

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
Y SISTEMAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“ANÁLISIS Y MODELAMIENTO PARA UN MÓDULO  
FOTOVOLTAICO, BASADO EN UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE  
ENERGÍA RENOVABLE MICROGRID EN LA CIUDAD DE PUNO”**

**TESIS**

PRESENTADO POR:

**Wilmer SAGUA MAMANI**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

PUNO – PERÚ

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO PARA UN MÓDULO FOTOVOLTAICO,  
BASADO EN UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA  
RENOVABLE MICROGRID EN LA CIUDAD DE PUNO**

TESIS PRESENTADA POR:  
WILMER SAGUA MAMANI  
PARA OPTAR EL TÍTULO DE PROFESIONAL:  
INGENIERO ELECTRÓNICO.



APROBADA POR EL JURADO REVISOR, CONFORMADO POR:

PRESIDENTE :   
Mg. Ing. TEOBALDO RAUL BASURCO CHAMBILLA.

PRIMER MIEMBRO :   
Ing. FERDINAND EDGARDO PINEDA ANCCO.

SEGUNDO MIEMBRO :   
Ing. MARCELINO GALINDO VELASQUEZ.

DIRECTOR DE TESIS :   
Dr. MARCO ANTONIO QUISPE BARRA.

Puno – Perú  
2017

Área: Automatización e Instrumentación.  
Tema: Aplicaciones Energéticas.

**Dedicatoria.** *A las personas que más quiero, en esta vida corta que aún llevo.*

**Wilmer SAGUA MAMANI**

Junio, 2017.

**Agradecimiento.** *A mis padres por su comprensión y apoyo a este proyecto; que a lo largo de mi vida me ha demostrado su amor y su humildad, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.*

*Estamos convencidos de que es prácticamente imposible llevar a cabo y completar un proyecto como éste sin el estímulo, orientación y asistencia de una multitud de amigos, familiares y compañeros de trabajo. Finalmente, a Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida universitaria. Por ser la fuerza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias; y sobre todo por la felicidad de mi persona.*

Wilmer SAGUA MAMANI

Junio, 2017.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	13
<b>ABSTRACT</b> .....	14
<b>CAPÍTULO I</b> .....	15
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
1.1. Planteamiento del problema de investigación. ....	18
1.2. Antecedentes de la investigación. ....	19
1.3. Justificación del problema. ....	21
1.4. Importancia y utilidad del estudio. ....	22
1.5. Objetivos de la investigación. ....	23
1.5.1. Objetivo general. ....	23
1.5.2. Objetivos específicos. ....	23
<b>CAPÍTULO II</b> .....	24
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	24
2.1. Marco teórico. ....	24
2.1.1. La energía. ....	24
2.1.2. Fuentes de energía .....	24
2.1.3. Principales fuentes de energía renovable. ....	25
2.1.4. La energía solar. ....	26
2.1.5. Geometría Tierra – Sol. ....	28
2.1.6. Radiación solar terrestre. ....	30
2.1.6.1. Potencial solar. ....	30
2.1.6.2. Radiación solar. ....	32
2.1.6.3. Radiación del cuerpo negro. ....	33
2.1.6.4. Espectro solar. ....	35
2.1.6.5. Horas pico solar (PSH). ....	36
2.1.6.6. Masa de aire (AM). ....	37
2.1.7. La unión P – N. ....	38
2.1.7.1. Semiconductores. ....	38
2.1.7.2. Electrones y huecos. ....	39

2.1.7.3. Semiconductores tipo – P y tipo – N.....	40
2.1.7.4. Formación de una unión P – N.....	42
2.1.8. Principio de operación de una célula solar.....	43
2.1.9. Célula solar.....	46
2.1.9.1. Estructura de la célula solar.....	47
2.1.9.2. Corriente fotogenerada.....	48
2.1.9.3. El efecto fotoeléctrico.....	49
2.1.10. Características eléctricas de una célula solar.....	49
2.1.10.1. Circuito equivalente modelo ideal.....	50
2.1.10.2. Circuito equivalente modelo estándar.....	52
2.1.10.3. Parámetros eléctricos de una célula solar.....	54
2.1.11. El módulo solar fotovoltaico.....	59
2.1.11.1. Asociación en serie.....	60
2.1.11.2. Asociación en paralelo.....	60
2.1.11.3. Parámetros externos que afectan las características eléctricas.....	61
2.1.12. Sistema fotovoltaico.....	64
2.1.12.1. El generador solar fotovoltaico.....	65
2.1.12.2. Regulador de carga.....	67
2.1.12.3. El inversor.....	68
2.1.12.4. Baterías.....	70
2.1.13. Generación distribuida y microgrids.....	72
2.1.13.1. Energías renovables.....	74
2.1.13.2. Microgrid.....	75
2.2. Hipótesis de la investigación.....	77
2.2.1. Hipótesis general.....	77
2.2.2. Hipótesis específicas.....	77
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>78</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>78</b>
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	78
3.2. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	78

3.3. Procedimiento y análisis de datos .....	79
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	80
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	80
4.1. Resultados.....	80
4.1.1. Modelamiento de la radiación del cuerpo negro.....	80
4.1.2. Modelamiento del espectro solar. ....	81
4.1.3. Modelamiento de radiación solar en una superficie horizontal.....	84
4.1.4. Demostración de las ecuaciones para el modelamiento matemático para una célula solar.....	85
4.1.5. Modelamiento de una célula solar en condiciones (STC). ....	88
4.1.6. Comportamiento de la curva $I - V$ , $P - V$ ; por la variación de la irradiancia solar.....	89
4.1.7. Comportamiento de la curva $I - V$ , $P - V$ ; por la variación de la temperatura.....	90
4.1.8. Comportamiento de la curva $I - V$ , $P - V$ ; por efecto de sombreado parcial.....	92
4.1.9. Modelamiento de módulo fotovoltaico de 100W (GUIDE).....	99
4.1.10. Modelo de sistema fotovoltaico para una microgrid. ....	102
4.2. Discusión.....	106
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	107
<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	108
<b>VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109
<b>ANEXOS</b> .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 01:</b> Potencial físico de energías renovables.....	16
<b>Figura 02:</b> Capacidad instalada anual de energía solar PV del 2005 – 15,.....	17
<b>Figura 03:</b> El Sol.....	27
<b>Figura 04:</b> La órbita de la Tierra y la declinación en diferentes .....	29
<b>Figura 05:</b> Atlas mundial de irradiancia solar promedio (kWh/m <sup>2</sup> /día).....	30
<b>Figura 06:</b> Atlas solar. ....	31
<b>Figura 07:</b> Espectro de radiación solar.....	33
<b>Figura 08:</b> El espectro del cuerpo negro a 6000K, calculado .....	34
<b>Figura 09:</b> El espectro del cuerpo negro en 3 diferentes temperaturas.....	35
<b>Figura 10:</b> Diferentes espectros solares: 6000K, AM0 y AM1.5. ....	35
<b>Figura 11:</b> Distribución de la irradiancia solar (W/m <sup>2</sup> ) a lo largo del día (PSH). .....	36
<b>Figura 12:</b> Masa de aire. ....	37
<b>Figura 13:</b> Intervalos de banda de una serie de semiconductores. ....	39
<b>Figura 14:</b> Semiconductores intrínsecos: Electrones libres y huecos.....	39
<b>Figura 15:</b> Semiconductor tipo – n. Los átomos donantes liberan.....	41
<b>Figura 16:</b> El semiconductor tipo – p. Los átomos aceptores atrapan.....	42
<b>Figura 17:</b> Formación de una región carga – espacio, cuando el.....	43
<b>Figura 18:</b> Silicio dopado.....	44
<b>Figura 19:</b> Diagrama de banda de una estructura célula solar .....	45
<b>Figura 20:</b> Comparación de Parámetros entre Si y Ga.....	45
<b>Figura 21:</b> Estructura física de célula solar.....	48
<b>Figura 22:</b> Efecto fotovoltaico. ....	49
<b>Figura 23:</b> Circuito equivalente de célula solar (modelo ideal). ....	50
<b>Figura 24:</b> Circuito equivalente para una célula solar (modelo estándar).....	52
<b>Figura 25:</b> Curva característica I–V (Rojo) y P–V (Azul) de un módulo PV. ....	57
<b>Figura 26:</b> Variación de R <sub>s</sub> y R <sub>Sh</sub> en la curva I–V en una célula solar. ....	59
<b>Figura 27:</b> (A) tres celdas solares conectados en serie, (B) conexión de tres. 61	

<b>Figura 28:</b> Curva I – V, para distintos valores de irradiancia, .....	62
<b>Figura 29:</b> Curva I – V, Influencia de la temperatura en una .....	63
<b>Figura 30:</b> Conexión diodo bypass. ....	66
<b>Figura 31:</b> Esquema de un inversor monofásico con topología VSI. ....	68
<b>Figura 32:</b> Dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica. ....	72
<b>Figura 33:</b> Importancia e incremento del desarrollo de las nuevas tecnologías. .....	73
<b>Figura 34:</b> Demanda de energía renovables en los próximos años. ....	74
<b>Figura 35:</b> Arquitectura elemental de una microgrid. ....	75
<b>Figura 36:</b> Radiación del cuerpo negro, modelado en Matlab. ....	81
<b>Figura 37:</b> Espectro solar de energía, comparación de AM0, AM1.5G .....	82
<b>Figura 38:</b> Espectro AM0, modelado en Matlab. ....	83
<b>Figura 39:</b> Espectro AM1.5G expresados en términos fotones .....	83
<b>Figura 40:</b> Radiación solar diaria para Puno, modelado en Matlab. ....	84
<b>Figura 41:</b> Medición de parámetros eléctricos para célula solar, en módulo PV modelo BW_L1 - 20W. ....	86
<b>Figura 42:</b> Curva característica I – V. de célula solar, modelado en Matlab. ....	88
<b>Figura 43:</b> Efecto irradiancia (G), curvas I – V, P – V de un módulo PV, .....	90
<b>Figura 44:</b> Efecto temperatura, curvas características de un módulo PV, .....	91
<b>Figura 45:</b> Protección de células solares con diodos bypass. ....	93
<b>Figura 46:</b> Conexión de células solares con diodos bypass. ....	94
<b>Figura 47:</b> Modelo propuesto y desarrollado en Simulink; efecto sombra. ....	95
<b>Figura 48:</b> Curvas I – V, P – V módulo PV sin sombra, G = 1000W/m <sup>2</sup> . ....	96
<b>Figura 49:</b> Curva I – V & P – V, con sombra G (W/m <sup>2</sup> ) = 1000, 800, 600 .....	97
<b>Figura 50:</b> Curvas características I – V & P – V, con sombra G (W/m <sup>2</sup> ) .....	98
<b>Figura 51:</b> La curva normal I – V (azul), y curva P – V (rojo). ....	99
<b>Figura 52:</b> Curvas Características I – V, P – V. ....	101
<b>Figura 53:</b> Esquema sistema microgrid. ....	103
<b>Figura 54:</b> Señales de salida del sistema microgrid. ....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 01:</b> Fuentes de energía.....	25
<b>Tabla 02:</b> Fuentes de energía renovables. ....	25
<b>Tabla 03:</b> Radiaciones del Sol. ....	28
<b>Tabla 04:</b> Propiedades del Silicio.....	46
<b>Tabla 05:</b> Clasificación de células solares fotovoltaicas. ....	47
<b>Tabla 06:</b> Relación material y eficiencia módulo fotovoltaico.....	57
<b>Tabla 07:</b> Valores típicos de coeficiente de temperatura para células de c-Si.64	
<b>Tabla 08:</b> Características de los principales tipos de baterías.....	70
<b>Tabla 09:</b> Comparación entre red eléctrica convencional y microgrid.....	76
<b>Tabla 10:</b> Valores obtenidos para célula solar.....	88
<b>Tabla 11:</b> Valores obtenidos para el módulo PV (Variación de Irradiancia).....	90
<b>Tabla 12:</b> Valores obtenidos para el módulo PV (Variación de Temperatura). 92	
<b>Tabla 13:</b> Valores obtenidos para el módulo PV (Por Sombreado Parcial). ....	97
<b>Tabla 14:</b> Valores obtenidos para el módulo PV (Por Sombreado Parcial). ....	98
<b>Tabla 15:</b> Valores obtenidos para el módulo PV, en condiciones STC.....	100
<b>Tabla 16:</b> Valores obtenidos para el módulo PV, en condiciones normales. .	102

