

**IMPORTANCIA DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PANELES SOLARES
FOTOVOLTAICOS EN SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA PARA DISTRITOS DE
RIEGO CONVENCIONALES**

RUBY ELIZABETH DIAZ BRAVO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONOMICA
SAN JUAN DE PASTO**

2017

**IMPORTANCIA DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PANELES SOLARES
FOTOVOLTAICOS EN SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA PARA DISTRITOS DE
RIEGO CONVENCIONALES**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de ingeniero
agrónomo**

RUBY ELIZABETH DIAZ BRAVO

Presidente de monografía

MSc. MARIO ALBERTO JURADO ERASO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONOMICA

SAN JUAN DE PASTO

2017

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 2. OBJETIVOS..... | 9 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 9 |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 9 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 10 |
| 4. JUSTIFICACIÓN..... | 12 |
| 5. ANTECEDENTES..... | 15 |
| 6. MARCO REFERENCIAL..... | 20 |
| 7. METODOLOGIA..... | 45 |
| 8. DESARROLLO DEL TEMA..... | 46 |
| 9. CONCLUSIONES..... | 50 |
| 10. RECOMENDACIONES..... | 51 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 52 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de irradiación promedio en varias zonas del país (UNEF, 2016)..... | 17 |
| Tabla 2. Promedio Brillo solar en las estaciones meteorológicas en Nariño (Orbes & Vallejo, 2013a) | 19 |
| Tabla 3. Componentes de un panel fotovoltaico (Solis, 2012) | 22 |
| <i>Tabla 4. Ventajas y desventajas de dos tipos de paneles fotovoltaicos</i> (Giraudy, Massipe, Rodriguez, Gámez, & Vásquez, 2014). | 23 |
| Tabla 5. Factores que se deben calcular para la utilización de la energía fotovoltaica | 24 |
| Tabla 6. Grados de inclinación de un panel en función a su latitud (Guevara & Pérez, 2015). ... | 25 |
| Tabla 7. Modelos matemáticos para la simulación de sistemas fotovoltaicos..... | 27 |
| Tabla 8. Ficha técnica de un panel solar de Silicio poli cristalino de 250 W (STC) (Granda et al., 2013) | 31 |
| Tabla 9. Comparación del sistema de bombeo fotovoltaico con los sistemas convencionales (Aqueveque, 2009)..... | 39 |
| Tabla 10. Características de las bombas fotovoltaicas (Barrio, 2016)..... | 40 |
| Tabla 11. Principales tipos de baterías (Gutierrez, 2002). | 43 |

LISTA DE SIGLAS

A: Amperio

CA: Corriente Alterna

CD: Corriente Directa

CORPONARIÑO:

FER: Fuentes de energía renovables

FV: Fotovoltaica

GW: Gigavoltios

IPSE: Institución gubernamental adscrita al Ministerio de Minas y Energía

MA: Masa de aire

MG: Megavoltios

TW: Teravoltios

UPA: Unidades Productoras Agropecuarias

UPME: Unidad De Planeación Minero Energético

V: Voltio

ZNI: Zonas no interconectadas

LISTA DE IMÁGENES

| | |
|--|----|
| Imagen 1. Estructura de un panel solar fotovoltaico (<i>Solis, 2012</i>) | 21 |
| Imagen 2. Curva voltaje – corriente y voltaje – potencia de una celda solar (Granda et al., 2013) | 28 |
| Imagen 3. Modelo esquematizado de una celda (o panel solar) en Matlab/Simulink (Granda et al., 2013) | 32 |
| Imagen 4. Diagrama a bloques para la simulación de una celda o panel solar mediante la resolución de su modelo matemático (Granda et al., 2013)..... | 32 |
| Imagen 5. Curva característica voltaje-corriente (arriba) y voltaje -potencia (abajo)(Granda et al., 2013) | 33 |
| Imagen 6. Curva de voltaje – potencia para una celda solar con variación en la temperatura (Granda et al., 2013) | 34 |
| Imagen 7. Curva de voltaje – corriente para una celda solar con variación en la irradiación solar (Granda et al., 2013) | 35 |
| Imagen 8. Curva voltaje – corriente proporcionada por el fabricante (Granda et al., 2013) | 35 |
| Imagen 9. Curva de voltaje- potencia de un panel fotovoltaico con variación en la irradiación solar (Granda et al., 2013)..... | 36 |
| Imagen 10. Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico (Ramos, 2014). | 37 |

1. INTRODUCCIÓN

A razón de la problemática ambiental actual derivada de la elevada contaminación de los sistemas naturales, el hombre se ha encaminado en la búsqueda de nuevas alternativas para sustituir las energías tradicionales, las cuales son producidas a partir de recursos no renovables, como el petróleo. Para lograr un cambio, existen dentro de la naturaleza una gran variedad de energías que se pueden aprovechar sin generar un desequilibrio ecológico; entre estas se encuentran: la energía solar fotovoltaica, eólica, mareomotriz, entre otras (Posso, 2002).

En años recientes, se ha dado un fuerte impulso al aprovechamiento de la energía solar, dado que resulta ser un recurso disponible en cantidad suficiente en la mayor parte del mundo, tiene diferentes tipos de aplicaciones y no requiere instalaciones excesivamente complejas para su uso. La principal forma de aprovechamiento del sol es mediante la transformación directa a energía eléctrica mediante el uso de sistemas fotovoltaicos (Zahedi, 2006)

Así pues, la energía fotovoltaica es aquella que se obtiene por medio de la transformación directa de la energía del sol en energía eléctrica. La transformación es realizada por medio de módulos fotovoltaicos, mejor conocidos como paneles solares, formados por un arreglo de diversas células solares (Robles, 2010). De forma tradicional, los sistemas fotovoltaicos se han utilizado para la iluminación pública o en casas habitación, así como algunos equipos electrodomésticos de bajo consumo eléctrico, sin embargo, en la actualidad existen muchos mecanismos que se alimentan de este tipo de energía, como ejemplo están: los medidores de velocidad en las vías, los calentadores de agua en edificios, los sistemas de bombeo, etc. (Carmona, 2016).

Dentro del contexto, los paneles solares fotovoltaicos se apoyan principalmente en el material del que están fabricados, es decir el Silicio. Este es un elemento que se encuentra en abundancia en la tierra, ya que es extraído de la Sílice que se encuentra en la arena. El Silicio tiene una propiedad indispensable para la producción de electricidad, es un semiconductor que al estar expuesto a la luz libera electrones que a su vez se convierten en energía eléctrica (Solis, 2012).

Gracias a que el Silicio es el segundo elemento más abundante en la tierra, la fabricación de paneles solares ha venido aumentando. Por esta razón, la energía solar fotovoltaica ha tenido un gran auge en el mundo moderno, este tipo de energía renovable tuvo un crecimiento del 50 % en 2017, superando incluso al carbón combustible de origen fósil no renovable (Masson, 2017).

Por esta razón, actualmente se ha optado por utilizar la energía fotovoltaica (FV) en otros campos como es el sector agrícola, enfocándose especialmente en los sistemas de riego. Dicha tecnología se basa en el aprovechamiento de la radiación solar utilizando paneles fotovoltaicos que alimentan directamente un sistema de bombeo de agua para el riego de cultivos (Escobar, 2013). Para optimizar aún más el sistema, existen complementos tales como, las baterías y/o los tanques de almacenamiento de agua, los cuales se utilizan dependiendo de las necesidades de cada usuario.

Por otro lado, para optimizar la utilización de los sistemas fotovoltaicos, son necesarias herramientas informáticas, como por ejemplo, la modelación matemática lo cual va permitir hacer simulaciones del comportamiento, funcionamiento y eficiencia de cualquier proyecto fotovoltaico que se quiera implementar en ciertas zonas y regiones.

Así pues, el objetivo de este trabajo es argumentar acerca de la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos para ser aplicados en sistemas de bombeo para distritos de riego convencionales. Esto con el fin de transmitir conocimiento acerca del funcionamiento y aprovechamiento de la energía fotovoltaica, además, resaltar como es que este tipo de energía renovable se adapta de una manera extraordinaria a los sistemas agrícolas, en especial en el bombeo de agua para riego.

Entonces, gracias a este tipo de software se ha podido demostrar que los paneles solares fotovoltaicos funcionan de manera eficaz bajo las condiciones de irradiación que se presentan en Colombia, por lo tanto, Nariño también posee esas condiciones. De ahí que un sistema de bombeo fotovoltaico es viable para ser adoptado en las zonas más cálidas de la región. En definitiva, la utilización de energías renovables como la solar, aporta al desarrollo agrícola, a mantener un equilibrio climático y ayuda a que las poblaciones más aisladas tengan una mejor calidad de vida

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Discutir la importancia de la modelación matemática de paneles solares fotovoltaicos para ser aplicados a un sistema de bombeo de agua para un distrito de riego convencional

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer las características de los diferentes tipos de paneles solares (monocristalinos y policristalinos) que pueden ser utilizados en un sistema de bombeo fotovoltaico.
- Reconocer algunos de los métodos de modelación matemática aplicados para la simulación de paneles solares

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de energía en los espacios rurales se relaciona con el consumo de combustibles fósiles empleados en maquinaria, equipos agrícolas y como insumo doméstico en la cocción de alimentos. Estas aplicaciones basadas en la utilización de recursos naturales representan factores de riesgo ambiental y de salud, como la contaminación atmosférica o calentamiento global, debido al aumento del dióxido de carbono, uno de los gases responsables del efecto invernadero. Con el calentamiento global, los sectores rurales se verán seriamente afectados en la agricultura por la evaporación de agua de la superficie de la tierra y el aumento de lluvias e inundaciones (Ladino, 2011).

Muchos campesinos no cuentan con un servicio de acueducto, por lo que la extracción de agua para consumo y para regar sus cultivos se debe hacer con la ayuda de maquinaria, como son los sistemas de bombeo. Además, este tipo de maquinarias llevan al agricultor a la compra de combustibles fósiles los cuales aparte de que tiene un costo elevado también son altamente contaminantes, de igual manera se fundamenta en el consumo de leña para la cocción de los alimentos, de acuerdo con (FAO, 2011) estas prácticas contribuyen a la reducción de recursos estratégicos como bosques, biodiversidad, aguas y suelos.

Por otro lado, la falta de energía eléctrica dentro del territorio rural repercute de manera negativa en las condiciones de calidad de vida de los habitantes de estas zonas e igualmente dificulta el desarrollo de las actividades domésticas y la productividad agropecuaria, labores que influyen en el desarrollo rural (Ladino, 2011). Cabe mencionar que, en la actualidad muchas personas dependen del fluido eléctrico para el funcionamiento de aparatos tecnológicos como celulares, televisores, neveras, etc; los cuales se han convertido en elementos fundamentales para los habitantes de las zonas rurales.

En Colombia, solo el 77,7 % de la población rural cuenta con el servicio de energía eléctrica, lo cual expone que existe un 22,3 % de la población sin el servicio (DANE, 2005). Esto da pie para analizar la posibilidad de introducir y desarrollar las energías renovables para zonas alejadas o no interconectadas, esta energía es un soporte en las labores domésticas, productivas y comerciales de la población campesina (Campen & G. Best, 2010).

Teniendo en cuenta lo mencionado, se puede decir que la energía eléctrica actualmente es indispensable y que no se justifica que zonas rurales carezcan de este servicio. Por esta razón es importante resaltar como a través de la modelación matemática se hace posible simular la eficacia de paneles solares aplicados a un sistema de riego. Esto se hace posible gracias al uso de diferente software, los cuales arrojan resultados de la cantidad de energía que puede generar un panel solar según el porcentaje de irradiación que una zona o región del país posea. Gracias a esto, se pueden llevar a cabo proyectos de energía fotovoltaica para contribuir a la prestación de un servicio indispensable como es el agua potable y la energía eléctrica a las familias de los sectores rurales más aislados.

4. JUSTIFICACIÓN

La agricultura es uno de los sectores que actualmente ha dado pie para la creación de infinidad de paquetes tecnológicos para el desarrollo óptimo de los cultivos. Dentro de las creaciones innovadoras se encuentra la modelación matemática, la cual a través de los años se ha venido aplicando en diferentes situaciones, y hoy en día su uso en la agricultura no es la excepción. Entrando en contexto, los modelos matemáticos se caracterizan por una suficiente generalidad, describiendo una clase completa de objetos o fenómenos (Tello & Peña, 2013). Por otra parte, la creación de modelos matemáticos no requiere significativos gastos materiales y la realización del propio proceso de modelación con ayuda de los modernos medios de cómputo permite obtener resultados en un tiempo relativamente pequeño (Ulloa & Rodríguez, 2013)

Así mismo, la aplicación de modelos matemáticos no es algo nuevo, esta ciencia tubo su periodo fecundo entre los siglos XVI y XVII, periodo en el que las relaciones entre las matemáticas y el entorno estaban en correspondencia, de tal manera que las matemáticas traducen la naturaleza y esta obedece a leyes matemáticas (Ochoa y Mesa, 2011). Es así como una mirada al conocimiento matemático producido en esa época, implica a su vez, un análisis del contexto en la época actual (Rengifo, 2008). Por tal motivo, la aplicación de modelos matemáticos es importante en la solución de problemas de la vida cotidiana; hoy en día es común e indispensable el uso de esta ciencia para tratar conflictos en la salud, medio ambiente, agricultura, sociología, etc.

De esta manera, la modelación matemática se aplica en muchas situaciones, por ejemplo, existen modelos que permiten pronosticar la calidad del aire en las ciudades, una vez hecha la predicción, se transfiere dicha información a la ciudadanía a través de novedosos sistemas de comunicación, que se convierten en paneles informativos en la calle o en internet (Tello & Peña, 2013). Cabe mencionar otros ejemplos, como el modelo apropiado para simular los cambios morfológicos, inducidos por eventos naturales o acciones antrópicas, en ríos aluviales caracterizados por regímenes de flujo suscritico y lecho de sedimentos relativamente uniformes (Basile, 2000).

