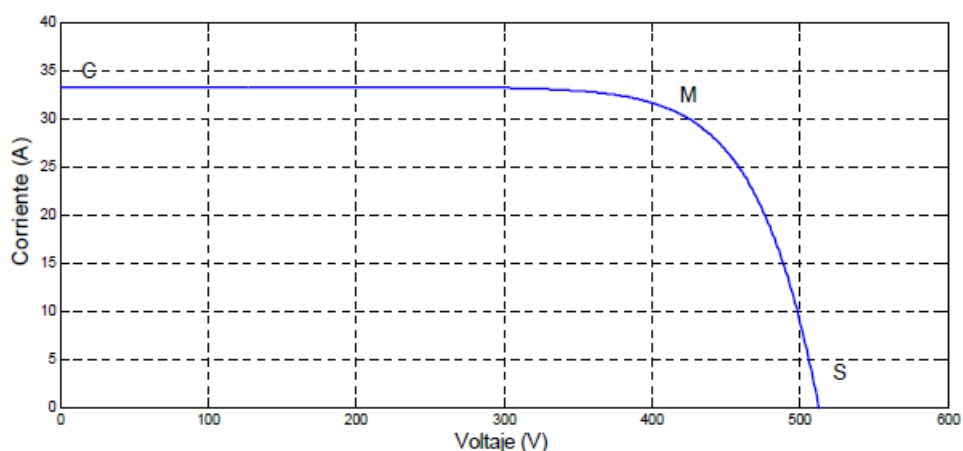


Figura 3. 5: Curva característica I-V de un generador fotovoltaico.
Elaborado por: Autor.

Es difícil dar un signo a la fuente de corriente o voltaje de un generador fotovoltaico en toda la extensión de la característica corriente-voltaje. En consecuencia, el generador fotovoltaico se considera como una fuente de energía con un punto $P_{m\acute{a}x}$ donde la potencia es máxima. Por tanto, es interesante aprovechar este punto para obtener la máxima cantidad de energía y así aprovechar al máximo la potencia pico instalada. Es importante destacar que algunos reguladores solares realizan una adaptación de impedancia para que en todo momento se esté cerca de este punto de potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$).

Por su constitución, un generador fotovoltaico tendrá un comportamiento más o menos optimizado y, por tanto, podrá producir más o menos energía. Se puede notar que la característica I-V de un panel fotovoltaico depende en gran medida de la insolación y la temperatura. Esto se hace muy evidente al evaluar la ecuación corriente $I_{ccM}(G, T)$ para valores seleccionados de temperatura e insolación y mostrar los resultados.

Una disminución de la luz solar provoca una disminución en la creación de pares de agujeros de electrones con un cambio de corriente en la oscuridad. Siendo la corriente del panel solar igual a la sustracción de la

fotocorriente y la corriente del diodo en la oscuridad, hay una disminución en la corriente solar I_{ccM} proporcional a la variación de la luz solar acompañada de una disminución muy leve en el voltaje V_{coM} y por lo tanto un desplazamiento del punto $P_{máx}$ del panel solar hacia las potencias inferiores.

Las figuras 3.6 y 3.7 muestran las gráficas que representan las características P-V e I-V, respectivamente de un generador fotovoltaico para una temperatura constante ($T=25\text{ °C}$) y una insolación variable.

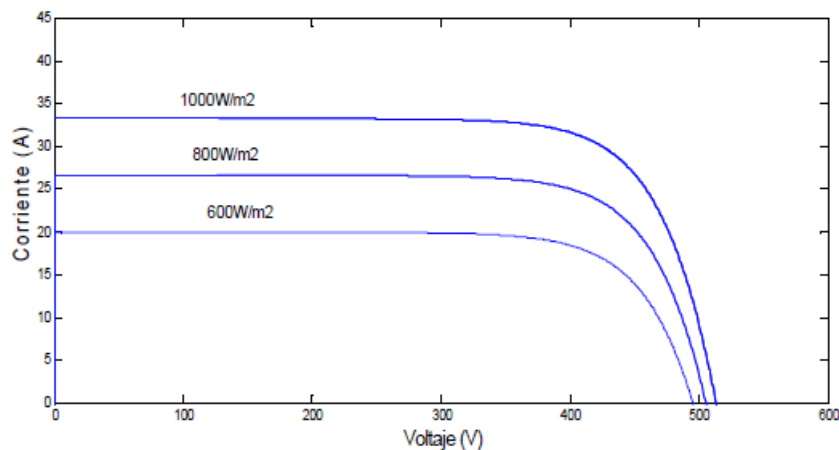


Figura 3. 6: Curvas I-V de un panel con distintos niveles de luz solar a $T=25\text{ °C}$.
Elaborado por: Autor.