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo “A”:</b> Código de la ley de Plank. ....	112
<b>Anexo “B”:</b> Código del espectro solar. ....	112
<b>Anexo “C”:</b> Código del espectro solar AM0. ....	113
<b>Anexo “D”:</b> Código del espectro solar AM1.5. ....	113
<b>Anexo “E”:</b> Código de la curva de insolación solar. ....	113
<b>Anexo “F”:</b> Código de curva I - V y P - V de célula solar. ....	114
<b>Anexo “G”:</b> Código para curva de módulo PV, por la variación de irradiación solar y temperatura. ....	115
<b>Anexo “H”:</b> Código para curva característica interactiva del módulo fotovoltaico. ....	116
<b>Anexo “I”:</b> Descripción del módulo solar, para pruebas de célula solar. ....	119
<b>Anexo “J”:</b> Descripción del Data Sheet, para realizar pruebas de simulación acorde al modelo matemático. ....	120
<b>Anexo “K”:</b> Descripción del módulo solar, en plena prueba de las células solares. ....	121
<b>Anexo “L”:</b> Descripción del atlas del Perú, irradiación solar y temperatura. .	122
<b>Anexo “M”:</b> Datos de temperatura y radiación solar. ....	123

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- AM** : Masa de Aire.
- ASTM**: American Society for Testing and Materials.
- c-Si** : Silicio Cristalino.
- DC-AC**: Corriente Directa a Corriente Alterna.
- DC-DC**: Corriente Directa a Corriente Directa
- DERs** : Recursos Energéticos Distribuidos.
- DG** : Generación Distribuida.
- G** : Irradiancia Solar
- Isc** : Corriente a Corto Circuito.
- IEEE** : Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- I – V** : Corriente – Voltaje.
- kWh** : Kilo Watt Hora.
- Li - ion**: Iones de Litio
- MPP** : Punto Máximo de Potencia
- MPPT**: Seguidor del Máximo Punto de Potencia.
- Ni-Cd** : Níquel – Cadmio.
- Ni-MH**: Níquel – Hidruro Metálico.
- NOCT**: Temperatura de Operación Nominal de la Célula.
- P – N** : Semiconductor Tipo P y Tipo N.
- PSH** : Horas Pico Solar.
- PV** : Fotovoltaico.
- P – V** : Potencia – Voltaje.
- PWM** : Modulación por Ancho de Pulso.
- SOC** : Estado de Carga.
- STC** : Condiciones de Prueba Estándar.
- T** : Temperatura.
- Voc** : Voltaje a Circuito Abierto.
- W/m<sup>2</sup>** : Watts por Metro Cuadrado.

## RESUMEN

La presente investigación desarrollada propone analizar el comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico, a partir de un modelo matemático y como consecuencia se obtiene sus parámetros eléctricos y su posterior integración a una microgrid; ante la escasez de energía en nuestro medio; se pretende suplir esta necesidad mediante módulos fotovoltaicos ya que nuestra zona goza de gran un potencial solar. Se comienza con un simple análisis del circuito equivalente de una célula solar, del cual se obtiene un modelo matemático de esta; la ecuación característica está ligada directamente a la corriente que puede producir la célula solar y por ende un módulo fotovoltaico, el modelo es diseñado para tomar distintos valores de entrada, teniendo a la irradiación solar y temperatura como principales referentes al modelo matemático; se hace una simulación del comportamiento eléctrico para el módulo fotovoltaico el cual fue desarrollado en el software MATLAB/Simulink. A la salida del modelo se muestran las curvas características corriente – voltaje y potencia – voltaje. Debido a la variación de la irradiancia solar, temperatura y las condiciones de sombreado parcial que recaen sobre el módulo fotovoltaico; la energía generada por este cambia drásticamente, lo que impone la necesidad de analizar un sistema fotovoltaico completo para obtener la potencia máxima bajo estas condiciones, con el modelo del módulo fotovoltaico ya validado, se plantea el estudio de operación de una microgrid. El modelo es un instrumento útil para hacer el análisis de diferentes módulos fotovoltaicos existentes en el mercado, simular los principales elementos de un sistema fotovoltaico, también permite analizar el mejor aprovechamiento de los recursos renovables con la que cuenta nuestra zona.

**Palabras Clave (Keywords):** Modelamiento, Célula Solar, Módulo Fotovoltaico, Energía Renovable, Microgrid.

## ABSTRACT

The present research proposes to analyze the physical behavior of a photovoltaic module, from a mathematical model and as a consequence, its electrical parameters and its subsequent integration to a microgrid; Given the scarcity of energy in our environment; Is necessary to supply this need through photovoltaic modules as our area enjoys great solar potential. It begins with a simple analysis of the equivalent circuit of a solar cell, from which we obtain a mathematical model of this; the characteristic equation is directly linked to the current that can produce the solar cell and therefore a photovoltaic module, the model is designed to take different input values, with solar irradiation and temperature as main referents to the mathematical model; it becomes a simulation of the electric behavior for the photovoltaic module was made which was developed in MATLAB/Simulink software. At the output of the model are shown the curves characteristic current - voltage and power – voltaje. Due to the variation of the solar irradiance, temperature and the partial shading conditions that fall on the photovoltaic module; the energy generated by it changes drastically, which imposes the need to analyze a complete photovoltaic system to obtain the maximum power under these conditions, with the model of the already validated photovoltaic module, the study of operation of a microgrid. The model is a useful tool to analyze different photovoltaic modules in the market, to simulate the main elements of a photovoltaic system, also allows us to analyze the best use of renewable resources with our area.

**Keywords:** Modeling, Solar Cell, Photovoltaic Module, Renewable Energy, Microgrid.

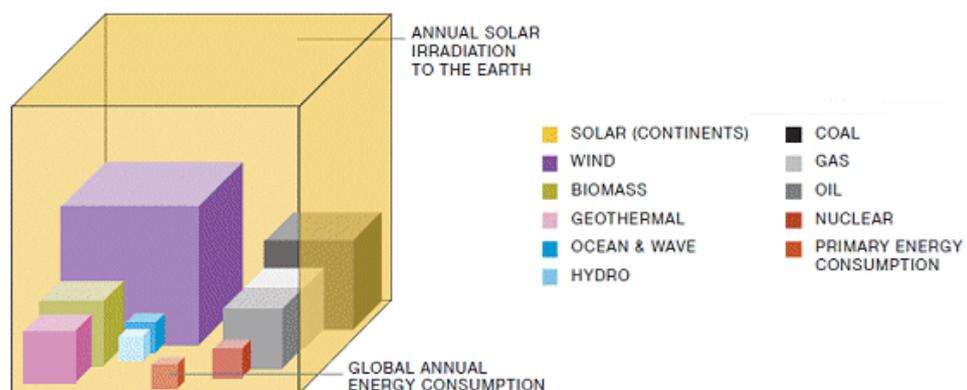
## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

La presente tesis está enmarcada en problemas actuales de repercusión mundial. Cada día se registran altos niveles de contaminación en el medio ambiente, esto se debe principalmente a la generación de energía mediante métodos convencionales, los cuales generan altas cantidades de CO<sub>2</sub>, esto afecta irremediablemente a la capa de ozono de nuestra atmósfera. El cambio climático mundial ha instado a la utilización de fuentes de energía renovables en todo el mundo. También esto ha sido impulsado por la de escasez y el aumento de los precios de los combustibles fósiles.

Los desafíos del Perú al 2020 tras ratificar el Protocolo de Kyoto, incentiva activamente la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante una bonificación por tonelada de CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) no emitida. Asimismo, mediante el Decreto Legislativo N°1002-2007 declara de interés nacional y necesidad pública el desarrollo de nueva generación eléctrica mediante el uso de Recursos Energéticos Renovables. Define a los RER como los recursos energéticos tales como la Solar, Eólico, Biomasa, Geotérmico y Mareomotriz. Señala que la energía Hidráulica será considerada como generada a partir de RER (Recursos Energéticos Renovables) cuando la capacidad instalada no sobrepase los 20MW (Tamayo, 2017).

Durante los últimos años, la tecnología y la producción de energía renovable han mejorado y, por ende, se produce electricidad a una mayor escala, las necesidades energéticas actuales de la humanidad, bien pueden ser suplidas por energías renovables. Y si pensamos a futuro, hay una gran disponibilidad de energía proveniente de fuentes renovables capaz de abastecer las necesidades actuales de energía (Tamayo, 2011).



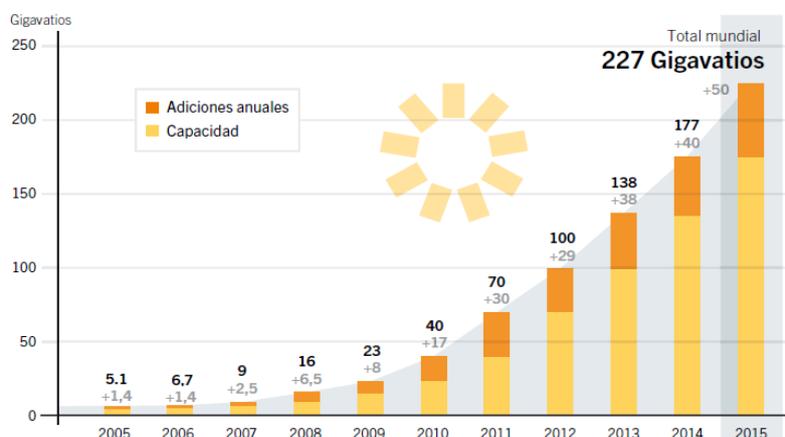
**Figura 01:** Potencial físico de energías renovables.

Fuente: EPIA – Greenpeace (2011).

El 2016 fue un año notable para la energía renovable, pues contó con las mayores incorporaciones de capacidad mundial vistas hasta la fecha. Sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico. En este año se observaron diversos avances que influyeron en la energía renovable, incluyendo una dramática disminución en los precios de los combustibles fósiles a nivel mundial; una serie de anuncios respecto a la disminución más sustancial en la historia de los precios en contratos a largo plazo de energía renovable; un aumento significativo de atención en la acumulación de energía; y un acuerdo histórico sobre el clima que reunió en París a toda la comunidad mundial.

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada. En consecuencia, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida (REN21, 2016).

La energía solar fotovoltaica en particular es una fuente de energía renovable y, por tanto, inagotable, limpia y se puede aprovechar en el mismo lugar en que se produce (auto gestionada).



**Figura 02:** Capacidad instalada anual de energía solar PV del 2005 – 15, a nivel mundial.

Fuente: REN21 (2016).

Alrededor del mundo, los sistemas convencionales de energía se enfrentan a los problemas de la gradual reducción de los combustibles fósiles. Estos problemas han llevado a una nueva tendencia de generación de potencia localizada en el nivel del voltaje de distribución usando fuentes de energía renovables y no convencionales tales como el gas natural, biogás, eólica, células solares fotovoltaicas, sistemas de ciclo combinado (CHP), micro-turbinas y su integración dentro la red de distribución. Este tipo de generación de potencia es llamada: Generación Distribuida (DG) y sus fuentes de energía son llamados como fuentes de energía distribuidas (Hatzigryriou, 2014).