Así, la modelación matemática presta grandes servicios a la ingeniería agronómica, puesto que al momento de diseñar un proyecto como un distrito de riego fotovoltaico, cualquier tipo de software que se utilice permitirá hacer estudios previos para poder simular el funcionamiento de tal sistema (Gálvez et al., 2010). Gracias a esto, se reducirán costos al prevenir cualquier tipo de inconveniente que pueda presentarse en el transcurso del proyecto.

Por esta razón, la modelación matemática ha pasado de ser una ciencia de escasa potencia informática a una ciencia altamente calificada y soportada por herramientas de desarrollo y Software de programación. Esta herramienta se ha desarrollado con el conocimiento científico de la matemática, la física, la química y la agronomía (Islas y Quezada, 2013).

Así mismo, la simulación matemática permite hacer un análisis para solucionar problemas ambientales que son producidos por las actividades inadecuadas en la agricultura, con el fin de obtener nuevas alternativas en las labores que llevan a cabo los agricultores en el desarrollo de sus cultivos, se ha optado por innovar en algunas prácticas; dentro de los factores que pueden ser modificados para el cuidado del medio ambiente y de la economía del productor se encuentran, el aprovechamiento de energías alternativas, las cuales se pueden adaptar ya sea a los distritos de riego o para la energía de uso domiciliario (FAO, 2015) .

En los sistemas de riego, el uso de la energía fotovoltaica se hace aplicándola en el sistema de bombeo de agua, debido a que el bombeo convencional de este recurso en la agricultura se basa en la energía de un fluido eléctrico o energía producida por motores a combustión (ABB, 2015). El objetivo de esto es ayudar a los agricultores de zonas aisladas, donde no hay acceso al fluido de una red eléctrica, por tal razón la única alternativa de estos agricultores es el uso de diésel o combustibles para accionar sus sistemas de bombeo. Esto causa un impacto ambiental negativo debido a la emisiones de dióxido de carbono emitidos a la atmosfera, además, la economía del agricultor es afectada debido a los altos costos y escasez de los combustibles (Ladino, 2011).

Gracias a la simulación que se realiza a partir de los modelos matemáticos, se puede demostrar la eficiencia de la aplicación de energías fotovoltaicas en sistemas de riego convencionales, esto con el fin de motivar al sector agrícola, indicando que es posible reducir el impacto ambiental y alejarse de la energía proveniente de combustibles fósiles (ANES, 2013).

Dadas las condiciones geográficas de Colombia, este es un país apto para explotar las llamadas energías renovables, principalmente la fotovoltaica, puesto que es una de las energías que mejor se adapta en cualquier departamento del país. A través de la implementación de esta energía lo que se busca es ayudar a la comunidad agrícola, para hacer un cambio favorable ya sea de tipo ambiental o tecnológico (Montero et al., 2017).

5. ANTECEDENTES

En los últimos años la energía fotovoltaica ha tenido un gran auge en el mundo moderno, esta fuente de energía renovable obtenida a partir de la radiación solar tuvo un crecimiento del 50 % en 2017, superando incluso al carbón combustible de origen fósil no renovable (UPME, 2017)

Según el informe anual de la Agencia Internacional de Energía (IEA), China fue el gran impulsor en la expansión global de la energía solar en el planeta, después de Estados Unidos y la India. Según cifras, se estima que dos tercios de la nueva capacidad de energía neta creada en el mundo son renovables, es decir, 165 gigavatios (GW) corresponden a energía limpia, los pronósticos apuntan a que la tendencia continuará en 2018 y se estima que para 2022 las energías renovables crezcan en aproximadamente 1000 gigavatios (GW) (IEA, 2017). Cabe anotar que la fuente de energía solar más desarrollada es la fotovoltaica, según estudios, esta fuente de energía podría suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial para 2030 (UPME, 2017).

Gracias a la versatilidad de la tecnología fotovoltaica y la importante disminución de los costes en la fabricación de los paneles solares, el sector fotovoltaico se ha convertido en un sector competitivo que demuestra, una vez más, que se adapta a las condiciones particulares de cualquier país (Sawin et al., 2016). Así pues, se espera que la electricidad proveniente de fuentes renovables crezca en más de un tercio para 2022 a más de 8,000 TWh, lo que es equivalente al consumo total de energía de China, India y Alemania. Para entonces, las energías renovables representarán el 30% de la generación de energía, frente al 24% en 2016 (IEA, 2017).

Por ejemplo, Corea, Australia, Tailandia, Malasia, Filipinas y Taiwán son ahora los mercados establecidos de energía fotovoltaica. Muchos otros también están mostrando signos de posible desarrollo rápido de esta energía en los próximos años, como Vietnam e Indonesia (Sawin et al., 2016). Por otra parte, India podría convertirse en uno de los líderes mundiales del mercado de energía fotovoltaica en los próximos años (UPME, 2015). Así mismo, Pakistán parece prometedor con varios cientos de MW instalados. El continente africano y Oriente Medio representaron juntos cerca de 1 GW. En el caso del viejo continente, Europa, con alrededor de 8 GW instalados, el mercado vuelve a crecer, tras varios años de decrecimiento, gracias al mercado

de Reino Unido con 3,5 GW instalados, al que le sigue Alemania con 1,5 GW y Francia 0,9 GW (Sawin et al., 2016). Por esta razón, las fuentes de energía renovables en especial la fotovoltaica representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años (Abella, 2011).

En los marcos de las observaciones anteriores, se puede mencionar a Colombia, que es un país que tiene un potencial energético solar a lo largo de todo el territorio nacional, pues cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m² /d (UPME - IDEAM, 2005), la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m² /d, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m² /d) país que hace mayor uso de la energía solar FV a nivel mundial, con aproximadamente 36 GW de capacidad instalada en 2013 (UPME, 2015).

Si bien, hay países como África, medio oriente o Australia que superan, en términos generales los recursos de sur América, también se puede destacar que Latinoamérica posee buenos niveles de irradiación solar, y en el caso de Colombia y los países ecuatoriales se cuenta con la ventaja de tener disponibilidad del recurso a lo largo de todo el año al no experimentar el fenómeno de las estaciones (Checa & De La Cruz, 2012).

De acuerdo con el Atlas de radiación solar de la UPME, regiones del país como son La Guajira, una buena parte de la Costa Atlántica y otras regiones específicas en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, entre otros, presentan niveles de radiación por encima del promedio nacional que pueden llegar al orden de los 6,0 kWh/m² /d, recurso comparable con algunas de las regiones con mejor recurso en el mundo como es el caso del desierto de Atacama en Chile o los estados de Arizona y Nuevo México en Estados Unidos (UPME, 2015). En la tabla 1 se observa los niveles de irradiación solar en algunas zonas del país.

Tabla 1. Valores de irradiación promedio en varias zonas del país (UNEF, 2016).

| Región | Promedio irradiación (kWh/m ² /día) |
|------------------------|--|
| Guajira | 6.0 |
| Costa Atlántica | 5.0 |
| Orinoquia | 4.5 |
| Amazonia | 4.2 |
| Región Andina | 4.5 |
| Costa Pacífica | 3.5 |

Así pues, la energía solar FV es un nicho de oportunidad con potencial para brindar beneficios importantes al sector energético nacional. Primero que todo está los costos decrecientes de la tecnología, en especial de los módulos o celdas solares fotovoltaicas, que han llevado a que el costo nivelado de la energía solar FV hoy en día resulte competitivo en algunos casos con las tarifas del mercado minorista de energía eléctrica, especialmente a niveles comercial y residencial. Por otra parte, a través de la implementación y masificación de pequeños sistemas de autogeneración distribuida se pueden lograr impactos positivos, como son el permitir a los usuarios generar su propia energía, reduciendo así el riesgo de estar sometidos a cierta volatilidad y usuales incrementos en los costos de electricidad (Corpoema, 2010).

Finalmente, a través de la promoción de esquemas de autogeneración a pequeña escala, que se facilitan gracias a la versatilidad en materia de modularidad y fácil instalación de la tecnología solar FV, siendo esta una tecnología accesible, al menos a aquel público que hoy en día paga las más altas tarifas de energía en el país, se podrá empezar a dar lo que hoy se conoce como la democratización del mercado de energía, en la medida en que los usuarios entrarían a participar activamente del mismo con la posibilidad de convertirse en productores y eventualmente, en vendedores de excedentes a su comercializador o a terceros interesados en su consumo (MEISTER, 2013).

Habría que decir también, que en el departamento de Nariño, se cuentan con condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía fotovoltaica. La Universidad de Nariño y entidades como CORPONARIÑO, la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) y a la

Institución Gubernamental adscrita al Ministerio de Minas y energía (IPSE) son instituciones y organizaciones pioneras en la realización de proyectos relacionados al uso de la energía solar (Checa & De La Cruz, 2012)

Cabe mencionar, que la generación de energía eléctrica en el departamento de Nariño se realiza principalmente por hidroeléctricas ubicadas en los ríos Mayo, Bobo, Sapuyes, Julio Bravo e Ingenio. Juntas generan un total de 27,1 mega voltios (MW) que representan el 18% del consumo total del departamento (Orbes & Vallejo, 2013). No obstante, Nariño cuenta con las características geográficas, el amplio sector agrícola y la biodiversidad lo cual hace que se identifique como una región con altas probabilidades de potencial en fuentes de energías renovables (Murcia, 2009).

Por ende, la aplicación de sistemas fotovoltaicos es una alternativa que ayudara a aprovechar estos recursos para la generación de energía eléctrica. Todo esto, con el fin de ayudar a que muchas familias puedan tener una mejor condición de vida, brindándoles un fácil acceso a la electricidad, y también contribuir en la tecnificación de sus labores agrícolas. (Toledo, 2013).

Por esta razón, la Universidad de Nariño y Corponariño, realizaron en 2007 un estudio en el cual buscaron información biofísica y socioeconómica de los páramos en Nariño, este estudio se hizo en diferentes subregiones del departamento (Subregión Rio Mayo, Subregión Centro y Occidente y la Subregión ex provincia de Obando y Sabana); uno de los agentes a estudio en estas zonas fue el brillo solar (Orbes & Vallejo, 2013). Como resultado del estudio se obtuvieron buenos niveles de brillo solar en estas subregiones, lo cual, confirma que el departamento de Nariño cuenta con condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía fotovoltaica.

A continuación se indica en la tabla 2, el nivel de brillo solar en cada una de las estaciones meteorológicas que corresponden a las subregiones donde se hizo el estudio. Se pudo observar que existe un promedio de aproximadamente 4 horas de brillo solar al día, nivel suficiente para que un panel solar pueda generar energía eléctrica.

Tabla 2. Promedio Brillo solar en las estaciones meteorológicas en Nariño (Orbes & Vallejo, 2013a)

| SUBREGIÓN | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | ESTACIÓN METEOROLÓGICA | PROMEDIO DIARIO DE BRILLO SOLAR (HORAS) |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------|---|
| Rio mayo | Bolívar- Cauca | Los milagros | 4.29 |
| | San Bernardo | San Bernardo | 4.12 |
| Centro y Occidente | Aeropuerto Antonio Nariño | Chachagui | 5.48 |
| | Bombona | Consaca | 4.81 |
| | Sindagua | Tangua | 4.06 |
| | Obonuco | Pasto | 3.15 |
| | El Encano | Pasto | 2.48 |
| Ex provincia de Obando y Sabana | Aeropuerto San Luis | Aldana | 4.15 |
| | Monopamba | Puerres | 1.96 |
| | El Paraíso | Tuquerres | 3.59 |

6. MARCO REFERENCIAL

La vida en la tierra es posible gracias a dos recursos sumamente importantes, el Sol y el Agua, cada uno de estos cumple un papel fundamental para la permanencia de todo ser vivo en el planeta (Domínguez Gómez, 2010). Sin embargo en la actualidad, la población ha crecido de una manera considerable, además la industrialización ha hecho que el recurso como el agua y el suelo sean cada vez más insuficientes, dando como origen a un declive en la producción de alimentos a nivel mundial (Gasca, 2013). De ahí, surge la necesidad de poder aprovechar otro tipo de energías que impacten en menor medida el equilibrio ambiental.

Así pues, una de las alternativas para la generación de energía limpia es el aprovechamiento de la radiación solar, dicha energía llamada fotovoltaica, es una de las más desarrolladas en la actualidad junto con la eólica. Aunque este tipo de energía tuvo su crecimiento años atrás, esta era utilizada con fines netamente científicos (Guevara & Pérez, 2015).

Por esta razón los paneles solares fueron elementos que solo entidades gubernamentales y científicas podían utilizar, de ahí que la energía solar se utilizó con fines prácticos por primera vez en los vehículos espaciales, alimentando los distintos equipos electrónicos que los constituyen. Esto se dio debido a que la fabricación de este tipo de dispositivos era sumamente costosa. Sin embargo, con el paso del tiempo esta tecnología se fue difundiendo más hacia el servicio de la población en general con el fin de solventar las necesidades energéticas que actualmente son el principal problema a nivel mundial (Guevara & Pérez, 2015).

Para que la energía del sol pueda ser aprovechada, existen elementos llamados paneles solares que son los encargados de absorber la radiación solar y transformarla en energía eléctrica, dicho proceso se denomina efecto fotovoltaico (Enseñat et al., 2007). Este efecto se da gracias a que la luz del sol está compuesta por fotones o partículas energéticas, dichas partículas poseen distintas energías, las cuales corresponden a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Al incidir los fotones sobre la célula fotovoltaica, estos pueden ser reflejados o absorbidos; los fotones absorbidos son los que transfieren su energía a los electrones de los átomos de las células solares para ser transformados así en energía eléctrica (Vasconcelos & Aguirre, 2017).