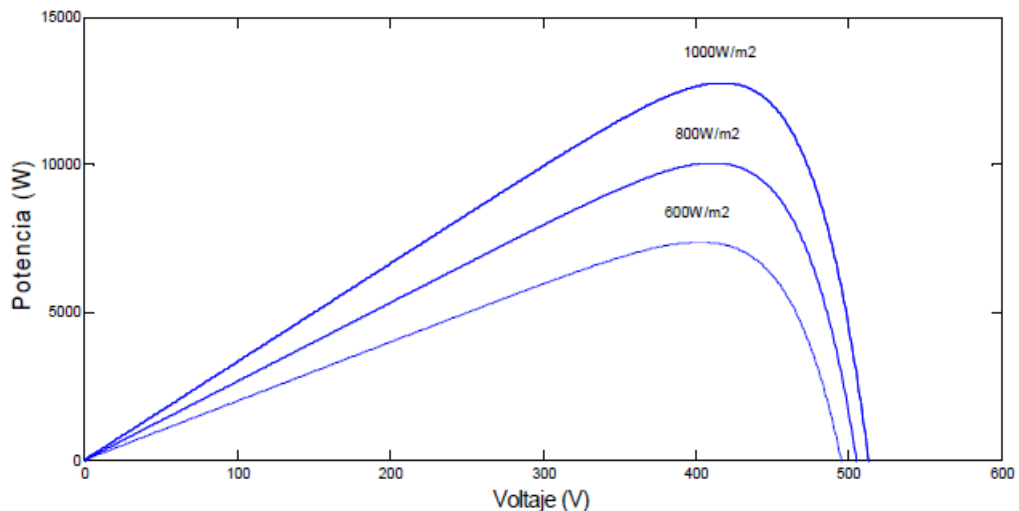


Figura 3. 7: Curvas P-V de un panel con distintos niveles de luz solar a $T=25\text{ °C}$.
Elaborado por: Autor.

Está claro que el valor de la corriente de cortocircuito es directamente proporcional a la intensidad de la radiación. Por otro lado, el voltaje de

circuito abierto no varía en las mismas proporciones, pero permanece casi idéntico incluso con poca iluminación. Por tanto, esto implica que:

- a. La potencia óptima de la celda ($P_{m\acute{a}x}$) es prácticamente proporcional a la iluminación.
- b. Los puntos de máxima potencia están aproximadamente al mismo voltaje.

Puede verse que la corriente suministrada por cada celda depende de la temperatura interna de la unión PN que constituye la celda fotovoltaica. Si se considera el calentamiento de un módulo fotovoltaico de 25 °C a 50 °C y si se considera como una primera aproximación que la temperatura de la cara posterior de cada celda es cercana a la temperatura de la unión PN, entonces se debe considerar la influencia de la temperatura. Puede verse que el voltaje en circuito abierto disminuye en función de un aumento de temperatura. En consecuencia, se pierde la energía disponible en los terminales del módulo fotovoltaico.

Las figuras 3.8 y 3.9 muestran las curvas I-V y P-V para diferentes temperaturas de funcionamiento del módulo fotovoltaico con irradiación constante. Se observa que la temperatura tiene una influencia insignificante sobre el valor de la corriente de cortocircuito. Por otro lado, el voltaje de circuito abierto cae bastante cuando aumenta la temperatura. Por lo tanto, se deduce que el panel puede proporcionar un voltaje correcto, incluso con poca luz, por lo que la potencia extraíble disminuye. Al dimensionar una instalación, se debe tener en cuenta la variación en la temperatura del sitio. Es importante saber que la potencia del panel disminuye aproximadamente un 0,5% por cada grado en que la temperatura de la celda aumenta por encima de los 25 ° C.

Por último, es importante señalar que cuando la iluminación es inferior a 100 W/m², el voltaje del panel a su vez varía. Disminuye con la iluminación (variación logarítmica). Solo las células solares de silicio amorfo permiten el funcionamiento en estas condiciones, gracias a un voltaje todavía bastante alto. Es por esta razón que el silicio amorfo se puede utilizar bajo iluminación

artificial, a diferencia del silicio cristalino. Esto contribuirá mucho en nuestra elección de células.