El término Smartgrid ha sido usado para describir un amplio rango de tecnologías, concepto de diseño y prácticas operativas que colectivamente pintan una emocionante pintura de como nuestra infraestructura de transmisión eléctrica será en unos 10 ó 20 años. Sin embargo, los costos de desarrollo e implementación de las Smartgrid son muy elevados, imposible

para un país en vías de desarrollo y mucho menos para nuestro país. Ante esto, están las microgrids; una opción menos costosa, que involucra menores valores de potencia de generación, almacenamiento y consumo; con el que se pueden desarrollar, adaptar, innovar y proponer tecnologías locales que incluso, puedan servir para las smartgrid.

Una microgrid, es una red eléctrica a pequeña escala, el cual puede funcionar independientemente (autónomo); o en conjunción con la red eléctrica principal del área. Se caracteriza principalmente por que se alimenta de energías renovables y puede suministrar energía a una comunidad pequeña, tales como urbanizaciones, o al sector industrial; y como propósitos tiene la reducción del coste de la energía. Por lo tanto, es una buena solución a la escasez de la energía y suplir la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

### **1.1. Planteamiento del problema de investigación.**

Actualmente, uno de los mayores retos a nivel mundial es satisfacer la creciente demanda de energía, haciéndolo de manera sustentable. Hoy en día, el 80% de la energía total generada proviene de los hidrocarburos. Los problemas con este tipo de energías no solo tienen que ver con la creciente escasez de materia prima y con su relación directa con el calentamiento global, sino también con temas como la contaminación del aire, lluvia ácida, disminución de la capa de ozono y destrucción de áreas forestales. Debido a esto, el desarrollo de energías renovables ha tomado cada vez mayor importancia (Tamayo, 2017).

Una de las energías sustentables que mayor crecimiento ha tenido en los últimos años es la energía fotovoltaica, debido a sus varias ventajas. La principal de ellas es que el Sol es una fuente de energía gratuita, inagotable y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre.

Además, su costo ha venido disminuyendo a lo largo de los años, de 76 dólares por watt en 1977 a 0.74 dólares por watt en 2013 (REN21, 2016).

## 1.2. Antecedentes de la investigación.

Los avances tecnológicos en el campo de la electrónica de potencia, permite que, se construyan dispositivos cada vez menos costosos, con mayores capacidades en voltaje y corriente y almacenamiento de la misma, y son cada vez más rentables para la transmisión y distribución de la energía.

Los trabajos de investigación sobre sistemas fotovoltaicos solares han mostrado un crecimiento exponencial en los últimos. El modelado numérico ha demostrado ser una valiosa herramienta entendiendo el funcionamiento de estos sistemas. Muchas investigaciones han propuesto varios modelos para MATLAB/Simulink según la revisión de la literatura. La revisión bibliográfica consultada, refiere que fuentes de energía renovables (viento, solar, biogás) son utilizadas para alimentar de energía a una microgrid. Hay que considerar, que el sistema está compuesto por módulos fotovoltaicos (células solares fotovoltaicas) que genera electricidad en su forma continua.

Para resolver el problema planteado en esta investigación, se recurrió a diversas fuentes e investigaciones en el área de física, aplicaciones energéticas y la electrónica de potencia. Se tuvo en consideración los siguientes antecedentes:

Huan-Liang Tsai (2008), Presenta la implementación de un modelo para un módulo fotovoltaico generalizado usando MATLAB®/Simulink; sugiere cuatro tipos diferentes modelos generalizado. Esto hace que el modelo generalizado fotovoltaico sea fácilmente simulado y analizado; El modelo propuesto toma valores de la irradiancia solar y la temperatura como parámetros de entrada y como salida la corriente y la potencia, las características  $I - V$  y  $P - V$  bajo diferentes condiciones, las características del modelo fotovoltaico se simulan utilizando el modelo propuesto conjuntamente con la electrónica de potencia para un seguidor del punto máximo de potencia.

Aissa Chouder (2011), En este trabajo se presenta un nuevo método para el estudio de modelado y simulación de una instalación fotovoltaica, el

sistema es conectado a la red de energía. El método ha sido aplicado en la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red con una potencia nominal de 3,2 KW. Compuesto por un generador fotovoltaico y un inversor conectado a la red de una sola fase. Primero, el módulo fotovoltaico, que forma parte de todo el conjunto fotovoltaico es modelado por un circuito agrupado de un solo diodo y los principales parámetros del módulo fotovoltaico son evaluados. Los resultados y características obtenidos del módulo fotovoltaico son validados experimentalmente, llevándonos a las características medidas de salida  $I - V$ . Los resultados obtenidos de la simulación son perfeccionados con MATLAB® / Simulink. Los resultados demuestran un buen acuerdo con los datos experimentales, ya sea para las características  $I - V$  y  $P - V$ .

Carlos Bordonsa (2015), Este artículo se centra en los temas relacionados con la operación óptima de las microgrids, que son conjuntos de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento de energía, aislados o conectados al resto de la red eléctrica, que pueden ser gestionados de manera coordinada para suministrar electricidad de forma fiable. Se aborda la problemática y las soluciones de control tanto para la gestión del reparto de la carga entre los distintos generadores y almacenamiento como para la integración de la microgrid. Se presentan diseños de controladores para casos que incluyen diversas fuentes renovables, como energía solar y eólica, y almacenamiento híbrido con hidrógeno, lo que permite gestionar el balance de energía en distintas escalas de tiempo. Se muestran algunos resultados experimentales en una microgrid de laboratorio, así como estudios de planificación para el mercado eléctrico. Los resultados obtenidos indican que el desarrollo de controladores adecuados facilitará una participación competitiva de las energías renovables y la integración de las microgrid en el nuevo modelo de sistema eléctrico.

Jorge Luis Mírez Tarrillo (2016), En este texto se desarrolla el modelamiento y simulación de una microgrid de voltaje continuo/alterno

alimentado con fuentes solar, eólica, almacenamiento de energía (baterías), una red eléctrica convencional y que posee cargas eléctricas. En ella se realiza la evaluación del comportamiento de los parámetros del sistema: tensión, corriente, potencia y energía, en condiciones normales mediante el uso de software de MATLAB®/Simulink de MathWork Inc.

Se considera mucha atención a la descripción de los procesos físicos involucrados en este tipo de sistemas de energía, lo que ha servido en la construcción del modelo computacional, para lo cual, diversas condiciones de trabajo han sido consideradas en cada uno de los elementos del sistema. Como producto final se ha logrado conseguir el control de la microgrid, a través de recopilación de datos, procesamiento, control y mando de los diferentes elementos del sistema. También nos da un acercamiento a los sistemas eléctricos del futuro mediante la ingeniería, física, matemática y programación.

### **1.3. Justificación del problema.**

El cambio climático que afecta al mundo entero obliga a la ciencia a buscar alternativas tecnológicas para reducir su impacto en los factores sociales, económicos y productivos; lo que hace orientar los intereses investigativos hacia el uso de las energías renovables que contribuya al desarrollo energético sostenible. Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente; la demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada. En consecuencia, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida.

El problema se deriva por la observación del nivel de efectividad que actualmente registran los módulos fotovoltaicos, en cuyo uso se advierte niveles de ineficacia que depende de las perturbaciones externas particularmente de carácter climático. Por ende, los procesos de modelado y simulación se han convertido en pilares fundamentales en las técnicas de diseño en las diversas áreas de la ingeniería, incluyendo los sistemas eléctricos y la electrónica de potencia. Por tal motivo, cuando se desea emprender un proyecto de instalación para la generación de energía solar, es recomendable contar con plataformas de simulación y modelos que describan y permitan cuantificar la cantidad de energía disponible de un módulo fotovoltaico para diferentes condiciones de operación.

La utilidad de conocer el funcionamiento preciso de un módulo fotovoltaico con sus respectivos parámetros y variables es de gran importancia ya que nos ofrece el conocimiento para desarrollar técnicas y alcanzar la efectividad de los mismos. El modelo matemático a plantearse prevé realizar aportaciones al análisis del comportamiento de un módulo fotovoltaico que infiere en el estudio para mejorar la efectividad del mismo.

#### **1.4. Importancia y utilidad del estudio.**

Un modelo es una abstracción o representación reducida de un sistema, construido a partir de elementos definidos en un modelo matemático. Cada representación abstracta, complejo de los elementos presentes en el sistema, facilitando su desarrollo. La principal importancia de la presente tesis es suplir la escasez de energía y reducir los costes en el sector eléctrico en nuestro medio mediante el aprovechamiento de las energías renovables a partir de un análisis profundo del comportamiento de un módulo fotovoltaico.

La presente investigación pretende contribuir al campo de la electrónica de potencia, eléctrica y energías renovables. De la siguiente manera:

- El desarrollo del modelo matemático a partir de fórmulas y principios de la física; así obtener modelos de fuentes de energía renovables y convencionales.
- Evaluar un modelo de microgrid que tiene una red eléctrica de distribución de energía eléctrica en voltaje continuo.
- Dado que producción e implementación de las microgrid en los mercados eléctricos se dará en el futuro cercano, es por ello, la presente tesis espera haber contribuido a cerrar las brechas en el sector eléctrico en nuestro país.

### 1.5. Objetivos de la investigación.

#### 1.5.1. Objetivo general.

Analizar el comportamiento de un módulo fotovoltaico, a partir de un modelo matemático el cual nos permita describir y explicar los parámetros eléctricos obtenidos de la célula solar; y su integración a una microgrid.

#### 1.5.2. Objetivos específicos.

- a) Desarrollar las simulaciones correspondientes, a partir del modelo matemático e interpretar las curvas  $I - V$  y  $P - V$ .
- b) Examinar el comportamiento de los parámetros (Tensión, Corriente, Potencia) ante la variación de irradiancia solar y temperatura del módulo fotovoltaico.
- c) Proponer una solución al problema de la demanda de energía mediante un control de una microgrid, basados en el desarrollo de simulaciones y análisis de resultado del módulo fotovoltaico.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Marco teórico.

##### 2.1.1. La energía.

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo: trabajo mecánico, emisión de luz, generación de calor, etc. La energía puede manifestarse de distintas formas: gravitatoria, cinética, química, eléctrica, magnética, nuclear, radiante, etc., existiendo la posibilidad de que se transformen entre sí, pero respetando siempre el principio de conservación de la energía, prácticamente toda la energía de que disponemos proviene del Sol.

El Sol produce el viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes, las lluvias, etc. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales, cuyos restos, con el paso de los siglos, originaron los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural (Canarias, 2008).

##### 2.1.2. Fuentes de energía

La fuente básica y principal de energía se halla en el Sol, que nos proporciona luz y calor. Otras fuentes de energía se encuentran sobre la Tierra y su atmósfera. El control de las fuentes de energía han sido una constante de todas las generaciones que nos han precedido, y especialmente de la presente.

En la actualidad, el petróleo es la principal fuente de energía. Los países que lo poseen ejercen presión sobre los que no lo tienen, y en muchos casos los precios y el suministro están expuestos a los vaivenes de los regímenes que lo producen y controlan, ya que es un medio de presión para conseguir sus objetivos (Roldán, 2008).

**Tabla 01:** Fuentes de energía

<b>Energía</b>	<b>Produce o Genera</b>
Térmica	Calor, por efecto de la combustión.
Mecánica	Produce movimiento.
Electromecánica	Rayos X, microondas y la luz visible.
Química	Produce reacciones químicas que pueden desprender calor u otra forma de energía.
Eólica	Produce movimiento.
Eléctrica	Producida por campos magnéticos.
Nuclear	Produce calor.
Calor de Sol	Permite que haya vida en la tierra y aprovecha el calor.
Hidráulica	Movimiento por medio de turbinas.
Biomasa	Gas, calor y otras aplicaciones.

Fuente: Roldán Viloría, José (2008); "Fuentes de Energía".

### 2.1.3. Principales fuentes de energía renovable.

Aunque sea de forma repetida tenemos que tener muy presente que la principal fuente de energía para nuestro planeta es la que proviene del Sol. Es abundante y gratuita y está presente en todas partes, He aquí un resumen de las principales fuentes de energía renovable.