Ampliando sobre el tema, estos dispositivos están hechos principalmente de un material semiconductor como es el silicio. Así pues cuando el panel solar está expuesto a la luz del sol, los electrones del Silicio se agitan de un sentido a otro. Pero para poder obtener una corriente eléctrica debe haber una tensión eléctrica (Martinez, 2013) . Esta tensión se obtiene mediante el dopaje del silicio, esto consiste en agregar Fosforo (n) a la capa del panel expuesta a la luz y a la capa inferior se agrega Boro (p) (Cigales, 2013). Esta operación permitirá obtener de un lado un exceso de electrones (carga negativa) y del otro un déficit de electrones (carga positiva) de esta manera los electrones circulan siempre desde el electrodo negativo hacia el electrodo positivo dando paso finalmente a un flujo de energía eléctrica (Cossu et al., 2017).

En relación con lo anterior, es conveniente mencionar el funcionamiento y composición de los paneles fotovoltaicos de manera más explícita. Un panel solar o módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas sobre una estructura de soporte o marco (ver imagen 1). Además , proporciona en su salida de conexión una tensión continua, y se diseña para valores concretos de tensión (6 V, 12 V, 24 V...) que definirán la tensión a la que va a trabajar el sistema fotovoltaico (Arencibia, 2016).

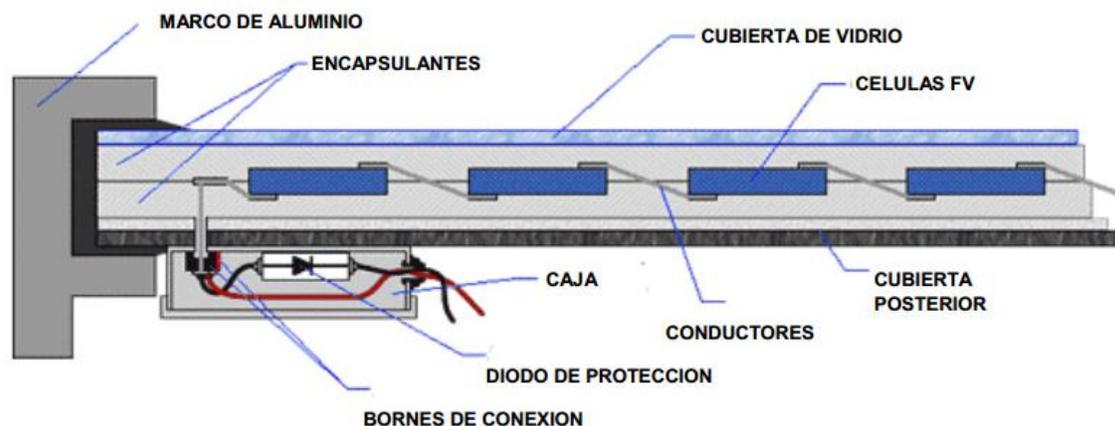


Imagen 1. Estructura de un panel solar fotovoltaico (Solis, 2012)

También , los paneles fotovoltaicos suelen presentar siempre formas cuadradas o rectangulares, con superficies que van desde aproximadamente 0.1 m^2 hasta 1 m^2 ; el grosor total, sin incluir el

marco protector, es aproximadamente de 3 cm, son relativamente ligeros y aunque aparentan ser rígidos, son capaces de sufrir leves deformaciones para adaptarse a los esfuerzos mecánicos a que pudieran verse sometidos (Fernandez, 2007). En la tabla 3 se describe los componentes de un panel solar típico.

Tabla 3. Componentes de un panel fotovoltaico (Solis, 2012)

| COMPONENTE | DESCRIPCIÓN Y FUNCIÓN |
|--------------------|---|
| Cubierta de vidrio | El vidrio que recubre el panel sirve como protección para las células solares ante los fenómenos atmosféricos |
| Conexionado | El panel debe ser fácil de instalar. Las células solares que forman el panel van conectadas entre sí en serie o en paralelo. Su asociación desde el punto de vista eléctrico proporciona el nivel adecuado de tensión e intensidad para el que ha sido diseñado el panel solar. |
| Marco del panel | Permitirá la instalación sobre un determinado soporte. |
| Soporte | Debe proporcionar una rigidez estructural adecuada, con vistas a la instalación del módulo. |
| Célula | Es la parte más importa del panel ya que esta recibe loa fotones que provienen del sol. La célula está formada por: junta de silicona, vidrio, encapsulante y plástico. |

Hay que mencionar, además, que existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos, la clasificación de estos se hace en base al tipo de material que se usa en su fabricación, como también la distribución del mismo. Por lo general, las células fotovoltaicas están formadas por materiales semiconductores como el Silicio (Si) y el Arseniuro de Galio (GaAs) (Fernandez, 2007).

Así pues, se destacan por su eficiencia los paneles monocristalinos y los paneles policristalinos. En los monocristalinos se utilizan celdas de silicio monocristalino, estos paneles cuentan con eficiencias entre 14% y 16%, pueden ser de color azul oscuro o plateado oscuro. Por lo general, se fabrican con 36 celdas que producen una potencia de 12 V (Abella, 2011). Además, para que sea posible la construcción de la celda, el Silicio debe someterse a ciertos cambios, debe ser

transformado en bloques para luego ser cortado en láminas, debido a este proceso, la fabricación de las celdas mono cristalinas es el más costoso.

Por otra parte, en los paneles policristalinos el silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado (Lopez, 2006). En seguida se enfría y se corta en láminas perfectamente cuadradas. Se encuentran con eficiencias entre 10% y 15%, pueden ser de color azul y se identifican por tener visos de colores azules (Solis, 2012). Es el menos costoso y el más usado de los paneles de silicio. A continuación, en la tabla 4 se mencionan las ventajas y desventajas de los paneles monocristalinos y policristalinos.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de dos tipos de paneles fotovoltaicos (Giraudy, Massipe, Rodriguez, Gámez, & Vásquez, 2014).

| PANELES | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|-----------------|--|--|
| MONOCRISTALINOS | <ul style="list-style-type: none"> -Tienen las mayores tasas de eficiencia puesto que se fabrican con silicio de alta pureza. La eficiencia en estos paneles está por encima del 15% y en algunas marcas supera el 21%. -La vida útil de los paneles monocristalinos es más larga. -Son eficientes en condiciones de poca luz. | <ul style="list-style-type: none"> -Son costosos -Si el panel se cubre parcialmente por una sombra, suciedad o nieve, el circuito entero puede averiarse. -Se derrocha una gran cantidad de Silicio en su fabricación. |
| POLICRISTALINOS | <p>El proceso de fabricación de los paneles fotovoltaicos policristalinos es más simple, lo que redundaría en menor precio. Se pierde mucho menos silicio en el proceso que en el monocristalino.</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Los paneles policristalinos suelen tener menor resistencia al calor que los monocristalinos. -La eficiencia de un panel policristalino se sitúa típicamente entre el 13-16%, debido a que no tienen un silicio tan puro como los monocristalinos. -Mayor necesidad de espacio. Se necesita cubrir una superficie mayor con paneles policristalinos que con monocristalinos. |

Sin embargo, se debe tener en cuenta el tipo de dispositivo que se quiere alimentar con la energía fotovoltaica. Así pues, existen elementos que necesitan mayor amperaje, entonces, para aumentar

el amperaje se deben disponer los paneles solares en paralelo. Por otro lado si lo que se necesita es aumentar el voltaje la disposición de los paneles solares debe ser en serie (De las Heras, 2014).

Lo anterior se debe tener en cuenta para el dimensionado del sistema, es decir, poder analizar el tipo de panel, la forma de conexión y el sistema alimentado se pueda ejecutar de manera eficiente. Ver tabla 5.

Tabla 5. Factores que se deben calcular para la utilización de la energía fotovoltaica

| FACTOR | DESCRIPCIÓN | ECUACIÓN |
|---|--|--|
| La demanda energética | Se calcula mediante el inventario de dispositivos que requieren de energía eléctrica para su funcionamiento en el lugar de interés. | NO existe información |
| Potencia promedio | La potencia se mide en vatio (W) o en kilowatts (kW) y está registrada en la placa de especificaciones técnicas de cada artefacto o en el manual del usuario. | NO existe información |
| Potencia total | De acuerdo a la cantidad total de unidades se calcula la potencia total según la potencia individual. | Potencia total $W = \text{potencia promedio (W)} \times \text{Cantidad}$ |
| Horas de uso al día | Este parámetro es aproximado y se obtiene según conocimiento de los habitantes constantes de la zona complementado con observación de los autores al momento de construir el inventario. | NO existe información |
| Consumo diario promedio (W/día) | La cantidad de energía eléctrica consumida por un aparato, permite establecer los costos facturados por las compañías eléctricas, mediante la siguiente expresión. | Econsumida por unidad $= P(kW) \times t(h)$ Donde: E= Energía consumida = kWh P= Potencia nominal del equipo (kW) t= tiempo diario de uso en horas al día. |
| Energía total consumida simultáneamente | Es la suma de todos los consumos diarios promedios para el escenario en que todas las unidades estén funcionando simultáneamente. | NO existe información |

Además, para que los paneles fotovoltaicos sean más eficientes, se debe tener en cuenta la inclinación de estos con relación al sol. Así pues, Para paneles ubicados en el hemisferio norte la orientación es hacia el sur y los ubicados en el hemisferio sur deben orientarse hacia el norte para que durante el día se obtenga la mayor cantidad de radiación posible (Prat, 2011). Para el caso de Colombia, la inclinación de los paneles deber ser hacia el sur, debido a que el país está situado en el hemisferio norte (por encima del Ecuador) (Ospino & Isaza, 2016).

Por ejemplo, en una instalación fija, se determina la inclinación óptima para todo el año y con esto se recibe la potencia media anual máxima posible (Escobar, 2013). En países cercanos al Ecuador, las consecuencias de desviaciones de la inclinación óptima son poco importantes (Orbegozo & Arivilca, 2010). En países tropicales se usa una inclinación fija para paneles para todo el año, dicha inclinación es igual a la latitud del sitio, aunque no debe ser menor a 10° para impedir la acumulación de polvo y agua sobre su superficie (SIMEC, 2010).

En Colombia, La latitud se encuentra entre $4^\circ 12' 19''$ Sur en Leticia y $12^\circ 26' 46''$ Norte en Punta Gallina, Guajira, por lo que la inclinación de un panel solar de deberá disponer entre 10° y 15° con respecto a la horizontal (IGAC.2005). Por esta razón, los paneles que se encuentren en territorio colombiano solo tendrán una única inclinación, teniendo en cuenta que el sol no se aparta mucho del zenit en el medio día solar (López et al., 2012). A continuación, en la tabla 6, se observa los grados de inclinación de un panel en función a su latitud.

Tabla 6. Grados de inclinación de un panel en función a su latitud (Guevara & Pérez, 2015).

| LATITUD DEL LUGAR | ANGULO DE INCLINACIÓN DEL PANEL (MODULO) |
|----------------------------|---|
| De 0° a 15° | 15° |
| De 15° a 25° | El mismo que la latitud |
| De 25° a 30° | Latitud + 5° |
| De 30° a 35° | Latitud + 10° |
| De 35° a 40° | Latitud + 15° |
| Más de 40° | Latitud + 20° |

Cabe resaltar, que le hombre se preocupa más por el aprovechamiento de los recursos renovables en especial la energía fotovoltaica, con el fin de mitigar el cambio climático que hoy en día azota con más agresividad a los países industrializados. Por ejemplo, en los países árabes, sus gobernantes están proyectando su economía en la energía renovables, para convertirse en una potencia en energía fotovoltaica, esto lo hacen debido a que el petróleo que es su mayor recurso, está ya en extinción.

Por esta razón, la solar es la energía renovable que posee un gran potencial para ser utilizada alrededor del planeta. Sus ventajas son de gran interés en el campo de la ingeniería (ambiental, agrícola, forestal, etc.) pues su fuente de recurso es inagotable, es una energía limpia al no tener gran impacto ambiental y no producir residuos perjudiciales para el ecosistema, sus costos de mantenimiento son bajos, posee alta confiabilidad para funcionar por periodos de tiempo prolongados y es un tipo de energía descentralizada (SIMEC, 2010)

Sin embargo, la instalación de la energía fotovoltaica en ciertas situaciones requieren de una planeación a fondo, esto se debe hacer para evitar el fracaso en los proyectos y la pérdida de dinero. Así pues, se recurre al uso de la modelación matemática para poder predecir el funcionamiento de cualquier sistema que se vaya implementar (Castro et al ., 2014).

Existen una gran variedad de herramientas para el diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos. Cada uno de los modelos disponibles tiene funciones diferentes, ya que en el campo de la ingeniería se abarcan muchos temas. En este caso las herramientas que más se acopla en el estudio de un sistema solar son las genéricas con arquitectura abierta y las de simulación (Sanchez et al., 2015). Estas permitirán simular la cantidad de energía que puede absorber una celda fotovoltaica en cierto lugar. De ahí, es posible calcular de manera parcial la cantidad de paneles que se requieren para aprovechar la radiación en dicha región.

En relación a lo anterior, continuación en la tabla 7 se describen las características de algunas herramientas y programas basados en la modelación matemática.