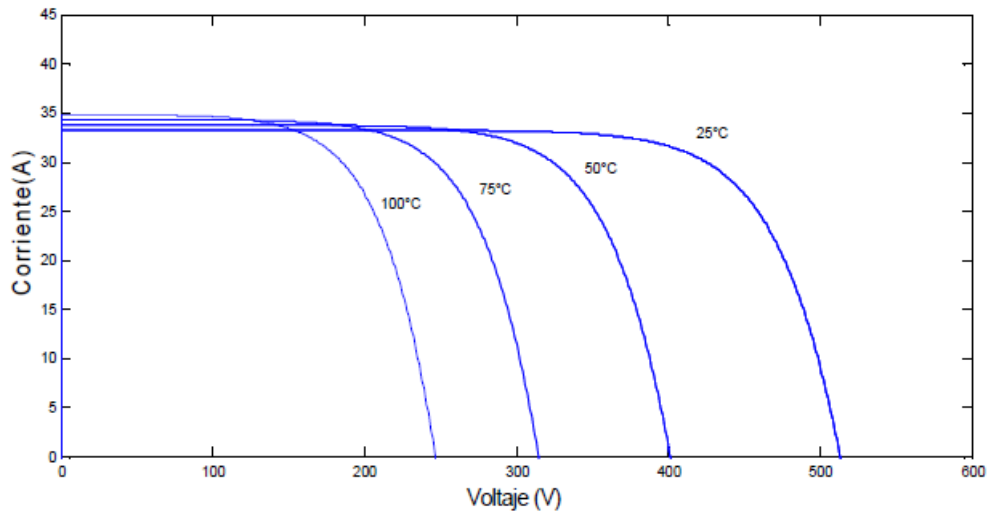


Figura 3. 8: Curvas I-V de un generador fotovoltaico para diferentes temperaturas a $G=1000\text{W/m}^2$.
Elaborado por: Autor.

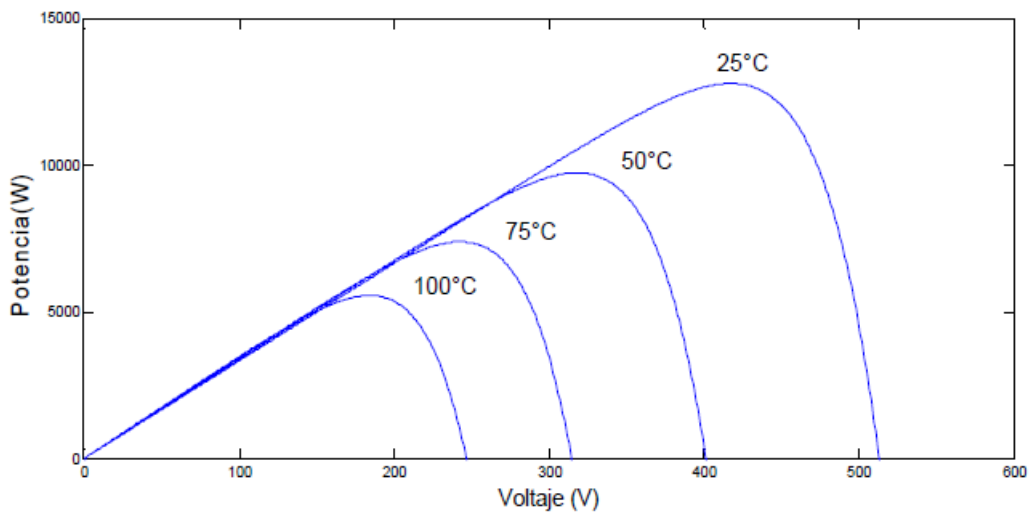


Figura 3. 9: Curvas P-V de un generador fotovoltaico para diferentes temperaturas a $G=1000\text{W/m}^2$.
Elaborado por: Autor.

El problema persiste cuando se montan celdas solares en serie o en paralelo para generar suficiente voltaje o corriente para el funcionamiento del sistema. De hecho, cuando una o más celdas están sombreadas por cualquier objeto o cuando hay fallas en algunas, estas celdas se convierten en consumidores de energía y no en generadores, lo que provoca pérdidas de energía.

Para remediar este problema, se deben tomar algunas celdas vecinas y se las pasa por un diodo en paralelo llamado "diodo de derivación". Estos diodos evitarán que la corriente pase a través de estas celdas cuando su voltaje caiga por debajo del voltaje umbral del diodo. También se coloca un diodo en serie con el panel para evitar el retorno de corriente de otros paneles montados en paralelo cuando un panel está poco soleado.