**Tabla 02:** Fuentes de energía renovables.

<b>Tipo de Energía</b>	<b>Procedencia</b>
Energía eólica	el viento
Energía geotérmica	El calor del interior de la Tierra
Energía hidráulica	El agua
Energía mareomotriz	El mar
Energía fotovoltaica	El Sol
Energía solar térmica	El Sol
Energía biomasa	Materias agrícolas diversas

Fuente: Roldán Viloría, José (2008); "Fuentes de Energía".

#### 2.1.4. La energía solar.

Tous (2010) establece “La luz solar forma parte del espectro electromagnético, es decir, un tipo de onda electromagnética que se desplaza por el espacio en todas direcciones y alcanza la tierra en un tiempo aproximado de ocho minutos.” El Sol es la estrella principal del sistema, se calcula que el Sol irradia una energía de  $4 \times 10^{26}$  Joule (una potencia de  $4 \times 10^{23}$  W), más que la potencia total de todas las centrales de todo tipo actualmente en la Tierra. En un solo segundo el Sol irradia más energía que la que ha consumido en toda su historia la humanidad.

El aprovechamiento de esta energía se ve manipulado por la intensidad de radiación, la intensidad de radiación emitida sobre la tierra es constante, pero no así la final recibida por la superficie, la época del año, la hora del día, la latitud y la climatología modifican enormemente la recepción en la tierra. La radiación que alcanza la superficie terrestre tiene por término medio una intensidad de potencia de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Existen dos formas de captar la energía solar para generar energía eléctrica: los módulos fotovoltaicos por medio de un fenómeno físico; y los paneles solares térmicos que generan electricidad a través de energía térmica.

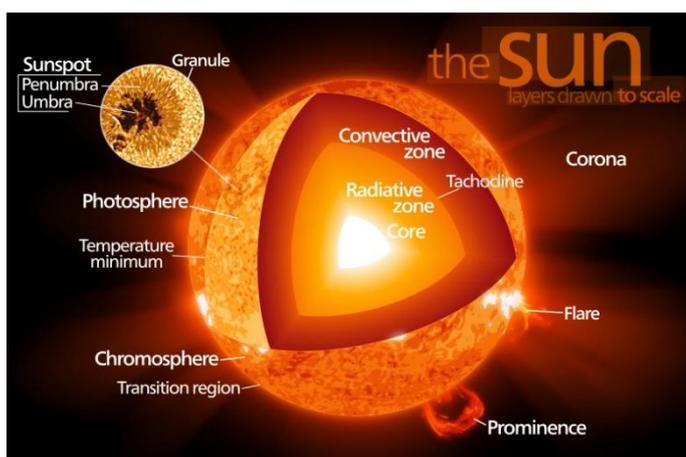
##### 2.1.4.1. El Sol.

El Sol es la estrella central de nuestro sistema solar, se encuentra a una temperatura media de  $5.500^\circ\text{C}$ , en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se transforma en energía (Méndez, 2011). Se compone principalmente de hidrógeno y helio, su estructura es esbozado en la Fig. 5.1. La masa de la Sol es tan grande que contribuye al 99,68% de la masa total del sistema solar. En el centro del Sol las condiciones de presión y temperatura interna llega a más de 20 millones de grados Kelvin debido a las reacciones de fusión nuclear en su núcleo, que convierten el hidrógeno en helio (Arno – Klaus, 2014); el Sol emite luz y calor,

elementos imprescindibles para la vida sobre la Tierra (Roldán, 2008).

a continuación describe la composición química del Sol.

- 71% de hidrógeno.
- 27% de helio.
- 2% elementos pesados (al menos 70).



**Figura 03:** El Sol.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

Los positrones se aniquilan con los electrones que lleva a adicional radiación. La masa del núcleo de helio es 0,635% menor que la de cuatro protones, la diferencia de energía es convertida en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein.

$$E = mc^2. \quad \dots \text{(Ec. 1)}$$

Cada segundo de este modo, aproximadamente, 4 millones de toneladas de masa son convertida en energía. Sin embargo, la densidad de potencia en el centro del Sol se estima por supuestos teóricos cerca de  $275 \text{ W/m}^3$  (Arno – Klaus, 2014). La radiación del sol, se emite en diferentes zonas del espectro electromagnético.

**Tabla 03:** Radiaciones del Sol.

<b>Radiación</b>	<b>Longitud de Onda</b>	<b>Componente Energético</b>
Ultravioleta	<0,38	7%
Visible	0,38 – 0,76	47%
Infrarrojo	>0,76	46%

Fuente: Roldán Vilorio, José (2008): “Fuentes de Energía”.

- Rayos gamma: Las que presentan longitudes de onda inferiores a 0.1 nm.
- Rayos X: Longitudes de onda entre 0.1 a 10 nm.
- Luz Visible: Son las radiaciones cuyas longitudes de onda están entre 400 a 700 nm.

#### 2.1.4.2. La luz.

Es una manifestación de la energía. La encontramos natural, que corresponde a la que irradia el Sol, o artificial, como emiten los diferentes tipos de lámparas. La luz se transmite a frecuencias y longitud de onda diferentes, resultando luz visible y luz invisible. Las radiaciones visibles se caracterizan por ser capaces de estimular el sentido de la vista y estar comprendidas dentro de una franja de longitud de onda muy estrecha, que abarca aproximadamente desde 380 hasta 760 nm (Fonash, 2010).

#### 2.1.5. Geometría Tierra – Sol.

La Tierra, en su movimiento anual en torno al Sol describe una trayectoria elíptica con una pequeña excentricidad ( $\epsilon \approx 0.017$ ). Así la distancia del Sol a la Tierra está dada por:

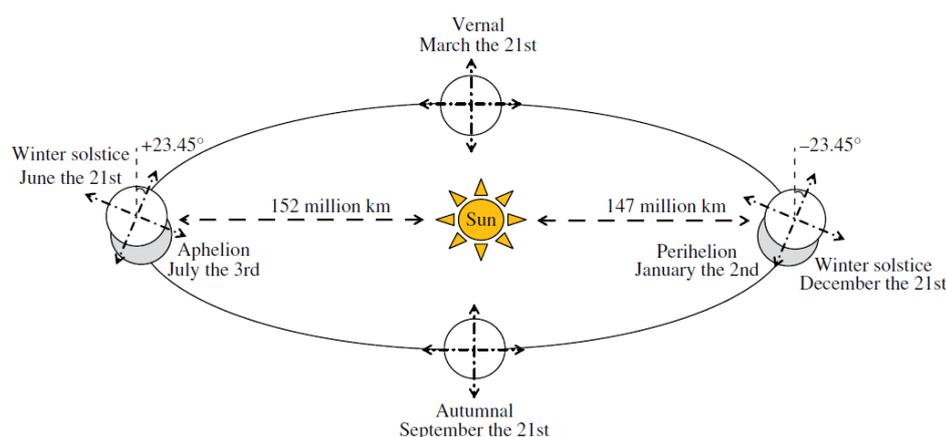
$$d = 1.5 \times 10^{11} \left\{ 1 + 0.0017 \sin \left[ \frac{360(n-93)}{365} \right] \right\} m. \quad \dots \text{(Ec. 2)}$$

Donde  $n$  representa el día del año, con 1 de enero como el día 1 [19]; Su eje en relación con el plano normal de la elipse, representa una inclinación de aproximadamente de  $23,45^\circ$ . Esta inclinación

conjuntamente con su movimiento de traslación, da origen a las estaciones del año. El 21 de Marzo y el 21 de Septiembre, la línea del centro del sol hasta el centro de la Tierra pasa a través de la línea ecuatorial y en todas partes en la tierra tenemos 12 horas durante el día y 12 horas de la noche, de ahí el término equinoccio (igual día y noche). El 21 de Diciembre, el solsticio de invierno en el hemisferio norte, la inclinación del Polo Norte alcanza su ángulo más alto lejos del Sol ( $23.45^\circ$ ), mientras el 21 de Junio ocurre lo contrario (Masters, 2004). El ángulo de desviación del Sol directamente sobre el ecuador es llamado declinación,  $\delta$ . Si los ángulos al norte del ecuador son considerados como positivos y los ángulos al sur del ecuador como negativos, entonces en cualquier día del año  $n$ , la declinación puede ser encontrada de la siguiente ecuación.

$$\delta = 23.45^\circ \left\{ \sin \left[ \frac{360(n-80)}{365} \right] \right\}. \quad \dots \text{(Ec. 3)}$$

Esta fórmula, es una buena aproximación para determinar la ubicación del Sol a cualquier hora del día en cualquier lugar de nuestro planeta, la declinación es un parámetro importante (Messenger, 2004).



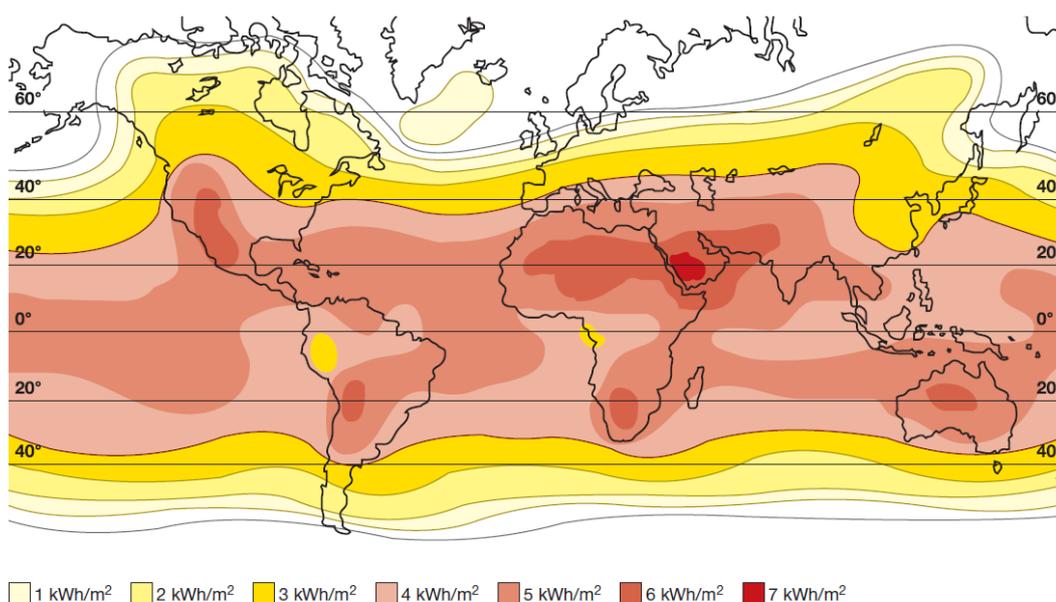
**Figura 04:** La órbita de la Tierra y la declinación en diferentes estaciones al año.

Fuente: Khatib – Elmenreich (2016).

## 2.1.6. Radiación solar terrestre.

### 2.1.6.1. Potencial solar.

La radiación solar, recogida adecuadamente con módulos fotovoltaicos, se puede transformar en otras formas de energía. Con colectores solares la energía solar puede transformarse en energía térmica. En el caso de los módulos fotovoltaicos se puede transformar en energía eléctrica. En el Perú existe un uso muy pequeño de la energía solar para su transformación en energía eléctrica, limitado a algunos pueblos en la sierra y selva a los que no llega el sistema interconectado. Sin embargo, esta opción se presenta con un gran potencial de desarrollo a nivel nacional (Tamayo, 2011). En la figura 5. Se muestra la distribución anual de la irradiación solar medida en ( $W/m^2$ ) que incide sobre la superficie de la Tierra, estos datos fueron estimados a partir de imágenes de satélites meteorológicos durante los últimos años. Para poder obtener, a partir de estos datos la irradiación solar en la base temporal de medición anual diaria en  $kWh/m^2$  se debe de multiplicar  $\times 24h$ .