Tabla 7. Modelos matemáticos para la simulación de sistemas fotovoltaicos

| HERRAMIENTAS | PROGRAMAS | CARACTERÍSTICAS |
|--|---|--|
| Calculo de viabilidad | FATE2-P | Calcula el coste y el tiempo de amortización del sistema fotovoltaico. Tiene en cuenta parámetros financieros como la tasación, créditos, impuestos, etc. |
| | REDScreen | Esta herramienta consiste en la integración y estandarización del análisis de un proyecto de energía renovable basado en Microsoft Excel |
| Dimensionado | Design Your System | Aporta información sobre el número necesario de paneles solares y baterías de una base de datos con productos comerciales para cubrir las necesidades de potencia de un perfil de carga definido por el usuario. |
| | Estimating Stand-alone System Size | Permite una buena estimación del dimensionado de un sistema fotovoltaico. Ofrece información sobre la irradiancia solar en todo el mundo, y Excel workbook, que permite calcular la máxima carga diaria soportable por el sistema. |
| | Nsol | Es el dimensionado de sistemas autónomos con baterías. La información necesaria para los cálculos consiste en la localización, irradiación, características de paneles solares y baterías, y un perfil de carga. |
| | PVcad | Permite el cálculo de la producción de energía eléctrica. Tiene en cuenta además efectos de temperatura, sombras, luz directa y difusa en los paneles. |
| Simulación | ILSE. | Permite realizar numerosos cálculos y simulaciones, entre los que destacan diagramas de órbitas solares, determinación de las características de células fotovoltaicas o influencia de la temperatura en los paneles solares. |
| | SOMES. | Permite simular las características de sistemas solares, eólicos, diesel o híbridos, tanto si son autónomos como si se encuentran conectados a red. El sistema ofrece información sobre el balance energético del sistema, así como estudios económicos, técnicos y de fiabilidad del sistema. |
| Genéricas con arquitectura abierta. | Matlab/Simulink | Es un entorno abierto de cálculo numérico que ofrece avanzadas herramientas de manipulación matemática con un potente e intuitivo lenguaje de programación. Junto con Simulink, su entorno gráfico, se obtiene una aplicación que logra un fácil manejo de las herramientas de simulación. |
| | Pspice | Trata de una herramienta de simulación de circuitos electrónicos. Para poder modelar sistemas fotovoltaicos deben usarse modelos eléctricos equivalentes. |

Con relación a lo anterior, las características de una célula solar que se deben tener en cuenta son: el voltaje-corriente y el voltaje-potencia, estas suelen representarse por medio de gráficas: En la imagen 2, se pueden observar los puntos más representativos de las curvas, tales como: la corriente de corto circuito (I_{SC}), el voltaje de circuito abierto (V_{OC}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (P_{MPP}) (Granda et al., 2013).

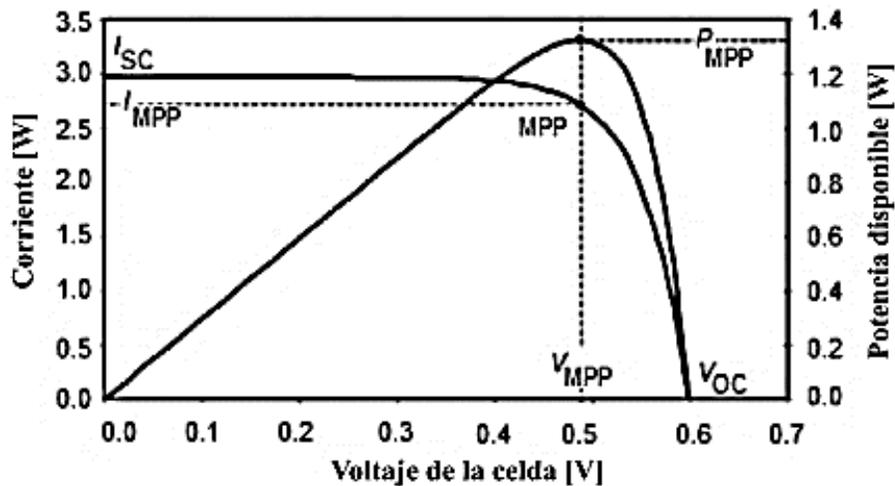


Imagen 2. Curva voltaje – corriente y voltaje – potencia de una celda solar (Granda et al., 2013)

Además, el modelo matemático que describe la curva voltaje-corriente en una celda solar, generalmente se describe por medio de la siguiente ecuación 1:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

Donde, I_L es la corriente foto generada, I_0 es la corriente de saturación inversa, R_S es la resistencia en serie, R_{SH} es la resistencia en paralelo, V es el voltaje, q es la carga de un electrón ($1.6 \times 10^{-19}C$), y a es un parámetro dado por la ecuación 2:

$$a = kT_C A \quad (2)$$

Siendo k la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/K), T_C es la temperatura de la celda y A es el factor de idealidad. El factor de idealidad permite distinguir el comportamiento entre una celda de silicio y una de germanio, dependiendo así de la tecnología de fabricación de la celda solar.

La corriente foto generada varía en función de la radiación solar y de la temperatura de trabajo en la celda, y se describe por la siguiente ecuación 3.

$$I_L = \frac{S}{S_{REF}} [I_{L,REF} + \mu_{ISC} (T_{C,REF} - T_C)] \quad (3)$$

Donde, S es la irradiación solar, S_{REF} es la irradiación solar en condiciones de referencia (1000 W/m²), $I_{L, REF}$ es la corriente foto generada en condiciones de referencia y se puede tomar como la corriente de cortocircuito ($I_{L, REF} = I_{SC}$), y μ_{ISC} es el coeficiente de cortocircuito, el cual generalmente está dado por el fabricante.

La corriente de saturación inversa está dada por la expresión siguiente:

$$I_0 = I_{0,REF} \left(\frac{T_C}{T_{REF}} \right)^3 \exp[qE_G (1/T_{REF} - 1/T_C)/kA] \quad (4)$$

Donde, E_G es la energía del semiconductor en su banda de gap y $I_{0,REF}$ es la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia.

Generalmente, la eficiencia de una celda solar no se afecta con la variación en la resistencia en paralelo (debida a impurezas en el Silicio), por lo que se puede asumir que $R_{SH} = \infty$. Por otro lado, una pequeña variación en la resistencia serie afecta significativamente el comportamiento y eficiencia de una celda solar.

Ya que la resistencia en paralelo no representa un porcentaje significativo de pérdidas, se simplifica el modelo matemático planteado en la ecuación (1). Entonces, el valor de $(V+IR_s)/R_{SH}$ puede ser igualado a cero y así la ecuación se simplifica así:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

Ahora bien, conociendo las ecuaciones para el modelado de las células solares, también se debe hacer las ecuaciones para el modelamiento del panel solar. Entonces, para hacer el modelado las células solares deben ser conectadas en una configuración serie- paralelo para poder generar un nivel más alto de energía y así formar un panel solar (Granda et al., 2013). El modelo matemático que describe a un panel solar se muestra en la siguiente ecuación (6), donde el número de celdas en paralelo viene dado por el prefijo N_p , mientras que el número de celdas en serie viene dado por el prefijo N_s .

$$I = N_p I_L - N_p I_o \left[\exp\left(\frac{q(V | N_s + IR_S | N_p)}{a}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

Es importante considerar que el modelo matemático de un panel solar puede ser utilizado para el análisis de una sola celda solar si se consideran que los coeficientes $N_p=1$ y $N_s=1$.

Finalmente, la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia se obtiene por la ecuación (7):

$$I_{O,REF} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s \cdot a}\right) - 1 \right]} \quad (7)$$

Así pues, el modelo matemático de una celda solar expresado como se indica en la ecuación (6) puede ser esquematizado por medio de Matlab/Simulink para su posterior simulación, permitiendo observar las curvas de voltaje- corriente y voltaje-potencia para el análisis del punto de máxima potencia (Smith et al., 2015). Una simulación, permite la observación y el análisis de una, o más variables en función del tiempo. Los parámetros requeridos para la simulación, generalmente pueden ser obtenidos de las hojas de datos proporcionadas por el fabricante (Granda et al., 2013). Uno de los parámetros más importantes, es el voltaje de circuito abierto

(V_{OC}), el cual se obtiene asumiendo que la corriente de salida es cero. Por otro lado, la corriente de corto circuito (I_{SC}) se obtiene asumiendo que el voltaje de salida es cero (Granda et al., 2013).

Para ilustrar la simulación de un panel, como ejemplo, utilizo un panel solar de silicio policristalino de 250 W en condiciones de referencia (STC, Temperatura de Celda = 25°C, Irradiación= 1000 W/m², AM=1.5), constituido por 60 celdas solares y cuyas características se identifican en la Tabla 8.

Tabla 8. Ficha técnica de un panel solar de Silicio poli cristalino de 250 W (STC) (Granda et al., 2013)

| PARÁMETROS | VALORES |
|---|------------|
| Potencia Máxima | 250 W |
| Voltaje de Punto de Máxima Potencia | 30.12 V |
| Corriente de Punto de Máxima Potencia | 8.30 A |
| Corriente de Corto Circuito | 8.65 A |
| Voltaje circuito abierto | 37.85 V |
| Coefficiente de Temperatura de Corto Circuito | 0.062%/°C |
| Coefficiente de temperatura de voltaje en Circuito Abierto | -0.330%/°C |
| Coefficiente de Temperatura de Potencia Máxima | -0.45 %/°C |

El modelo matemático de un panel solar se muestra de una forma esquematizada en el ambiente Matlab/Simulink en el bloque que se muestra en la imagen 3, y que a su vez contiene por medio de subsistemas, a las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (7) (Arroyave et al., 2013). Se puede apreciar que las entradas del bloque son: la temperatura de celda, la radiación solar y el voltaje. Mientras que a la salidas del bloque, se obtiene la corriente de salida y la potencia que es capaz de producir.

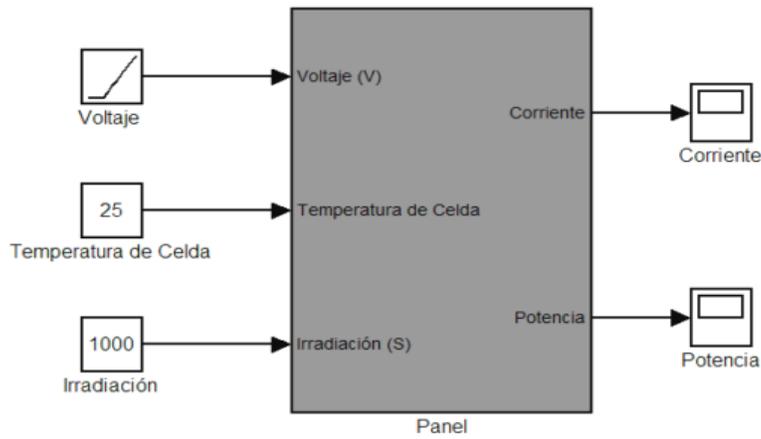


Imagen 3. Modelo esquematizado de una celda (o panel solar) en Matlab/Simulink (Granda et al., 2013)

La imagen 4, representa el conjunto de subsistemas que conforman al bloque de la imagen 3. Se identifican los bloques que representan a la corriente foto generada definida bajo la ecuación (6), y la corriente de saturación inversa expresada en la ecuación (7) (Granda et al., 2013). Ambos bloques están conectados a un multiplexor, cuya salida alimentará a un bloque de función para realizar las operaciones necesarias para la resolución de la ecuación (6).

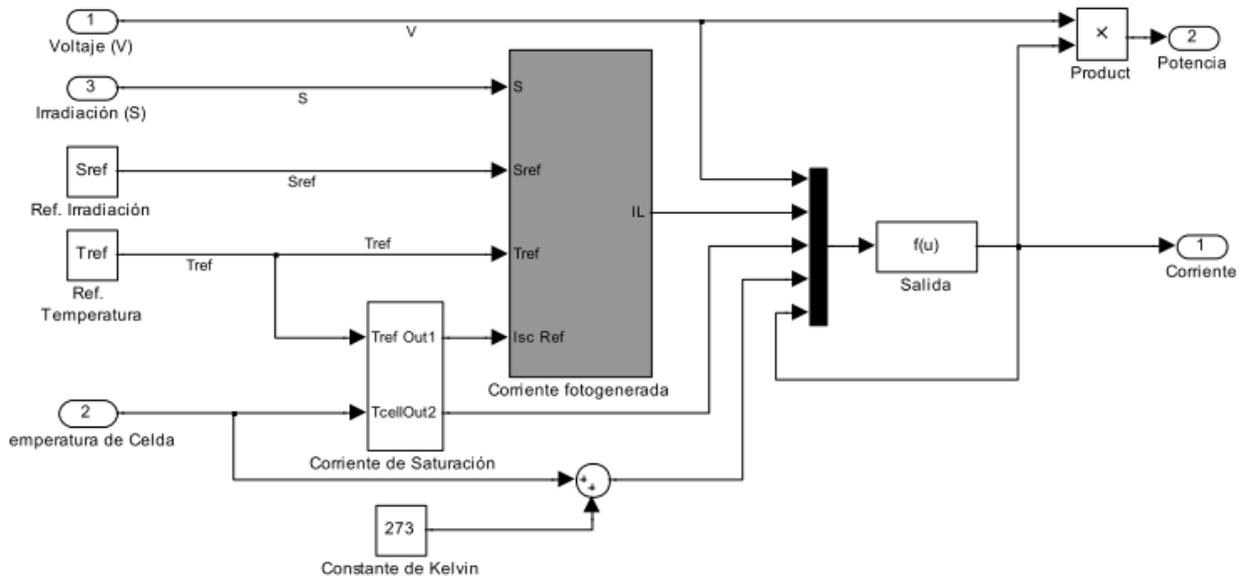


Imagen 4. Diagrama a bloques para la simulación de una celda o panel solar mediante la resolución de su modelo matemático (Granda et al., 2013)

Así pues, la naturaleza de una celda solar se describe gracias a la interpretación de las curvas características que muestran el punto de máxima potencia. La imagen 5 muestra las curvas características de voltaje – corriente y voltaje – potencia para una celda solar bajo condiciones de referencia (Fernández, 2011). Estas señales, obtenidas por medio del modelo desarrollado, corresponden a las curvas características de una celda de Silicio, lo que se manifiesta por la diferencia de potencial en corriente cero en 0.6 V (Granda et al., 2013).