Conclusiones.

- La energía solar fotovoltaica es la conversión directa de una parte de la radiación solar en energía eléctrica. Esta conversión de energía la realiza la celda fotovoltaica basándose en un fenómeno físico llamado efecto fotovoltaico. El voltaje generado puede variar en función del material utilizado para fabricar la celda. La combinación de varias celdas en serie y/o en paralelo da lugar a un módulo fotovoltaico que tiene una característica corriente-voltaje no lineal con un punto de máxima potencia.
- El rendimiento de un módulo fotovoltaico está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas, especialmente la irradiación solar y la temperatura del módulo. Se optó por el modelo de diodo único para simular el funcionamiento del módulo fotovoltaico para diferentes condiciones de irradiación y temperatura. La principal ventaja de este modelo es su sencillez y facilidad de aplicación a partir de las especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Recomendaciones.

- Implementación de reguladores MPPT en módulos solares fotovoltaicos utilizando MatLab/Simulink.
- Implementación de sistemas de control inteligente para optimizar la tensión y corriente en paneles solares fotovoltaicos.

Bibliografía.

- Al-Najideen, M. I., & Alwashdeh, S. S. (2017). Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering-Mu'tah University in Jordan. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.04.005>
- Borgstein, E. H., Lamberts, R., & Hensen, J. L. M. (2016). Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. *Energy and Buildings*, 128, 734–755. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018>
- Díaz de Corcuera Urretavizcaya, I. (2020). *Detección de defectos eléctricos en células solares embebidas en módulos fotovoltaicos*. <https://doi.org/10/47008>
- Freris, L. L., & Infield, D. G. (2008). *Renewable energy in power systems*. John Wiley & Sons.
- Panos, E., Densing, M., & Volkart, K. (2016). Access to electricity in the World Energy Council's global energy scenarios: An outlook for developing regions until 2030. *Energy Strategy Reviews*, 9, 28–49. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.11.003>
- Roberts, A., Thomas, B., Sewell, P., Khan, Z., Balmain, S., & Gillman, J. (2016). Current tidal power technologies and their suitability for applications in coastal and marine areas. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2(2), 227–245. <https://doi.org/10.1007/s40722-016-0044-8>
- Sarmiento Rivera, J. D., & Valarezo Borrero, J. I. (2014). *Influencia de la operación del parque eólico Villonaco en la calidad de energía eléctrica de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.* <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7101>
- Vega Rojas, L. E. S. (2019). *Diseño de un sistema fotovoltaico conectado a red de 3,7 kw para el laboratorio de Electricidad y Máquinas Eléctricas*

de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3942>

Xu, C., & Qian, D. (2015). Governor Design for a Hydropower Plant with an Upstream Surge Tank by GA-Based Fuzzy Reduced-Order Sliding Mode. *Energies*, 8(12), 13442–13457.
<https://doi.org/10.3390/en81212376>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Baque Manzo, María Luisa** con C.C: # 091450950-0 autor del Trabajo de Titulación: **MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO MATLAB** 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, 20 de septiembre de 2021

f. _____

Nombre: Baque Manzo, María Luisa

C.C: 091450950-0

REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab		
AUTOR(ES)	Baque Manzo, María Luisa		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico Mecánica		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	20 de septiembre del 2021	No. DE PÁGINAS:	32
ÁREAS TEMÁTICAS:	Electrónica de Circuitos, Energías Renovables		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Energías, Renovable, Fotovoltaica, Semiconductores, Módulos, Modelado.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>En el presente documento se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado Modelado matemático y simulación de un sistema de celdas fotovoltaicas utilizando MatLab. En el capítulo 1, se describe brevemente una introducción de las energías renovables, objetivo general y específicos del componente práctico. En el capítulo 2, se describe los fundamentos teóricos de las fuentes de energías renovables (solar, hidroeléctrica, eólica y mareomotriz) y específicamente de la energía solar fotovoltaica. Se presenta una introducción del modelado matemático de paneles fotovoltaicos utilizando el análisis de circuitos eléctricos y sobre el dimensionamiento de módulos fotovoltaicos (conexiones en serie, paralelo y mixta). En el capítulo 3, se desarrolla la parte práctica del examen complejo utilizando la plataforma de simulación MatLab. Se utiliza el principio físico de los semiconductores (diodo) abordado en Electrónica I y que sirve como modelado matemático de las celdas fotovoltaicas. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos en el entorno de simulación MatLab.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-63646939	E-mail: mlbaquem@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@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):			