**Figura 05:** Atlas mundial de irradiancia solar promedio ( $kWh/m^2/día$ ).

Fuente: ABB (2011).

El potencial en energía solar de nuestro país se muestra en el Mapa Solar del Perú (Ver figura 06), en la cual, se observa los niveles de radiación solar en el territorio nacional como se puede apreciar en la figura 06. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante uniforme durante todo el año, estando casi siempre dentro de un margen de +/- 20% del promedio anual. es lo suficientemente alta y uniforme (comparada con otros países) para ser considerada como una fuente energética utilizable para fomentar el desarrollo de las comunidades. En términos generales, este promedio anual es de 4 – 5 kWh/m<sup>2</sup> día en la costa y selva y de 5 – 6 kWh/m<sup>2</sup> día, aumentando de norte a sur (Tamayo, 2011).



**Figura 06:** Atlas solar.

Fuente: National Renewable Energy Laboratory (2016).

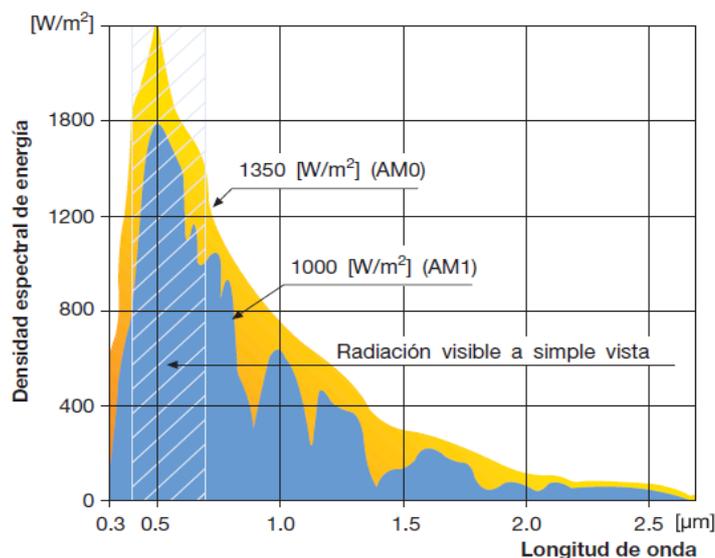
Según el “Atlas de Energía Solar del Perú” publicación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en convenio con la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP-MEM) en 2003. La ciudad de Puno tendría una energía solar promedio mensual entre 5.5 a 6.80 kWh/m<sup>2</sup>.

#### **2.1.6.2. Radiación solar.**

La radiación en el Sol es 63,450.720 W/m<sup>2</sup>. La radiación solar recibida fuera de la atmósfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocida como constante solar 1360 W/m<sup>2</sup>, variable durante el año un  $\pm 3\%$  a causa de la elipticidad de la órbita terrestre (Méndez, 2011). Esta llega a la atmósfera de la Tierra considerablemente debilitada, debido a la distancia entre el Sol y la Tierra. Después dicha radiación sufre una atenuación debido a la capa atmosférica, por lo que la radiación en la superficie terrestre es de aproximadamente de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La radiación solar absorbida por la atmosfera terrestre no es aprovechada al 100% según el Instituto Geofísico del Perú, en términos generales, el 24% de la radiación llega directamente, el 21% de la radiación no llega directamente. Mientras que el 29% se pierde en el espacio. A la tierra sólo llega aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la atmósfera, y de ella el 70% cae al mar. Aun así, es varios miles de veces el consumo energético mundial; existen tres componentes de la radiación solar.

- Directa: Es la recibida desde el Sol sin que se desvíe un paso por la atmósfera.
- Difusa: Sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- Albedo: Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies.



**Figura 07:** Espectro de radiación solar.

Fuente: ABB (2011).

### 2.1.6.3. Radiación del cuerpo negro.

Para discutir el término radiación, el concepto de cuerpo negro es muy útil. Un cuerpo negro, que no lo hace existir en la naturaleza, absorbe toda la radiación que es incidente en él, independientemente de la longitud de onda y ángulo de incidencia. Por lo tanto, su reflectividad es 0.

Dos aproximaciones para el espectro del cuerpo negro eran presentadas alrededor del cambio de siglo (Arno – Klaus, 2014). En primer lugar, en 1896, Wilhelm Wien deriva empíricamente la siguiente expresión para el espectro de la radiación del cuerpo negro:

$$L_{e\lambda}^w(\lambda; T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda}\right), \quad \dots \text{(Ec. 4)}$$

Donde  $\lambda$  y  $T$  Son la longitud de onda y la temperatura, respectivamente. Mientras que esta aproximación da buenos resultados para longitudes de onda cortas, pero falla al predecir al emitir espectro a longitudes de onda largas. Segundamente, en 1900

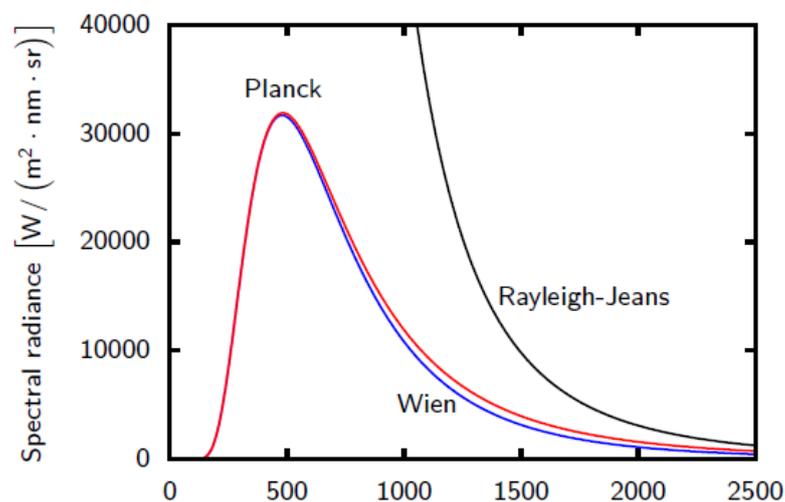
y en una más versión completa en 1905, Lord Rayleigh y James Jeans, respectivamente derivan:

$$L_{e\lambda}^{RJ}(\lambda; T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}, \quad \dots \text{(Ec. 5)}$$

Donde  $k_B \approx 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  es la constante de Boltzmann. La derivación de esta ecuación se basa en argumentos electrodinámicos. Mientras  $L_{e\lambda}^{RJ}$  está en buen acuerdo con los valores medidos en longitudes de onda largas. En 1900, Max Planck encontró una ecuación, que interpola entre la aproximación de Wien y la ley de Rayleigh – Jeans.

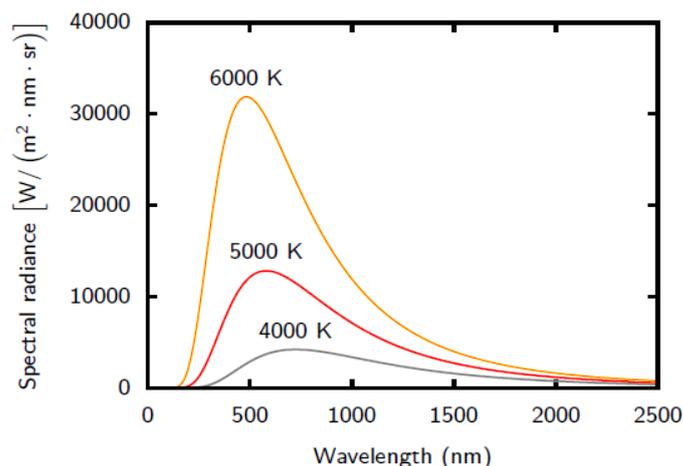
$$L_{e\lambda}^{BB}(\lambda; T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \right), \quad \dots \text{(Ec. 6)}$$

Donde  $C \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; es la velocidad de la luz en el vacío y  $h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$ , es en la actualidad llamado la constante de Plank.



**Figura 08:** El espectro del cuerpo negro a 6000K, calculado con la aproximación de Wien, la ley de Rayleigh - Jeans y la ley de Plank.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

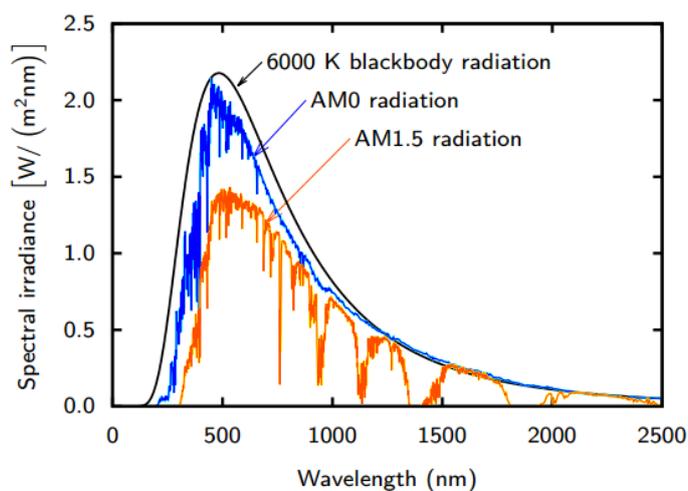


**Figura 09:** El espectro del cuerpo negro en 3 diferentes temperaturas.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

**2.1.6.4. Espectro solar.**

El suministro de energía para una célula solar son los fotones provenientes del Sol. Esta es distribuida, en formas que dependen de variables como la latitud, la hora del día y condiciones atmosféricas, sobre diferentes longitudes de onda. Las varias distribuciones que son posibles son llamados: espectros solares. El espectro del cuerpo negro es ilustrado en la figura 10, el espectro fuera de la atmósfera de la Tierra es muy diferente. Se le llama el espectro AM0, porque no atraviesa la atmósfera, es igual a 1361W/m<sup>2</sup> (Arno – Klaus, 2014).



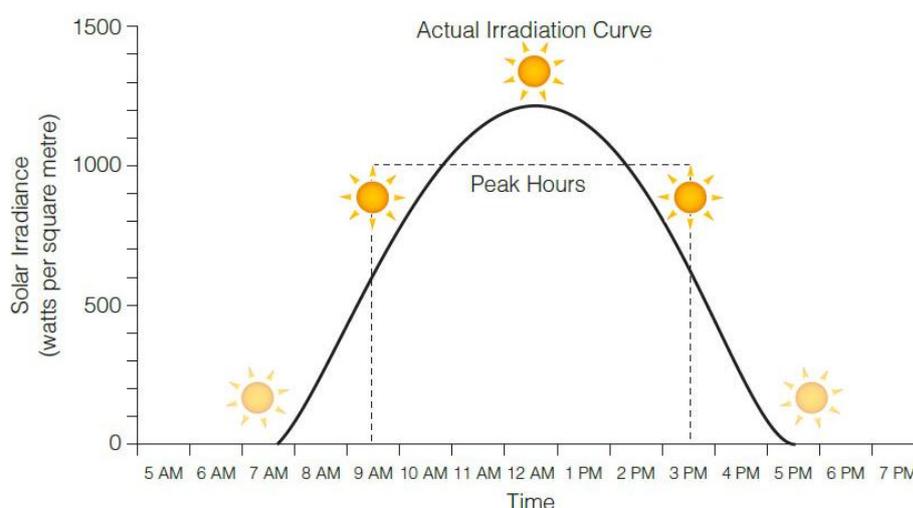
**Figura 10:** Diferentes espectros solares: 6000K, AM0 y AM1.5.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

### 2.1.6.5. Horas pico solar (PSH).

Para poder diseñar un sistema fotovoltaico, debemos saber con cuánta energía solar contamos en el lugar donde lo vamos a instalar. En la mayor parte de los lugares del mundo se conoce cuánta energía solar promedio está disponible. Este promedio se mide en Horas Solar Pico o PSH. Una hora perfecta de sol representa una hora de sol luminoso, sin nubes; por lo tanto, si una región tiene un HSP de 6, significa que se puede contar con un promedio de 6 horas de sol radiante, sin nubes, por día. Una hora perfecta de sol equivale a una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  durante una hora. El HSP se obtiene sumando toda la energía recibida en el día y dividiendo esta suma por  $1000 \text{ W/m}^2$ . La curva de la figura 11, indica la cantidad de energía que se puede generar a través del día (Keane, 2014).