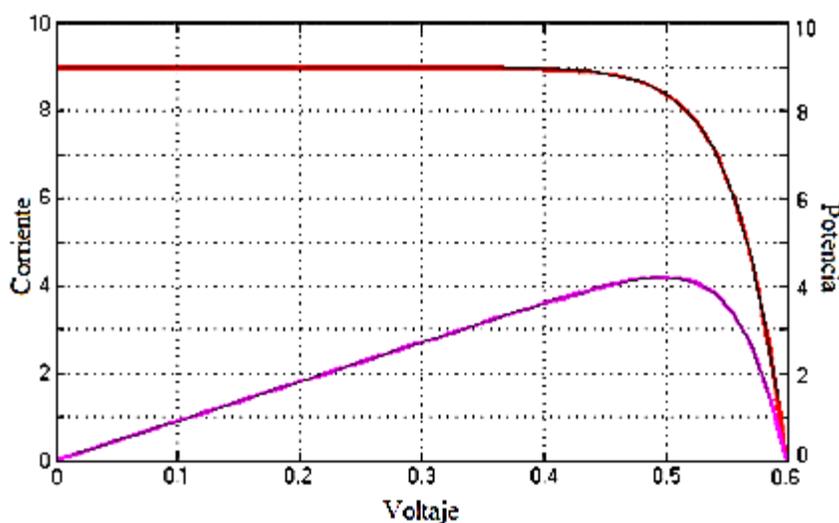


Imagen 5. Curva característica voltaje-corriente (arriba) y voltaje -potencia (abajo)(Granda et al., 2013)

Por otro lado, en la imagen 6 se aprecia que con el incremento en la temperatura de celda, el punto de máxima potencia disminuye debido a una reducción importante en el voltaje de salida. Esto es provocado por el incremento en la agitación térmica de los portadores de carga en el semiconductor, lo que se manifiesta como una reducción en el potencial de la unión (Guasch, 2003). Este efecto, sin duda repercute en el desempeño de la celda y por extensión en la eficiencia de un arreglo fotovoltaico, por lo que es un parámetro de diseño muy importante; la simulación permite cuantificar el efecto en el arreglo final, tanto para una celda, como para un panel solar, pudiendo predecir el impacto de esta variable (Prat, 2011).

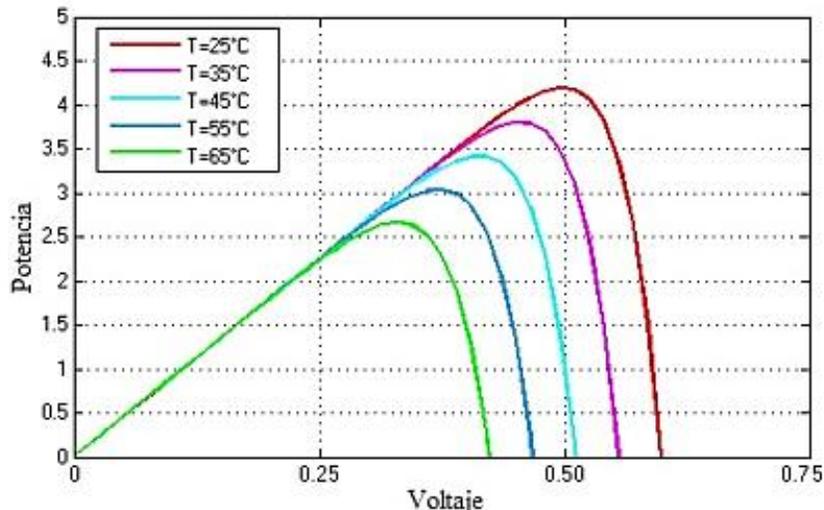


Imagen 6. Curva de voltaje – potencia para una celda solar con variación en la temperatura (Granda et al., 2013)

Sin embargo, un efecto más significativo que las variaciones en la temperatura, lo constituyen las variaciones en la irradiación solar, es decir, en la intensidad de la luz que incide sobre la celda solar. Dado que este es un efecto que se multiplica con el número de celdas conectadas en el arreglo (Müller et al., 2014).

En otra variable, En la imagen 7 se observa como el decremento en la irradiación solar se ve manifestado como una reducción proporcional en la corriente de corto circuito. La corriente de cortocircuito es la máxima corriente disponible para producir energía eléctrica con el panel solar, por lo que una reducción de este valor representa una disminución en el punto de máxima potencia, y por lo tanto, en la capacidad del sistema fotovoltaico para producir potencia eléctrica (Smith et al., 2015). Esto ocurre debido a que el voltaje de circuito abierto es logarítmicamente dependiente de la irradiación solar, mientras que la corriente de corto circuito es directamente proporcional a la intensidad de radiación solar.

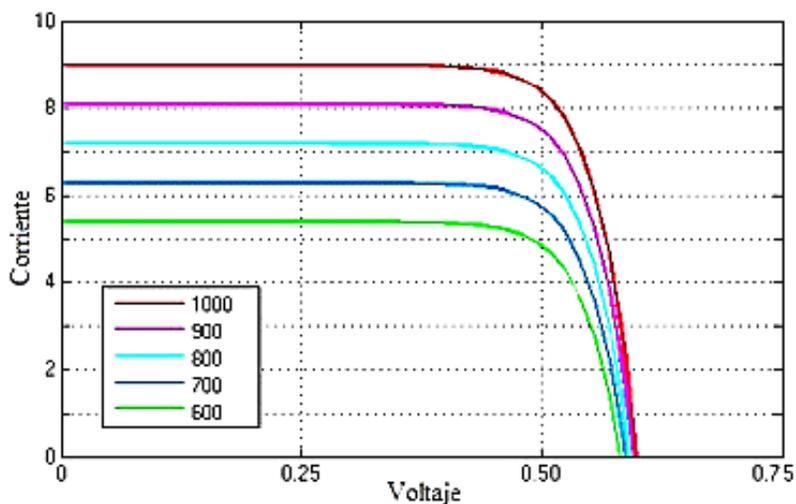


Imagen 7. Curva de voltaje – corriente para una celda solar con variación en la irradiación solar (Granda et al., 2013)

Para comprobar la validez de este modelo, en la imagen 8, la curva característica de voltaje – corriente proporcionada por el fabricante, la cual se obtiene usualmente mediante pruebas experimentales de laboratorio bajo condiciones estándar certificadas (25 °C y 1.5 masa de aire (AM)) (Smith et al., 2015). Se puede apreciar la dependencia directa de la corriente de cortocircuito con la irradiación solar. Se muestra también la curva experimental obtenida en condiciones nominales (1000 W/m², 45 °C y 1.5 AM).

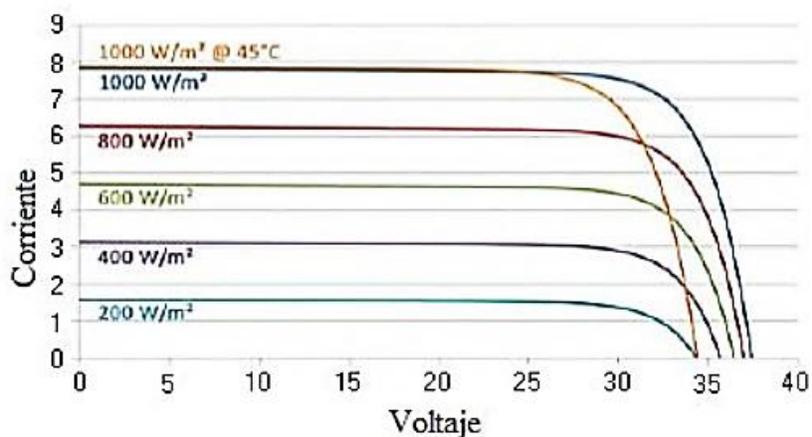


Imagen 8. Curva voltaje – corriente proporcionada por el fabricante (Granda et al., 2013)

Comparando la imagen 9, obtenida mediante la simulación, se puede apreciar que la simulación realizada arroja un resultado muy similar al mostrado en la curva del fabricante, con una pequeña variación ocasionada por ciertos factores físicos (interconexión de celdas, resistencias, etc.), que sí son observadas bajo las condiciones experimentales (Granda et al., 2013).

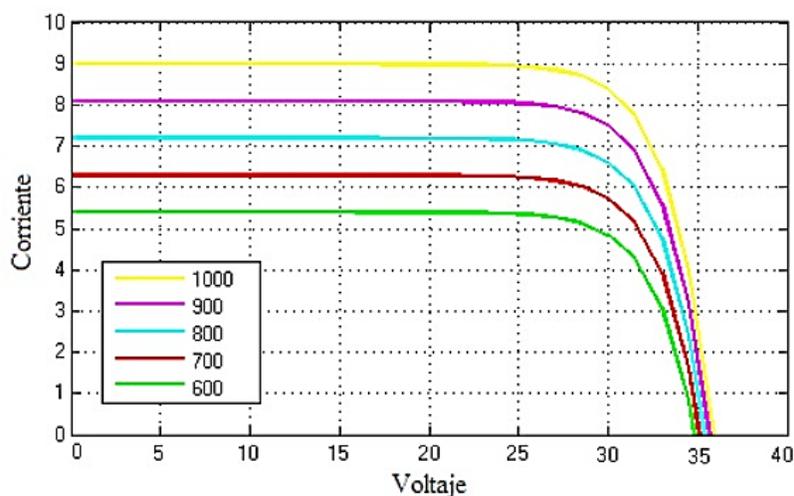


Imagen 9. curva de voltaje- potencia para un panel fotovoltaico con variación en la irradiación solar (Granda et al., 2013)

Hay que destacar, que la utilización de modelos matemáticos, como Matlab/Simulink, permiten el análisis del comportamiento de una celda solar, además, es una herramienta muy útil cuando se requiere dimensionar sistemas fotovoltaicos, ya que por medio de este tipo de simulaciones se puede predecir la cantidad de energía que se puede generar con una mayor exactitud ante cambios físicos y climatológicos (Brito et al., 2011). Todo esto, conlleva a realizar de manera más eficiente cualquier tipo de proyecto que esté basado en la utilización de la energía fotovoltaica.

Gracias a este tipo de tecnologías hoy en día la aplicación de la energía fotovoltaica para ayudar a las poblaciones menos favorecidas es más frecuente. Como es el caso de los sistemas de bombeo de agua fotovoltaicos, los cuales en la actualidad son utilizados para abastecer de agua potable a ciertas regiones y/o para alimentar los distritos de riego para los cultivos. A continuación se describe un sistema de bombeo de agua alimentado por paneles fotovoltaicos.

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se caracterizan por ser de alta confiabilidad, larga duración y mínimo mantenimiento, lo cual se traduce en un menor costo a largo plazo si se le compara con otras alternativas (Gonzales & Sanchez, 2010). Además, no requiere del empleo de un operador y tienen un bajo impacto ambiental (no contaminan el aire o el agua y no producen ruido). Otra ventaja es que los sistemas son modulares, de manera que pueden adecuarse para satisfacer las necesidades específicas del usuario en cualquier momento (Guasch, 2003). Por esta razón, este tipo de sistemas tiene ciertos componentes, entre estos están: Un generador fotovoltaico, un convertidor de potencia, una motobomba, una estructura hidráulica y el sistema de acumulación (ver imagen 10) (Cervantes, 2009).

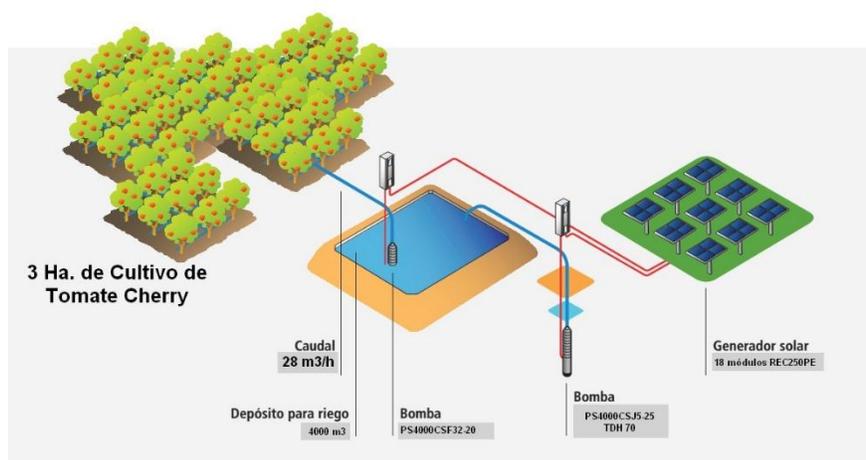


Imagen 10. Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico (Ramos, 2014).

El generador fotovoltaico, tiene por misión suministrar la energía necesaria para el funcionamiento normal del sistema (Gonzales & Sanchez, 2010). No hay ningún tipo de requerimiento especial por el hecho de estar destinado a formar parte de un sistema de bombeo. Son perfectamente válidos módulos fabricados con silicio monocristalino y policristalino (Cervantes, 2009). Además de los módulos, debe considerarse su estructura de soporte, en lo que respecta a los sistemas de bombeo en zonas aisladas, las estructuras fijas son las más utilizadas.

La motobomba, está constituida por la bomba y el motor que la acciona. Hay dos tecnologías que son las más utilizadas, las bombas centrífugas (de uno o más impulsores, externas o sumergibles) y las de desplazamiento positivo o volumétricas (Ramos, 2014). El motor también puede ser de dos tipos distintos: motor de corriente directa (CD) y de corriente alterna (CA) (Gonzales &

Sanchez, 2010). En los primeros días del bombeo fotovoltaico, se utiliza el motor de corriente continua para las bombas, dado que los módulos FV generan este tipo de corriente, esto se realiza para facilitar el control de la velocidad de la bomba y hacer posible un mejor aprovechamiento de la potencia proporcionada por el sol (Cervantes, 2009).

El equipo acondicionador de potencia. Aunque es posible conectar el generador fotovoltaico directamente al motor (si es de CD), se gana mucho en eficiencia intercalando un equipo que, en términos generales, adapte impedancias entre los dos elementos (Cervantes, 2009). En el caso de los motores de CD, la función principal será adecuar la tensión de los módulos para el motor y mantenerla constante a lo largo del día de forma que sólo la corriente varíe en función de la irradiación (Cabrera & Montiel, 2003). En el caso de los motores de CA el uso es imprescindible para convertir la CD en CA. En los últimos tiempos los inversores ofrecen la capacidad de generar una frecuencia de trabajo variable en función de la potencia de entrada, lo que es mejor conocido como seguimiento del punto de máxima potencia (Adolfo, Correa, & Quintero, 2014).

El sistema de acumulación suele ser un depósito de un volumen adecuado para proporcionar la autonomía necesaria, en general de 2 o 3 días para sistemas de agua potable y de hasta 10 días para sistemas de riego (Barriga, 2012). Las fuentes de agua para bombear pueden ser ríos, lagos o pozos. En instalaciones de bombeo FV es más habitual la extracción de agua de pozos que, aunque pueden ser abiertos, en la mayor parte de los casos son pozos de sondeo en los que se instala una motobomba sumergible junto con las sondas de nivel u otros dispositivos de control para evitar la operación en vacío, que dañaría la bomba irreversiblemente (Cabrera & Montiel, 2003).

De esta manera, la clave de un sistema fotovoltaico es el poco trabajo que requiere y el bajo costo de mantenimiento comparado con otras opciones, lo que a largo plazo lo convierte en el sistema más conveniente, excepto donde la alimentación de agua por gravedad está disponible. Según Aqueveque (2009) haciendo la comparación entre el bombeo solar con el generado por diésel, para un caudal de bombeo de 3,8 gal/min (0,23 l/s) con una altura de bombeo de 275 pies (84 m), el costo del sistema fotovoltaico a lo largo de 20 años es igual al 64% del costo del sistema con generador en 10 años, además que la cantidad de horas de trabajo invertidas en el primero es el 14% de las horas invertidas en el segundo.

Se puede decir entonces, que el bombeo solar en zonas alejadas o rurales es la mayoría de las veces es más conveniente que el bombeo mediante generadores (Mendez & Cuervo, 2007). Por otro lado, el costo inicial de los generadores es menor, pero requieren constante mantenimiento y tienen una vida útil de 1500 horas, sin embargo, un sistema de bombeo solar pequeño y de mediano tamaño cuesta menos que un motor-generador durable de baja velocidad (Practical Action, 2010). A continuación en la tabla 9 se indica las ventajas y desventajas de los tipos de bomba solar.

Tabla 9. Comparación del sistema de bombeo fotovoltaico con los sistemas convencionales (Aqueveque, 2009)

| TIPO DE BOMBA | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---------------------|---|--|
| Solar | Bajo mantenimiento No hay costo por uso de petróleo ni derrames Fácil de instalar Simple y confiable Operación desatendida Sistema puede hacerse móvil | Alto costo inicial Baja potencia de salida en tiempo nublado Deben tener buena exposición solar entre 9 AM y 3 PM |
| Diesel o Gas | Costo de capital moderados Puede ser portable Mucha experiencia Fácil de instalar | Necesita de mantenimiento y reemplazo de partes Mantenimiento inadecuado reduce la vida útil Requiere de combustible que es costoso Ruidoso, sucio y contaminante |
| Gravedad | Muy bajo costo Bajo mantenimiento No necesita combustibles Fácil de instalar Simple y confiable | Practico solo en pocos lugares |
| Tracción | Tiene el más bajo costo inicial Excelente movilidad | Requiere de trabajo intensivo |

Teniendo en cuenta lo anterior, existen varios tipos de bombas fotovoltaicas en el mercado, las cuales han sido desarrolladas pensando en que hay una fuente de potencia constante. Así mismo, la potencia que producen los módulos FV es directamente proporcional a la disponibilidad de la radiación solar. Es decir, a medida que el sol cambia su posición durante el día, la potencia generada por los módulos varía y a su vez también la potencia entregada a la bomba (Cabrera & Montiel, 2003). Por esta razón existen bombas especiales para la aplicación fotovoltaica, las cuales se dividen desde el punto de vista mecánico en centrífugas y volumétricas (Tabla 10).

Tabla 10. Características de las bombas fotovoltaicas (Barrio, 2016).

| BOMBAS FOTOVOLTAICAS | CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|------------------------------------|--|---|
| Centrífugas sumergibles | <ul style="list-style-type: none"> -Comúnmente disponibles -Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena -Pueden utilizar el agua como lubricante -Utilizan motores de CD de velocidad variable o CA -Manejan altos caudales | <ul style="list-style-type: none"> -Tienen un intervalo de eficiencia estrecho con respecto a la CDT -Se dañan si trabajan en seco. -Deben extraerse para darles mantenimiento. -Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas |
| Centrífugas de succión superficial | <ul style="list-style-type: none"> -Comúnmente disponibles. -Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena. -Utilizan motores de CD de velocidad variable o de CA. -Manejan altos caudales. | <ul style="list-style-type: none"> -Tienen un intervalo de eficiencia estrecho con respecto a la CDT (carga dinámica total). -Se dañan si trabajan en seco. -Pueden dañarse por congelamiento en climas fríos. -Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas. |
| Desplazamiento positivo | <ul style="list-style-type: none"> -Soportan cargas dinámicas muy grandes -La producción puede variarse ajustando la carrera del pistón | <ul style="list-style-type: none"> -Requieren de reemplazo regular de sellos del pistón -No toleran arenas o sedimentos -La eficiencia se reduce a medida que el pistón pierde la capacidad -Debe extraerse el pistón y el cilindro del pozo para reparar los sellos. |

Así como las bombas son parte indispensable de un sistema de bombeo fotovoltaico, los motores también son una parte imprescindible de estos. Los motores eléctricos son dispositivos de potencia que activan la fase de bombeo de fluidos estos se clasifican en dos tipos: de corriente directa (CD) y los de corriente alterna (CA). Así pues, la manera en que se encuentran configurados los motores de CD, requieren de escobillas, comúnmente llamadas carbones, los cuales, son los encargados de transmitir la potencia eléctrica al colector (Gomez, 2016).

Entre las ventajas principales de este tipo de motores se encuentran: Alta eficiencia (casi del 85%), se diseñan para acoplarse directamente al generador fotovoltaico y no necesitan de un inversor. Entonces, en el caso de que el motor posea escobillas o carbones, estos no podrán ser sumergidos a más de 30 metros de profundidad, por lo que no se utilizan en bombas sumergibles. Por otro lado, los motores de CA (corriente alterna) son los que en la actualidad más se utilizan, debido a que la mayoría de equipos funcionan con esta corriente. Existen dos tipos de motores de CA, los monofásicos y los trifásicos, los primeros tienen aproximadamente una eficiencia del 60%, mientras que los trifásicos tienen eficiencias cercanas al 80% (Cervantes, 2009).

Cabe mencionar, que cuando se va a emplear un motor que funcione con CA, es necesario la instalación de un inversor de corriente, debido que la corriente que genera el módulo fotovoltaico es de tipo directa, por lo que mediante el inversor dicha corriente será transformada a energía alterna (Cabrera & Montiel, 2003).

Además, existen dos tipos básicos de sistemas de bombeo activados por energía solar. Estos son: acoplado con baterías y directamente acoplado, se deben considerar varios factores para determinar cuál de estos sistemas es el óptimo para una situación particular. El primero de ellos se basa en el almacenamiento de energía mientras que el segundo se basa en el almacenamiento de agua (Barrio, 2016).

Ampliando sobre el tema, los sistemas de bombeo solares acoplados a baterías, constan de paneles fotovoltaicos, un regulador de carga, baterías, un controlador de bomba, interruptor de presión, tanque de presión y una bomba (DC). La corriente eléctrica producida por los paneles durante las horas de sol carga las baterías, gracias a esto, dicha energía almacenada será utilizada

para poner en funcionamiento el sistema de bombeo, en horas de poca luz o en la noche (Aqueveque, 2009).

No obstante, el uso de baterías tiene algunas desventajas, éstas pueden reducir la eficiencia de todo el sistema debido a que el voltaje de operación es controlado por las baterías y no por los paneles. Dependiendo de su temperatura y de cuan bien están cargadas, el voltaje abastecido por las baterías puede ser de uno a cuatro Voltios (V) menor que el voltaje producido por los paneles durante condiciones de máxima luz solar lo cual se traduce en menor energía proporcionada (Auccacusi, 2014). Esta eficiencia reducida puede ser minimizada con el uso de un apropiado controlador de bomba que impulsa el voltaje de la batería a la bomba.

Otro aspecto a tener en cuenta, es que paneles solares que se conectan directamente con las baterías pueden producir niveles de voltaje que pueden sobrecargar las baterías (Barrio, 2016). Un regulador de carga debe instalarse entre los paneles y las baterías para prevenir el exceso de carga de estas últimas. Los reguladores de carga permiten que la corriente producida por los paneles fluya en su totalidad a las baterías hasta que éstas alcancen cierto umbral de carga (Ospino & Isaza, 2016). Una vez alcanzado este umbral, el regulador de carga se activa disminuyendo la corriente y enviándola en pequeñas cantidades hasta que la batería quede completamente cargada (MEER, 2010).

Además de proteger de la sobrecarga, el regulador previene el daño a las baterías por descarga rápida de éstas. Un relé ubicado en el regulador actúa como un interruptor automático que se activa desconectando la bomba antes que el voltaje de la batería baje de cierto umbral de voltaje y se desactiva cuando el voltaje de la batería sube hasta alcanzar un umbral de reconexión (Sampaio & Gonzalez, 2017). En relación, las baterías más comunes usadas en sistemas fotovoltaicos son las baterías de plomo-ácido, estas son recargables, fáciles de mantener, relativamente baratas, disponibles en varios tamaños y la mayoría resiste descargas diarias de hasta un 80% su capacidad nominal. En la tabla 11 se nombran algunos tipos de baterías usados en los sistemas de bombeo fotovoltaicos.

Tabla 11. Principales tipos de baterías (Gutierrez, 2002).

| Tipo de batería | Tiempo de recarga | Autodescarga por mes | N°. de ciclos | Capacidad (por tamaño) | Precio |
|---------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------|
| Plomo-acido | 8-16 horas | < 5% | Medio | 30-50 Wh/kg | Bajo |
| Ni-Cd (Niquel-Cadmio) | 1 hora | 20% | Elevado | 50-80 Wh/kg | Medio |
| Ni-Mh (Niquel-Metal hydride) | 2-4 horas | 20% | Medio | 60-120 Wh/kg | Medio |
| Li ion (ion Litio) | 2-4 horas | 6% | Medio-bajo | 110-160 Wh/kg | Alto |

Ahora bien, en los sistemas de bombeo solar con acoplamiento directo, la corriente generada en los paneles fotovoltaicos es enviada directamente a la bomba. Este sistema está diseñado para bombear agua sólo durante el día, la cantidad de agua bombeada depende directamente de la cantidad de luz solar incidente en los paneles y el tipo de bomba. Es decir, que si la intensidad de luz y el ángulo en el cual inciden en los paneles cambian durante el día, la cantidad de agua bombeada también va a cambiar (Dominguez, 2011).

Así pues, los sistemas de bombeo solar con acoplamiento directo se diseñan para almacenar agua extra en días soleados de manera que quede disponible para los días nublados y en la noche. El agua es almacenada en un estanque de regadío más grande de lo que se requiere o en un estanque de almacenamiento separado que luego alimenta por gravedad a los estanques de regadío más pequeños (Ochoa & Ortega, 2008). Un dispositivo flotante apaga la bomba cuando el estanque de almacenamiento está lleno y la prende cuando el estanque ha disminuido su nivel de agua por debajo de un umbral crítico (Barriga, 2012). La capacidad de almacenamiento de agua es

importante en este sistema de bombeo. Se requiere una capacidad de almacenamiento de dos a cinco días, dependiendo del clima y el uso que se le da al agua (Ochoa & Ortega, 2008).

La gran ventaja de este sistema es que es más simple y barato que un sistema de bombeo acoplado con baterías. Algunas desventajas de este sistema es que puede haber considerables pérdidas por evaporación si el agua es almacenada en estanques abiertos, además que el agua almacenada en el estanque puede congelarse en climas muy fríos (Gonzales & Sanchez, 2010).

La eficiencia de un sistema de bombeo acoplado directamente es sensible al enlace entre la bomba y el sistema fotovoltaico (Ramos, 2014). Los paneles fotovoltaicos producen un voltaje más o menos constante mientras la intensidad de la luz cambia durante el día; sin embargo, el amperaje cambia dramáticamente con la intensidad de la luz. Durante momentos de baja luz, el panel puede producir 30 Volts a 1 Ampere (Aqueveque, 2009) . El motor de la bomba necesita corriente para partir; sin embargo puede correr a un voltaje menor. Un controlador de poder intercambia voltaje por corriente, lo que le permite a la bomba partir y correr en periodos de baja intensidad de luz; un controlador puede incrementar la cantidad de agua bombeada de un 10 a un 15% (Barrio, 2016).