Se puede notar que cuando la irradiancia se expresa en  $kW - h/m^2$  es numéricamente similar a las PSH. Este concepto es importante, ya que nos ayuda a estimar la potencia producida por los módulos fotovoltaicos. La distribución de la radiación a lo largo del día y el concepto de horas pico del Sol.



**Figura 11:** Distribución de la irradiancia solar ( $\text{W/m}^2$ ) a lo largo del día (PSH).

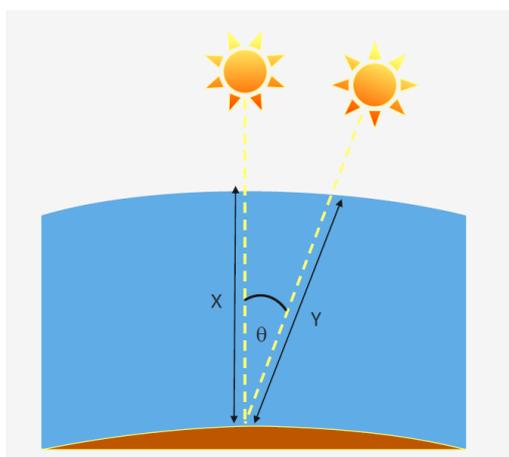
Fuente: Hawkins (2010).

El Sol genera cada hora del día una distinta cantidad de energía (vatios) en cada metro cuadrado que ilumina. Para saber cuántas horas de Sol perfecto se generan cada día, se calcula la cantidad de  $W-h$  generadas y se divide para  $1000 W/m^2$ .

#### 2.1.6.6. Masa de aire (AM).

Cuando la radiación solar pasa a través de la atmósfera de la tierra, esta es atenuada. El parámetro más importante que determina la irradiación solar bajo las condiciones del cielo claro, es la distancia que ha recorrido la luz del sol a través de la atmósfera (cuando el Sol está directamente sobre la cabeza). La proporción de una trayectoria real de la luz del Sol, a esta distancia mínima de longitud es conocida como *air mass* (AM) (Arno – Klaus, 2014). La masa de aire cuantifica la reducción de la potencia de la luz a medida que pasa a través de la atmósfera y es absorbido por el aire y el polvo; cuando el Sol está en un ángulo  $\theta$  con el Zenith, entonces la masa de aire (AM) está dado por la ecuación 7: Donde  $\theta$  es el ángulo de la vertical; cuando el sol está directamente sobre la cabeza, AM es igual a 1.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}. \quad \dots \text{(Ec. 7)}$$



**Figura 12:** Masa de aire.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

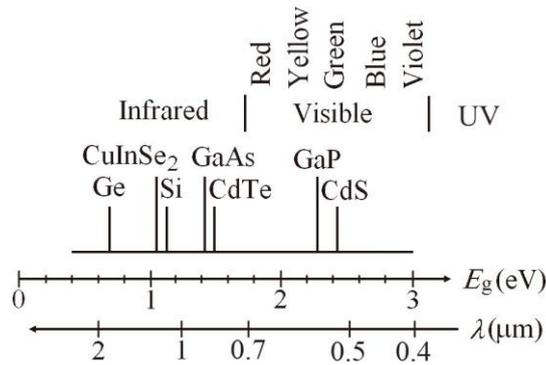
### 2.1.7. La unión P – N.

A la fecha, la mayoría de las células solares están hechas de semiconductores; un semiconductor se caracteriza por un intervalo de energía relativamente estrecho, típicamente una fracción de un electrón volt a pocos electrones volts. Los electrones pueden ser excitados por un fotón de la banda de valencia a la banda de conducción y forman un par electrón – hueco. El par electrón – hueco almacena una porción sustancial de la energía del fotón, después de la formación de los pares de electrón– hueco; la unión  $p-n$  separa los electrones y los huecos para generar una corriente eléctrica externa (Chen, 2011).

#### 2.1.7.1. Semiconductores.

Para Méndez (2011). El material con que están diseñados los semiconductores nos hace referencia que a la energía que liga a los electrones de valencia con su núcleo es similar a la energía de los fotones. A su vez cuando la luz solar incide sobre el material semiconductor, se rompen los enlaces entre núcleo y electrones de valencia, que quedan libres para circular por el semiconductor. Por lo tanto, al lugar que deja el electrón al desplazarse se le llama hueco y tiene una carga eléctrica positiva (de igual valor que el electrón, pero de signo contrario).

El autor detalla claramente que “los electrones libres y los huecos tienden a recombinarse perdiendo su actividad. Para que esto no ocurra y poder aprovechar esta libertad de los electrones, hay que crear en el interior un campo eléctrico” y también determina que el material más utilizado en la fabricación de las células solares es el Silicio ( $4e^{-V}$ ).

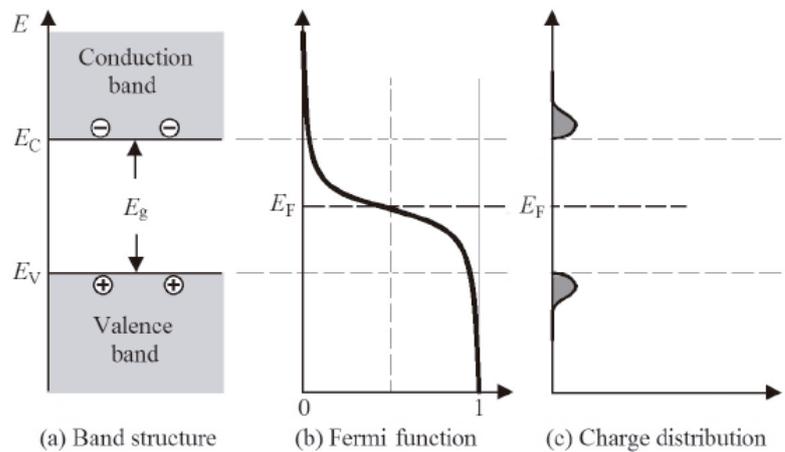


**Figura 13:** Intervalos de banda de una serie de semiconductores.

Fuente: Julian Chen (2011).

**2.1.7.2. Electrones y huecos.**

A baja temperatura, los semiconductores puros casi no tienen electrones móviles y la conductividad es muy baja. Elevando la temperatura, en la banda de valencia los electrones pueden excitarse a la banda de conducción; véase la figura 14. Por lo tanto, un semiconductor tiene una propiedad importante: la conductividad depende críticamente de la temperatura, la temperatura alta – la conductividad alta.



**Figura 14:** Semiconductores intrínsecos: Electrones libres y huecos.

Fuente: Julian Chen (2011).

De acuerdo a la estadística de Fermi–Dirac, a la temperatura  $T$ , la concentración de electrones  $n_0$  en el fondo de la banda de conducción es:

$$n_0 = N_C f(E_C) \quad \dots \text{(Ec. 8)}$$

Donde:  $N_C$ , es la densidad efectiva de la banda de conducción de estado, una cantidad determinada por la propiedad del semiconductor, y  $f(E_C)$  es la función Fermi; La función de distribución de electrones a una temperatura absoluta  $T$ . A una temperatura ambiente,  $k_B T \approx 0.026 \text{ eV}$ , el valor de  $E_C - E_F$  es cerca de  $1 \text{ eV}$ , y el factor 1 en la función Fermi puede ser despreciada. Así con alta precisión tenemos:

$$f(E_C) = \frac{1}{e^{(E_C - E_F)/k_B T} + 1} \approx e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}. \quad \dots \text{(Ec. 9)}$$

Por lo tanto, la concentración de electrones en la banda de conducción es:

$$n_0 = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}. \quad \dots \text{(Ec. 10)}$$

En la banda de valencia, hay una deficiencia de electrones de la situación saturada. La deficiencia de electrones en la banda de valencia forma los portadores móviles, similarmente los huecos. La concentración de huecos  $p_0$ , está dado como:

$$p_0 = N_v [1 - f(E_v)] \approx N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T} \quad \dots \text{(Ec. 11)}$$

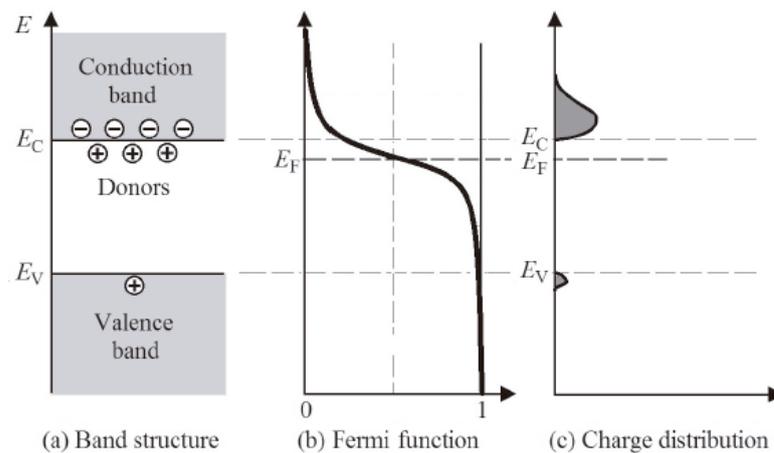
Donde,  $N_v$  es la densidad efectiva de estados en la banda de valencia y  $E_v$  es el nivel de energía en lo más alto de la banda de valencia.

### 2.1.7.3. Semiconductores tipo – P y tipo – N.

Los semiconductores tienen una propiedad aún más importante; su conductividad depende críticamente del tipo y concentración de impurezas, según la posición del nivel de energía de los átomos en el espacio de banda de un semiconductor, hay dos tipos de impurezas.

El nivel de energía de los átomos donadores está justo debajo en la parte inferior de la banda de conducción. El átomo de impureza puede ser fácilmente ionizado para contribuir con un electrón a la banda de conducción. Para el Silicio o Germanio, los átomos del grupo V (A) de la tabla periódica (N, P, As, y Sb) son donantes efectivos. Supongamos que la concentración de los átomos donantes es  $N_D$ ; si la temperatura es moderadamente alta, todos los átomos donantes podrían ser ionizados. La concentración de electrones libres en un semiconductor tipo - n,  $n_n$  es aproximadamente igual a la concentración de átomos donantes.

$$n_n = N_D \quad \dots \text{(Ec. 12)}$$



**Figura 15:** Semiconductor tipo - n. Los átomos donantes liberan electrones en la banda de conducción.

Fuente: Julian Chen (2011).