En conjunto, se resalta la importancia de la utilización de la energía fotovoltaica en los sistemas de bombeo de agua. Esto debido a que en los países de América Latina, unos de los principales problemas es el abastecimiento de agua en calidad que requieren las áreas del sector rural (Ospino & Isaza, 2016). Este suministro de agua está supeditado a la disponibilidad de las fuentes de energía, las cuales a su vez deben ser concordantes con la diversidad de condiciones sociales, culturales y económicas de los habitantes de algún sector (Toledo, 2013) .

Adicionalmente, a estas condiciones, se suma los problemas de la variabilidad del suministro de energía eléctrica , que hacen necesario la búsqueda de fuentes alternas de energía para el bombeo de agua, como tal es el caso del consumo de combustibles fósiles (Toledo, 2013). El uso de estos combustibles fósiles trae aparejado, una serie de problemas relacionados con el transporte, almacenamiento y distribución que incrementan el costo de su suministro, de ahí que el uso de las fuentes alternas de energía como la luz solar sean una alternativa idónea para la solución de esta problemática en el ámbito rural (Ochoa & Ortega, 2008).

7. METODOLOGIA

Metodología

Para el estudio y conocimiento de la importancia de la modelación matemática de paneles solares fotovoltaicos en sistemas de bombeo de agua para distritos de riego convencionales, se realizó una monografía de compilación, ya que se analizará y se redactará la información disponible respecto al tema.

Los pasos a desarrollar en esta monografía fueron.

- Elección del tema.
- Búsqueda de la información bibliográfica del tema.
- Selección de bibliografías del tema.
- Redacción. y análisis de la información.
- Lista de chequeo de los componentes de un sistema fotovoltaico para el bombeo de agua para riego
- Conclusiones
- Recomendaciones

Fuentes de información

Para la realización de la monografía “Importancia de la modelación matemática de paneles solares fotovoltaicos en sistemas de bombeo de agua para distritos de riego convencionales” se hará uso de fuentes de información secundaria, que permite sintetizar y reorganizar la información, entre las cuales se utilizaron bibliografías, libros, artículos, informes y documentos de organizaciones gubernamentales.

8. DESARROLLO DEL TEMA

Teniendo en cuenta la gran cantidad de investigaciones acerca de la aplicación de la energía fotovoltaica en muchos proyectos, tanto de vivienda como de desarrollo rural, el propósito de este trabajo es brindar una proyección de la eficiencia de los sistemas de bombeo fotovoltaicos en sistemas de riego. Esto con el fin de aportar en el desarrollo de las prácticas agrícolas de las poblaciones rurales.

Es importante destacar que en la actualidad disponer de este tipo de tecnologías es más fácil. Gracias a la globalización y a las grandes necesidades energéticas que afronta el planeta, la fabricación y demanda de paneles solares es cada vez mayor.

Por ende, el potencial de los sistemas de energía solar FV se ha demostrado en los proyectos de electrificación rural realizados en todo el mundo, en especial el de los sistemas solares domésticos (Velázquez, 2005). Crece la importancia económica de los sistemas fotovoltaicos gracias a la constante disminución de sus precios, así como por la experiencia en su aplicación en otros sectores, como los servicios sociales, económicos, agrícolas y otras actividades productivas capaces de repercutir significativamente en el desarrollo rural.

Según (Ladino, 2011) en su trabajo “La energía Solar Fotovoltaica Como Factor de Desarrollo en Zonas Rurales de Colombia. Caso: Vereda Carupana, Municipio de Tauramena, departamento de Casanare” la aplicación de la energía solar en zonas rurales es una gran oportunidad para aquellos habitantes que se encuentran en zonas aisladas y de difícil acceso, pues se benefician principalmente las viviendas rurales, los centros educativos y los centros de salud. Sin embargo la implementación de la energía fotovoltaica es de un costo elevado, el cual está fuera del alcance de los campesinos, ya que ellos no cuentan con un salario mensual. Así pues, para poder acceder a este tipo de energías es primordial la presencia del estado, con proyectos departamentales y municipales será más sencillo dar este gran beneficio al campo.

Otro punto muy importante, es el gran beneficio que prestan las energías fotovoltaicas para la agricultura, como se mencionó anteriormente, los sistemas de bombeo fotovoltaicos son clave a la hora de brindar agua potable tanto para consumo humano como para el riego de cultivos. Mas sin embargo, hoy en día muchas poblaciones no cuentan con este recurso y el nivel de las NBI es

muy alto, es en este tipo de situaciones, donde el ministerio de agricultura y desarrollo rural debe estar enfocados en poner en funcionamiento las energías alternativas para el desarrollo agrícola, puesto que en Colombia existe la ley 1715 del 13 de Mayo de 2014, la cual fomenta los proyectos relacionados con la aplicación de las energías renovables (energía solar, eólica, geotérmica, etc.) (Congreso De Colombia, 2014).

Mas sin embargo, Colombia y muchos de los países latinoamericanos poseen aun una gran dependencia del petróleo (37,5%) y algunos de sus derivados como el gas natural (USAID-UPME, 2016). Sin embargo, en este caso, las energías renovables representan una porción bastante grande, superior al 27% del suministro total de energía (UPME, 2015). Productos de energía hidroeléctrica (12,2%) y caña (7,4%) son las más importantes fuentes de energía renovables en este país (UPME, 2015). Por otro lado, la madera (6,1%) desempeña un papel importante puesto que es el combustible más utilizado en las zonas rurales, para la cocción de los alimentos y otros usos domésticos y agropecuarios (Ospino & Isaza, 2016).

Colombia es un país de gran potencial en energías renovables como la eólica, solar, geotérmica entre otras. Lastimosamente, en Colombia los proyectos a gran escala que se han implementado son financiadas por entidades o grupos privados (IEA, 2017). Por esta razón es necesario reforzar las políticas y leyes para que haya un mejor apoyo en la elaboración de proyectos solares que estén encaminados al beneficio de una población vulnerable principalmente los agricultores, quienes son los más afectados debido a que mucho no poseen servicios de agua potable y de energía eléctrica. Esto repercute en un bajo desarrollo agrícola debido a la ausencia de técnicas como el riego agrícola (Jiménez et al.,2010).

Así pues, el agua que se emplea en la actualidad para el riego de tierras agrícolas representa el 70% del consumo de este líquido a nivel mundial y se estima que el 60% de los alimentos extra requeridos para garantizar la alimentación mundial en el futuro tendrán que provenir de la agricultura bajo el área de riego. La seguridad alimenticia del mundo depende del mejoramiento de las técnicas de riego de los pequeños agricultores en países en vías de desarrollo (Andrade & Quispe, 2016), los cuales cultivan la mitad del área agrícola mundial; sin embargo el 80% carece de acceso a los servicios eléctricos.

Según los resultados del 3er Censo Nacional Agropecuario, en el 33,3 % de las Unidades Productoras Agropecuarias (UPA) con cultivos del área rural dispersa censada, los productores

declaran utilizar algún tipo de riego para el desarrollo de sus actividades agropecuarias, en contraste con el 66,7 % de UPA sin utilización de riego (DANE, 2014).

Cabe resaltar, que en los departamentos de Nariño, Tolima, Cauca, Santander, y Cundinamarca se encontró el 41,9 % de las UPA con cultivos del área rural dispersa censada, con utilización de riego (DANE, 2014). Mientras que, los departamentos de Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina, Guainía, Vaupés y Bogotá presentaron participaciones de menos de 0,3%. Entonces, por tamaño de la UPA, la mayor participación con utilización de riego se registró en UPA de 1.000 y más hectáreas. Según el análisis del 3er Censo Nacional Agropecuario, el 54,6 % de las UPA con cultivos que utilizan riego, se emplea en mayor cantidad el sistema de aspersión (DANE, 2014).

Para poder aplicar esta tecnología, se deben realizar planes de capacitación en el uso de este tipo de tecnologías, ya que muchos productores y campesinos se aferran a la cultura de sus regiones, impidiendo de alguna manera la introducción de nuevas tecnologías. Por esta razón, es importante que en cada departamento se hagan campañas y proyectos encaminados al uso de las energías alternativas.

Existe una relación natural entre la disponibilidad de energía solar y la necesidad de agua. La necesidad de agua es mayor durante los periodos calurosos en los que el sol brilla con más fuerza y el rendimiento de la matriz solar está al máximo, mientras que la necesidad de agua se reducirá en la época en que el tiempo es fresco y la luz del sol menos intensa (Guevara & Pérez, 2015). El agua se puede bombear durante el día y almacenarse en un depósito. De este modo, habrá agua disponible por la noche y durante los periodos nublados.

Actualmente la obtención de agua potable es de vital importancia y va estrechamente ligada al desarrollo humano. Paralelamente los costes económicos y ecológicos se incrementan, sobre todo si se utilizan energías fósiles no renovables para la producción eléctrica, actualmente los sistemas de bombeo solares son ideales para sustraer agua subterránea de forma limpia, rentable y autosuficiente. Las principales ventajas de estos sistemas son su mantenimiento prácticamente nulo y su larga vida útil.

Los sistemas de bombeo de agua a energía solar son muy comunes en los países desarrollados desde hace años y son la solución para los problemas de abastecimiento de agua en zonas rurales,

remotas, áreas alejadas. Debido a esto, es imprescindible desarrollar estos sistemas en el país, ya que la economía colombiana es netamente agrícola, es hora de impulsar especialmente a los pequeños productores, brindarles una mejor calidad de vida, acudiendo a la energía fotovoltaica.

Para poder aplicar esta tecnología, el agricultor debe tener a disposición la asistencia técnica adecuada ya que muchos productores y campesinos se aferran a la cultura de sus regiones, impidiendo de alguna manera la introducción de nuevas tecnologías. Por esta razón, es importante que en cada departamento se hagan campañas y proyectos encaminados al uso de las energías alternativas.

No obstante, para el uso de la energía fotovoltaica, existen herramientas computacionales, las cuales se basan en la modelación matemática. Desde este punto, se ha utilizado software como Matlab/Simulink para simular paneles solares, esto con el fin de conocer el comportamiento de la energía solar en cualquier región. Así pues, se aprovecha este tipo de tecnologías para simular la eficiencia de sistemas de bombeo alimentados con energía solar. Este tipo de sistemas son sumamente importantes en el sector agrícola, puesto que en muchas zonas el acceso al recurso hídrico es escaso y la radiación solar es alta. Es ahí, cuando es necesario un sistema de bombeo fotovoltaico, el cual brinda al usuario mayor facilidad en el uso del agua ya sea para sistemas de riego, para el ganado y para el consumo en la vivienda.

Es importante resaltar, que un sistema de bombeo fotovoltaico no requiere de mantenimiento, puesto que los paneles solares que lo alimentan tienen una durabilidad aproximada de 20 años, esto hace que un sistema cualquiera basado en la energía solar sea más eficiente y más económico a largo plazo. Claro está que para la utilización de estos sistemas en la agricultura, el uso de baterías no es el adecuado sino, que se debe instalar sistema de almacenamiento de agua, así se reducen costos y hace que el sistema sea más confiable y eficiente.

En definitiva, se debe concienciar a las nuevas generaciones en el mantenimiento del medio ambiente y dar una proyección del mejoramiento de la producción agrícola. Puesto que es el sector más importante a nivel mundial. Así pues, gracias a las diferentes innovaciones en un futuro, la agricultura será mucho más tecnificada, limpia y amigable con el ambiente. Además el sector energético se basará en las energías renovables (el sol, aire, mares, biomasa, etc). En conclusión la energía fotovoltaica es el futuro del mundo y un avance de la sociedad humana.

9. CONCLUSIONES

El uso de la modelación matemática permite estudiar la cantidad de energía que un panel fotovoltaico puede generar dependiendo de la cantidad de radiación emitida en cualquier zona del país.

Nariño posee los niveles de radiación suficientes para que un sistema solar fotovoltaico funcione de manera eficaz. Por esta razón la implementación de cualquier sistema fotovoltaico es de gran ayuda para la región, principalmente para el sector agrícola.

La implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico en las zonas más aisladas de Nariño, disminuirá el uso de combustibles fósiles y ayudara a la conservación del medio ambiente.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de este tipo de proyectos de generación de energía eléctrica con sistemas de generación no convencionales en zonas rurales aisladas, ya que la energía eléctrica generada es totalmente limpia y que su uso en las actividades agrícolas, ganaderas y electrificación rural trae mayor progreso económico y social a zonas de escasos recursos económicos.

Se recomienda el uso de herramientas computacionales como es el caso Matlab/Simulink los cuales simulan las condiciones y comportamientos de los paneles solares, esto nos garantiza el correcto funcionamiento de un sistema Solar para bombeo de agua con fines de riego.

Se recomienda la capacitación a las familias de la zonas rurales más aisladas, en la importancia y aplicación de los recursos que disponen como el recurso del agua y el recurso solar para proyectos tecnológicos como sistemas fotovoltaicos con fines de riego, bombeo, ganadero, electrificación rural.

BIBLIOGRAFIA

- ABB. (2015). Energía solar. *ABB Review*, 2, 76.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Abella, M. A. (2011). Sistemas Fotovoltaicos. *Ciemat*, 1(1), 59. Retrieved from http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf
- Adolfo, G., Correa, M., & Quintero, D. H. (2014). Sistemas de bombeo de agua con energías alternativas, 1–95.
- Andrade, J., & Quispe, M. (2016). Diseño y seleccion de un sistema eolico solar para la generaciion electrica que mejore el sistema de bombeo de agua con fines de riego en el centro poblado de Chinumani- Yungo, 2016. Universidad Nacional Del Altiplano. *Peru*, 1–84.
- ANES. (2013). R e n o v a b l e s. *Revista de Energias Renovables*.
- Aqueveque, E. (2009). Bombeo de agua para riego en Cerro Calán utilizando energía solar fotovoltaica, 115.
- Arencibia, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica. *redvet. Revista Electrónica de Veterinaria*, 17(9), 1–4. Retrieved from <http://www.veterinaria.org/revistas>
- Arroyave, A. A., Goetz, M. M., Arango, E. I., Ramos, C. A., & Serna, S. I. (2013). Plataforma de Modelado y Simulación de Sistemas de Generación Fotovoltaicos. *Tecno Lógicas*, 0(0), 137–149. <https://doi.org/10.22430/22565337.365>
- Auccacusi, D. (2014). Análisis técnico y económico para la selección del equipo óptimo de bombeo en Muskarumi - Pucyura - Cusco usando fuentes renovables de energía. Pontificia Universidad Catolica Del Peru.
- Barriga, R. (2012). Grandes sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua. Universidad Politécnica de Madrid Instituto de Energía Solar Trabajo Fin de Máster.

- Barrio, A. C. (2016). Diseño de Sistema de Bombeo Fotovoltaico para Riego en Bahir Dar (Etiopía). *Escola Superior de Tecnologia I Ciências Experimentals*, 188. Retrieved from <https://www.google.com>
- Basile, P. A. (2000). Un Modelo Matemático Morfológico Unidimensional Para Ríos Aluviales Pedro A. Basile. *Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales - FCEIA-UNR Riobamba 245 Bis. Rosario Argentina.*, 3.
- Brito, M. L., Alemán, I., Fraga, E., García, J. L., & Arias, R. I. (2011). Role of mathematical modeling in the training of engineers. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129–139. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3705129&info=resumen&idioma=ENG>
- Cabrera, I., & Montiel, R. (2003). Celdas Fotovoltaicas para Energizar un Sistema de Bombeo de Agua. Universidad Autonoma Metropolitana Iztapalapa.
- Campen, D. G., & G. Best. (2010). Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles. Documento de Trabajo Sobre Medio Ambiente Y Recursos Naturales, No. 3 FAO, (3), 93. <https://doi.org/www.fao.org/sd/spdirect/SPdocuments/fVfulltext.pdf>
- Carmona, O. et al., Vidal, A., Martínez, A., Conde, J., & Tinoco, J. (2016). Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda. *QUID: Investigación, Ciencia Y Tecnología*, ISSN-E 2462-9006, ISSN 1692-343X, N°. 26, 2016, Págs. 29-38, (26), 29–38.
- Castro, A., Algarín, C., & Pabón, A. (2014). Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial, *XXXV*, 225–233.
- Cervantes, J. (2009). Estudio de sistemas de bombeo fotovoltaicos. *Centro Nacional de Investigacion Y Desarrollo Tecnológico*, 108.
- Checa, F., & De La Cruz, O. (2012). Potencial Natural para el Desarrollo Fotovoltaico en Colombia. *Editorial Unimar*, 52–59. Retrieved from <http://www.umariana.edu.co/ojs-editorial/index.php/libroseditorialunimar/article/view/706>
- Congreso De Colombia. (2014). LEY 1715 Mayo de 2014. Presidencia de La Republica, (May), 26. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

- Corpoema. (2010). Formulación De Un Plan De Desarrollo Para Las Fuentes No Convencionales De Energía En Colombia (PDFNCE), 1–382.
- Cossu, M., Ledda, L., Urracci, G., Sirigu, A., Cossu, A., Murgia, L., ... Yano, A. (2017). An algorithm for the calculation of the light distribution in photovoltaic greenhouses. *Solar Energy*, *141*, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.024>
- DANE. (2014). Censo Nacional Agropecuario: Sexta entrega de resultados 2014 - Cifras definitivas, 29. https://doi.org/http://www.indec.mecon.ar/agropecuario/cna_principal.asp
- De las Heras, M. (2014). Montaje eléctrico y electrónico en instalaciones solares fotovoltaicas.
- Dominguez, A. C. (2011). Proyecto de Sistema de Bombeo Fotovoltaico a Deposito, Para Consumo Humano y Abrevadero, en Gurmudele, Etiopia. Universidad Internacional de Andalucía, (2009).
- Domínguez Gómez, J. A. (2010). Energías alternativas. *Vasa*, (14), 121. <https://doi.org/1-4135-9021-7>
- Enseñat Beso, J. M., Martínez Busto, C., Ahedo Valdivielso, J., Romero Ramos, M. Á., Serra Maria-Tomé, L., Romero Salvachúa, F., ... Melchor González, S. (2007). Energía solar Térmica y fotovoltaica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 70. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Escobar, I. (2013). Estudio Técnico - Económico Para La Implementación Masiva De Sistemas Solares Fotovoltaicos Para Los Estratos Cinco Y Seis De La Ciudad De Cali. Universidad Autónoma de Occidente, 1–118.
- FAO. (2011). Perspectivas para el medio ambiente Agricultura y medio ambiente. *Agricultura Mundial : Hacia Los Años 2015 / 2030 Informe Resumido*, 75–81.
- FAO. (2015). Resumen. *Agricultura Mundial : Hacia Los Años 2015 / 2030 Informe Resumido*, 1–10.
- Fernández, J. (2011). Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil. U Carlos III Madrid, 146.
- Fernandez, M. (2007). *Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica*.

- Gálvez, G., Sigarrosa, A., López, T., & Fernández, J. (2010). Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos. *Cultivos Tropicales*, 31(3), 60–65. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193217921012>
- Gasca, E. C. A. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física*, 79(Energías alternativas), 75–84. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971010>
- Giraudy, C., Massipe, I., Rodriguez, R., Gámez, M., & Vásquez, A. (2014). Factibilidad de instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a red Feasibility of installation of connected photovoltaic systems to grid. *Ingeniería Energética*, XXXV(2), 141–148.
- Gomez, D. (2016). Bombeo solar Lorentz : aplicaciones adaptadas al futuro, 32–33.
- Gonzales, D., & Sanchez, M. (2010). Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 150.
- Granda, E. E., Orta, O. A., Díaz, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). Modelado y Simulacion de Celdas y Paneles Solares. ISSN:1405-2172. *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013*, (October), 17–22. <https://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968>
- Guasch, M. D. (2003). Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. Universidad Politecnica de Cataluña, 223.
- Guevara, C. Y., & Pérez, M. L. (2015). Análisis de viabilidad del suministro de energía eléctrica a la granja la fortaleza ubicada en Melgar – Tolima mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico. *instname:Universidad Libre*.
- Gutierrez, M. (2002). Manual de instalacion y mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos. Proyecto de Trabajo Comunal Universitario: Soluciones Energéticas Para La Vida Cotidiana.
- IEA. (2017). World Energy Outlook 2017. International Energy Agency. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(73\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(73)90024-4)
- Ladino, R. E. (2011). La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de

- Colombia. Caso: vereda Carupana, municipio de Tauramena, departamento de Casanare. Pontificia Universidad Javeriana. Bogota, D.C., Marzo 2011, 1–136. Retrieved from <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/1085/1/LadinoPeraltaRafaelEduardo2010.pdf>
- Lopez, A. (2006). Fabricación de módulos solares fotovoltaicos. Situación actual y perspectivas. *Siliken, Aprovechando El Sol.*, 4–5.
- López Torres, V. G., Alcalá Álvarez, M. del C., & Moreno Moreno, L. R. (2012). La cadena de suministro de la energía solar. *ConCiencia Tecnológica*, (43), 18–23. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3985050&info=resumen&idioma=ENG>
- Martinez, C. (2013). Energía Solar Fotovoltaica. *Agenergía*, 8. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01097-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01097-2)
- Masson, G., Latour, M., Rekinge, M., Theologitis, T., & Papouts, M. (2017). Global market outlook for photovoltaics 2013 -2017. European Photovoltaic Industry Association EPIA, 60. Retrieved from <http://www.fotovoltaica.com/fv-look.pdf>
- MEER. (2010). Manual de uso y mantenimiento del sistema solar fotovoltaico comunitario programa Euro - Solar, 29–35.
- MEISTER. (2013). Instruments to support FNCER in Colombia: International perspective. MEISTER Consultants Group.
- Mendez, J. M., & Cuervo, R. (2007). Energía Solar Fotovoltaica. *ECA Instituto de Tecnología Y Formación S.A.U.*, 15–169.
- Montero, A., Pérez, J., & Rojano, R. (2017). Medidas de adaptación al cambio climático en una comunidad indígena del norte de Colombia. *Actualidad Y Divulgación Científica*, 20(187–197), 187–197.
- Müller, M., Bründlinger, R., Arz, O., Miller, W., Schulz, J., & Lauss, G. (2014). PV-off-grid hybrid systems and MPPT charge controllers, a state of the art analyses. *Energy Procedia*, 57, 1421–1430. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.133>
- Murcia, H. R. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas

- Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects. *Revista de Ingeniería*, 28, 83–89. <https://doi.org/ISSN.0121-4993>
- Ochoa, R., & Ortega, C. (2008). Sistemas fotovoltaicos para el bombeo de agua. *Claridades Agropecuarias*.
- Ochoa y Mesa, Y. (2011). Modelación Matemática en la Historia de las Matemáticas. Una mirada al concepto de Función Cuadrática, (March 2016), 8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3942.0568>
- Orbegozo, C., & Arivilca, R. (2010). Energía Solar Termica. La Diferencia Entre Célula, Módulo, Arreglo Y Sistema Solar, 1–61. Retrieved from <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2010/12/30/la-diferencia-entre-celula-modulo-arreglo-y-sistema-solar/>
- Orbes, J. A., & Vallejo, W. A. (2013a). Investigación exploratoria de sistemas de energía eléctrica renovable orientada a la búsqueda de soluciones energéticas en el departamento de Nariño.
- Orbes, J. A., & Vallejo, W. A. (2013b). Investigación exploratoria de sistemas de energía eléctrica renovable orientada a la búsqueda de soluciones energéticas en el departamento de nariño. Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electronica.
- Ospino, V. M., & Isaza, L. (2016). Manual De Implementacion De Energia Solar Fotovoltaica En Viviendas “Eco.” Univesidad Catolica de Colombia. Bogotá D.C, 1–76.
- Posso, F. (2002). Energía y ambiente : pasado , presente y futuro . Parte dos : Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*. Universidad de Los Andes, 7, 54–73. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo>.
- Practical Action. (2010). Bombeo de agua mediante energía solar fotovoltaica. The Schumacher Centre for Technology and Development, 44(871954), 11.
- Prat, L. (2011). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos. Universidad Nacional Del Altiplano. *PUNO-PERU*.
- Ramos, B. (2014). Modelo del generador de un sistema de bombeo fotovoltaico. Universidad

Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

- Rengifo, Y. S. (2008). Modelamiento matemático aplicado al modelamiento espacial. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia. Retrieved from <http://www.sociedadelainformacion.com/14/modelamiento.pdf>
- Robles, J. (2010). Energías Renovables, 25 años de la UNAM en Temixco, 1–247.
- Roldan, J., Jiménez, M., Arellano, R., & Pérez, M. (2010). Irrigation water management improvement using performance irrigation indicators | Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1).
- Sampaio, P., & Gonzalez, M. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(June 2016), 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Sanchez, C., Rodriguez, J., & Fulton, M. (2015). Análisis Matemático De Un Panel Solar Fotovoltaico De Silicio. Tesis Previa a La Obtencion Del Titulo De Ingeniero Eléctrico, 113. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>
- Sanjuan Cigales, J. (2013). Estudio y simulación de un sistema fotovoltaico de conexión a red, 88.
- Sawin, J., Sverrisson, F., & Leidreiter, A. (2016). Renewable energy and Sustainable development accounting for impacts on the path to 100% RE, *I2(37)*, 28–40. Retrieved from https://www.worldfuturecouncil.org/file/2016/08/WFC_2016_Renewable-Energy-and-Sustainable-Development.pdf
- SIMEC. (2010). Proyecto Simec Chile SRL. Grupo Simec Chile *SRL*, 1, 138. Retrieved from https://www.unglobalcompact.org/system/attachments/8146/original/Proyecto_Simec_Chile.pdf?1287789602
- Smith, D. P., van Kampen, P., Salamanca Céspedes, J. E., Xiong, H., Bao, S., Sayer, J., ... Hargutt, V. (2015). Celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistemas de paneles solares del cubesat Colombia 1. *Journal of Safety Research*, 3(2), 89–93. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2015.06.012>

- Solis, J. (2012). Física de Celdas Fotovoltaicas. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú, 42. Retrieved from http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2012/12/III_Jsolis1.pdf
- Tello, N. y, & Peña, J. (2013). Modelos matemáticos de la sociedad y aplicaciones. Introducción. Universidad Nacional Autónoma de México Y Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología, México, 24.
- Toledo, C. A. (2013). Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia. Retrieved from <http://repositorio.upct.es/handle/10317/3780>
- Ulloa, J. T., & Rodríguez, J. A. (2013). La modelación matemática como puente entre el conocimiento científico y el matemático. *Revista Electronica de Veterinaria*, 14(2).
- UNEF. (2016). Informe Anual 2016. Unión Española Fotovoltaica, 100. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2013.07.003>
- UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- UPME. (2017). Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022. Una realiad y oportunidad para colombia. Ministerio de Minas Y Energía de Colombia Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 157. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- UPME - IDEAM. (2005). Apéndice C. Atlas de Radiación Solar de Colombia, 1–5.
- USAID-UPME. (2016). Invierta y Gane con Energía, Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014, 34.
- Vasconcelos, P., & Aguirre, M. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.02.081>

Velázquez, G. (2005). Cambio Climático Y Protocolo De Kioto. Ciencia Y Estrategias. Compromisos Para España, 191–201. Retrieved from <http://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion5.pdf>

Zahedi, A. (2006). Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. *Renewable Energy*, 31(5), 711–718. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.007>