Por otro lado, el nivel de energía de los átomos aceptores es justamente por encima de la parte superior de la banda de valencia. Un electrón en la banda de valencia puede ser fácilmente atrapado por los átomos aceptores y dejar un hueco en la banda de valencia. Para el Silicio y Germanio, los átomos del grupo IIIA (B, Al, Ga y In) son aceptores efectivos. Asumiendo la concentración del átomo aceptor es  $N_A$ . Si la temperatura es moderadamente alta, todos los átomos

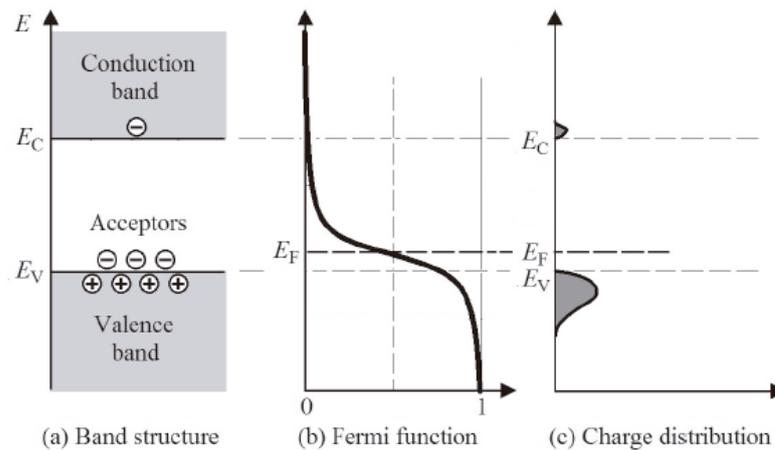
aceptores se convierten en iones negativos. La concentración de huecos en un semiconductor tipo  $-p$ ,  $p_p$  es aproximadamente igual a la concentración aceptante.

$$p_p = N_A \quad \dots \text{(Ec. 13)}$$

En ambos casos, el producto de las concentraciones de electrones y huecos libres es igual al cuadrado de la concentración del portador intrínseco.

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i^2 \quad \dots \text{(Ec. 14)}$$

Donde  $p_n$ , es la concentración de huecos en un semiconductor tipo  $-n$  y  $n_p$ , es la concentración del electrón libre en un tipo  $-p$ .



**Figura 16:** El semiconductor tipo  $-p$ . Los átomos aceptores atrapan electrones de la banda de valencia para crear huecos.

Fuente: Julian Chen (2011).

#### 2.1.7.4. Formación de una unión P – N.

En el semiconductor tipo  $-n$  La gran concentración de electrones libres cargados negativamente es compensada por átomos ionizados cargados positivamente. En el semiconductor tipo  $-p$  los huecos son los portadores mayoritarios y la carga positiva de los huecos es compensada por átomo aceptores ionizados cargados

negativamente. Para el semiconductor aislado tipo  $n$  se puede escribir como:

$$n = n_{n0} \approx N_D \quad \dots \text{(Ec. 15)}$$

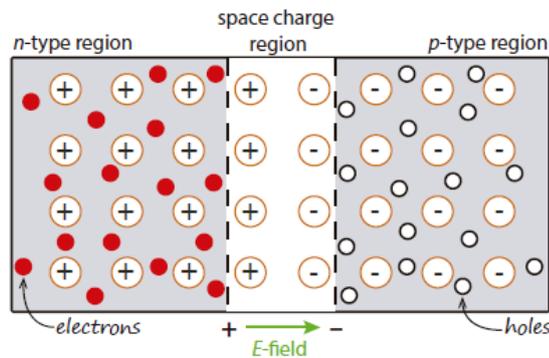
$$p = p_{n0} \approx n_i^2/N_D \quad \dots \text{(Ec. 16)}$$

Para el semiconductor tipo  $p$  aislado se tiene:

$$p = p_{p0} \approx N_A \quad \dots \text{(Ec. 17)}$$

$$n = n_{p0} \approx n_i^2/N_A \quad \dots \text{(Ec. 18)}$$

Cuando un semiconductor tipo  $p$  y semiconductor tipo  $n$  se juntan, una diferencia muy grande en la concentración de electrones entre regiones el tipo  $n$  y  $p$  provoca una corriente de difusión de electrones del material tipo  $n$  a través de la unión metalúrgica en el tipo  $p$ . Esta región de la carga de espacio se denomina región de carga de espacio y se ilustra esquemáticamente en la figura 17.



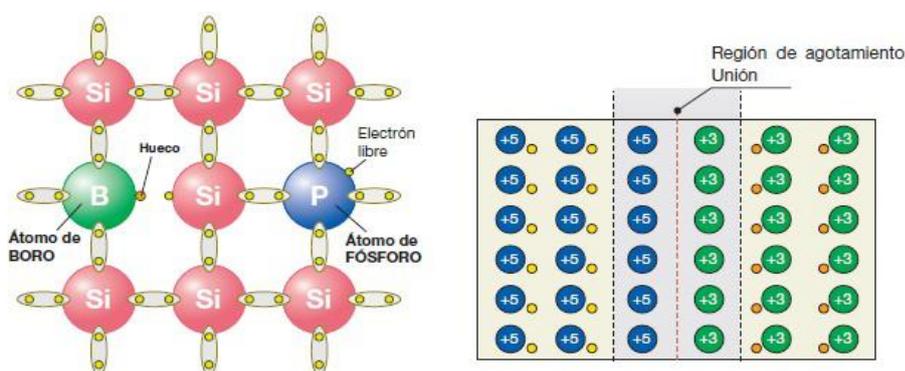
**Figura 17:** Formación de una región carga – espacio, cuando el semiconductor forma la unión tipo  $n$  y tipo  $p$ .

Fuente: Arno – Klaus (2014).

### 2.1.8. Principio de operación de una célula solar.

El componente elemental de un generador fotovoltaico es la célula solar, donde se lleva a cabo la conversión de la radiación solar a energía eléctrica. La célula está compuesta por una delgada capa de material semiconductor, normalmente silicio tratado, con un grosor de alrededor de

0,3 mm y una superficie de 100 a 225 cm<sup>2</sup>. Un átomo de silicio, tiene cuatro electrones de valencia (tetravalente), que se enlazan a los átomos adyacentes. Substituyendo un átomo del silicio por un átomo que tenga 3 ó 5 electrones de valencia lo que producirá un espacio sin un electrón (hueco) o un electrón que se pueda moverse más libremente que los otros, ésta es la base del doping. En el tipo *P*, se "dopa" con átomos trivalentes (Boro – dopaje Positivo) la creación de agujeros, es alcanzada mediante la incorporación de átomos con 3 electrones de valencia. En el dopaje del tipo *N*, la creación de electrones adicionales es alcanzada incorporando un átomo con 5 electrones de valencia (pentavalentes, fósforo – dopaje Negativo) en la otra. La región tipo *P* tiene exceso de huecos, mientras que la de tipo *N* tiene exceso de electrones (figura 18).



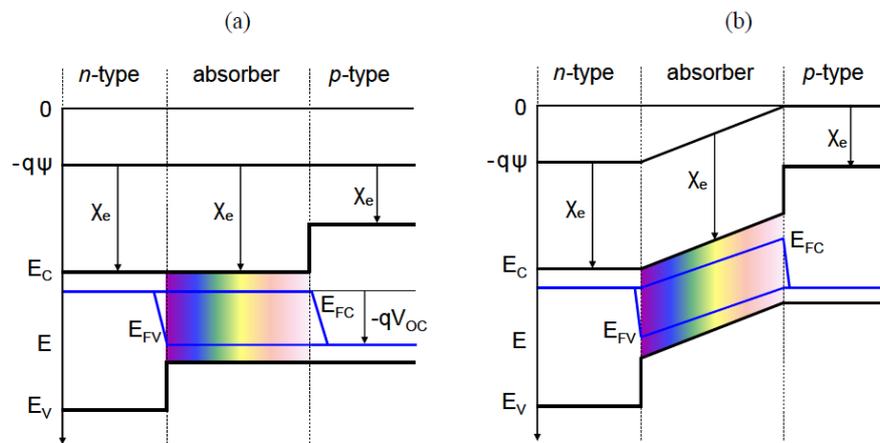
**Figura 18:** Silicio dopado.

Fuente: ABB (2011).

El principio de trabajo de todas las células solares hoy en día es esencialmente igual. Esto basado en el efecto fotovoltaico, significa la generación de una diferencia de potencial en la unión de dos diferentes materiales en respuesta a la radiación visible u otra.

La conversión de la energía fotovoltaica en células solares consiste en dos pasos esenciales. La absorción de la luz genera un par de huecos de electrón. Los electrones y huecos son separados por la estructura del dispositivo; electrones al terminal negativo y los huecos al

terminal positivo, así se genera una potencia eléctrica (Castañer, 2002). En general, una estructura de célula solar consiste en absorber una capa, en el cual los fotones de una radiación incidente son eficientemente absorbidos resultando la creación de pares de huecos de electrón (Arno, 2014). La asimetría en la estructura electrónica en los semiconductores de tipo  $n$  y tipo  $p$ , es el requisito básico para la conversión de la energía fotovoltaica. La figura 19, muestra un esquema de diagrama de banda de una estructura de célula solar idealizada iluminada.



**Figura 19:** Diagrama de banda de una estructura célula solar idealizada, a) circuito abierto, b) Condiciones a cortocircuito.

Fuente: Arno – Klaus (2014).

**Table 2.2** Comparison between silicon and GaAs solar cells

Parameter	Silicon baseline solar cell*	GaAs solar cell**
$n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1 \times 10^{10}$	$9.27 \times 10^5$
$W_c$ ( $\mu\text{m}$ )	0.3	0.2
$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.43	0.432
$S_e$ ( $\text{cm/s}$ )	$2 \times 10^5$	$5 \times 10^3$
$D_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )	3.4	7.67
$W_b$ ( $\mu\text{m}$ )	300	3.8
$L_n$ ( $\mu\text{m}$ )	162	1.51
$S_b$ ( $\text{cm/s}$ )	$1 \times 10^3$	$5 \times 10^3$
$D_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )	36.63	46.8
$J_0$ ( $\text{A/cm}^2$ )	$1 \times 10^{-12}$	$9.5 \times 10^{-20}$
$J_{sc}$ ( $\text{A/cm}^2$ )	$31.188 \times 10^{-3}$	$25.53 \times 10^{-3}$

**Figura 20:** Comparación de Parámetros entre Si y Ga.

Fuente: Castañer (2002).

### 2.1.9. Célula solar.

Existen en la naturaleza materiales clasificados como semiconductores, que se caracterizan por poseer en la banda de valencia altos intervalos de energía. Un módulo PV, está compuesto de células solares las que “permiten transformar directamente en electricidad la energía de parte de los fotones que componen el espectro visible de la luz solar” (Castañer, 2002).

**Tabla 04:** Propiedades del Silicio.

Propiedades del Silicio	
Número atómico ( $Z$ )	14
Configuración electrónica	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Valencia	4
Estructura cristalina	<i>CFC</i>
Bandgap ( $E_g$ )	1,12 eV
Distancia interatómica (a)	5.4 Å
Punto de Fusión	1,420°C
Constante dieléctrica ( $\epsilon / \epsilon_0$ )	11,8
Concentración intrínseca de portadores ( $n_i$ )	$1,5 \times 10^{10} / cm^3$
Movilidad de los electrones ( $\mu_n$ )	$1,350 cm^2 / V \cdot s$
Movilidad de las lagunas ( $\mu_p$ )	$480 cm^2 / V \cdot s$
Coefficiente de difusión de electrones ( $D_n$ )	$35 cm^2 / s$
Coefficiente de difusión de lagunas ( $D_p$ )	$12,5 cm^2 / s$

Fuente: Castañer, Luis (2002): “Modelling Photovoltaic Systems using PSpice”

Existen diferentes criterios para clasificar a los módulos PV (Monocristalinos, Policristalinos y de Capa Fina). Alrededor del 90% de la tecnología fotovoltaica se basa en el uso de alguna variación del silicio. El silicio (ver Tabla N°5) usado en fotovoltaica puede tener varias formas, la mayor diferencia entre ellas es la pureza del silicio usado. Cuanto más puro es el silicio, mejor están alineadas sus moléculas, y por ende

convierte la energía solar en electricidad mucho más mejor. Por tanto, la eficiencia de los módulos PV, va de la mano con la pureza del silicio; pero los procesos para aumentar la pureza son muy caros. Por ello, a la hora de elegir un buen módulo, lo mejor es tener en cuenta la relación coste-eficiencia por m<sup>2</sup>.

**Tabla 05:** Clasificación de células solares fotovoltaicas.

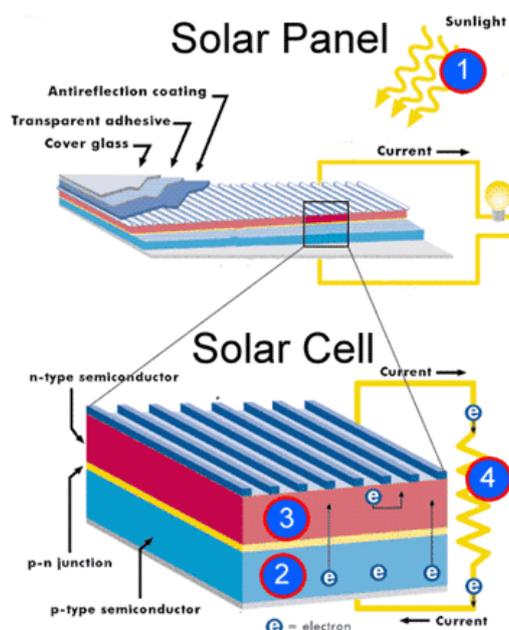
Células Solares	Silicio	$\eta$ célula	Características
	Monocrystalino	14% -17%	Se componen de secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza.
	Policristalino	12% -14%	Se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales (aspecto granulado).
	Amorfo	< 10%	Las células son también de silicio, pero se constituye sin estructura cristalina alguna,

Fuente: ABB (2011) "Plantas fotovoltaicas".

### 2.1.9.1. Estructura de la célula solar.

Una célula solar es un dispositivo electrónico que convierte directamente la luz solar en electricidad, la célula solar produce tanto una corriente y un voltaje para generar energía eléctrica. Este proceso requiere en primer lugar, un material en el que la absorción de la luz eleva un electrón a un estado de energía más alto; y en segundo lugar, el movimiento de estos electrones de energía de la célula solar se transfiere a un circuito externo. El electrón entonces disipa su energía en el circuito externo y vuelve a la célula solar. Una variedad de

materiales y procesos potencialmente puede satisfacer los requisitos para la conversión de energía fotovoltaica, pero en la práctica casi toda la conversión de energía fotovoltaica utiliza materiales semiconductores en forma de una unión P–N (EPIA, 2011), tal como se puede observar en la figura 21.



**Figura 21:** Estructura física de célula solar.

Fuente: European Photovoltaic Industry Association (2011).

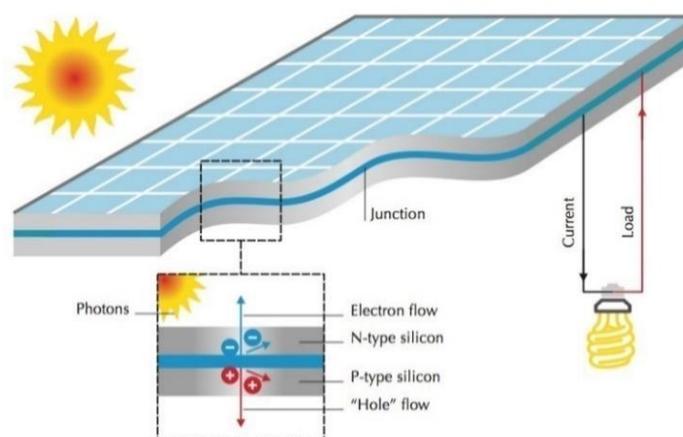
### 2.1.9.2. Corriente fotogenerada.

Una de las claves cruciales de la generación de energía es la naturaleza de la unión  $p-n$ , se produce cuando los materiales de tipo P y tipo N se colocan en contacto uno con otro, la unión se comporta de manera muy diferente a como lo hacen cada uno de los materiales por si solos.

Específicamente, la corriente fluiría fácilmente en una dirección (polarización directa) pero no en la otra (polarización inversa), creando un diodo básico. Este comportamiento no reversible, surge de la naturaleza del proceso de transporte de carga en los dos tipos de materiales.

### 2.1.9.3. El efecto fotoeléctrico.

Comúnmente se considera que el efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de una superficie metálica cuando ésta es iluminada por luz (Méndez, 2011). Describe que el efecto fotoeléctrico consiste en la conversión de luz en electricidad. Este proceso se consigue con algunos materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando los electrones libres son capturados, se produce una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.



**Figura 22:** Efecto fotovoltaico.

Fuente: European Photovoltaic Industry Association (2011).

### 2.1.10. Características eléctricas de una célula solar.

En la literatura, hay varios modelos matemáticos los cuales describen la operación y el comportamiento de una célula solar y por ende en un módulo fotovoltaico. Por ejemplo, para (Rekioua – Matagne 2012), se introduce un modelo simplificado de la potencia máxima el cual tiene una relación de reciprocidad con la temperatura del módulo y la relación logarítmica con la radiación solar absorbida por el módulo fotovoltaico. Sin embargo, estos modelos difieren en el cálculo, el procedimiento, la precisión y el número de parámetros implicados en el cálculo de la curva característica  $I - V$ .

**2.1.10.1. Circuito equivalente modelo ideal.**

Una célula solar puede ser un modelo de primer orden, El circuito equivalente simplificado de una célula solar consiste de un diodo y una fuente de corriente conectado en paralelo tal como muestra la figura 23. La fuente de corriente produce la fotocorriente  $I_{ph}$ , el cual es directamente proporcional a la irradiancia solar ( $G$ ). Los dos parámetros clave usados a menudo para la caracterización de una célula solar son la corriente de *corto – circuito* y el voltaje a *circuitoabierto* los cuales son proveídos por los fabricantes en la hoja de datos. La ecuación de la corriente, voltaje  $I_{PV} - V_{PV}$  del circuito equivalente es derivado de la ley de Kirchhoff (Rekioua–Matagne 2012).

$$I_{PVcell} = I_{Ph} - I_d. \quad \dots \text{(Ec. 19)}$$

Donde:

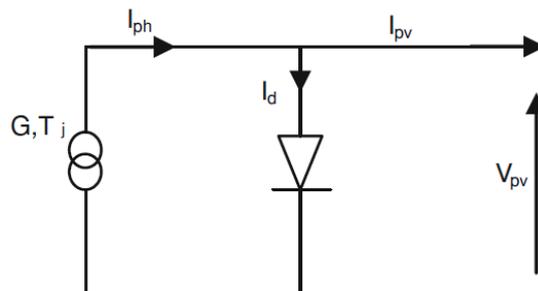
$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{PV})}{AKT_j}} - 1 \right]. \quad \dots \text{(Ec. 20)}$$

Asi:

$$I_{PVcell} = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{PV})}{AKT_j}} - 1 \right]. \quad \dots \text{(Ec. 21)}$$

Con  $I_{Ph}$  (A) es la fotocorriente que es igual a  $I_{SC}$  la corriente de corto – circuito,

$$I = I_{SC} - I_0 \left[ e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right]. \quad \dots \text{(Ec. 22)}$$



**Figura 23:** Circuito equivalente de célula solar (modelo ideal).

Fuente: Rekioua – Matagne (2012).

- **Curva I – V.** La corriente eléctrica en una célula fotovoltaica puede ser considerada como la suma de corriente de una unión  $p - n$  en la oscuridad (diodo semiconductor) con la corriente generada por los fotones absorbidos de la radiación solar. Esta corriente en función de la tensión en el dispositivo, denominada curva I – V o curva característica, puede ser descrita por la siguiente ecuación, derivada de la ecuación de Shockley, el diodo ideal:

$$I = I_{Ph,Cell} - I_{0,Cell} \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad \dots \text{(Ec. 23)}$$

Donde:

- $I_{Ph,Cell}$ : Corriente fotogenerada por la incidencia de la luz y es directamente proporcional a la irradiación solar (A).
- $I_0$ : Corriente de saturación inversa del diodo (A).
- $q$ : Carga eléctrica del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}C$ ).
- $n$ : Factor de idealidad del diodo, número adimensional generalmente entre 1 y 2.
- $k$ : Constante de Boltzmann ( $1.3806 \times 10^{-23}J/K$ ).
- $T$ : Temperatura de la unión  $p - n$  (K).

La corriente de saturación de reserva  $I_0$  puede ser calculada teóricamente por la ecuación N°24. A partir de las propiedades del material y detalles de la construcción de la unión  $p - n$ .  $I_0$  puede ser determinada experimentalmente por aplicar la tensión  $V_{oc}$  a una célula no iluminada (no oscuro), obtenida numéricamente por medio de ajuste de una curva experimental medida.

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p \cdot N_d} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_a} \right). \quad \dots \text{(Ec. 24)}$$

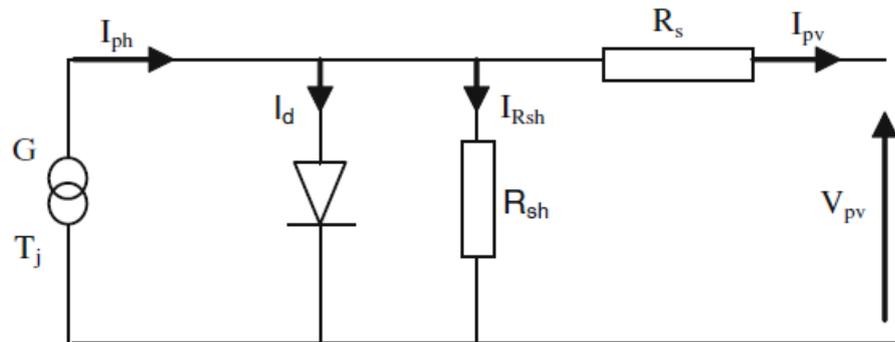
Donde:

- $I_0$ : Corriente de saturación inversa del diodo (A).

- $A$  : Área del secado directamente de la unión (área de la célula).
- $n_i$  : Concentración de portadores intrínsecos del material.
- $N_d, N_a$  : Concentración de dopantes tipo  $n$  y tipo  $p$ , respectivamente.
- $D_p, D_n$  : Coeficientes de difusión de lagunas y electrones, respectivamente del material (ver tabla).
- $L_p, L_n$  : Comprimiento de difusión de lagunas y de electrones.
- $q$  : Carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}C$ ).

**2.1.10.2. Circuito equivalente modelo estándar.**

En la figura 24, se presenta el circuito equivalente para una célula solar, donde el diodo representa una participación de la unión  $p - n$ . en oscuro,  $R_s$  y  $R_{sh}$  representan resistencias en serie y paralelo.



**Figura 24:** Circuito equivalente para una célula solar (modelo estándar).

Fuente: Rekioua – Matagne (2012).

Del circuito equivalente, tenemos las siguientes ecuaciones básicas:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh}. \quad \dots \text{(Ec. 25)}$$

$$V_{OC} = V + IR_S. \quad \dots \text{(Ec. 26)}$$

$$I_{Sh} = \frac{V_{Sh}}{R_{Sh}} = \frac{V + IR_S}{R_{Sh}}. \quad \dots \text{(Ec. 27)}$$

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{V_{Sh}}{nV_T}} - 1 \right]. \text{ y } V_T = \frac{kT}{q}. \quad \dots \text{(Ec. 28)}$$

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right]. \quad \dots \text{(Ec. 29)}$$

Conforme lo esquematizado en la figura 25, la ecuación de la curva característica de una célula fotovoltaica es la siguiente, donde  $R_S$  es la resistencia en serie y  $R_{Sh}$  es la resistencia en paralelo.

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}}. \quad \dots \text{(Ec. 30)}$$

Donde:

- $I_{Ph}$  : Es la corriente fotogenerada (A).
- $I_0$  : Es la corriente de saturación inversa del diodo (A).
- $V_t$  : Es el voltaje térmico del módulo (V).
- $n$  : Es el factor de idealidad del diodo, (1 y 2).
- $R_S$  : Es la resistencia equivalente en serie del módulo ( $\Omega$ ).
- $R_{Sh}$  : Es la resistencia equivalente en paralelo del módulo ( $\Omega$ ).

El modelo anterior, aunque es preciso y puede utilizarse en diversas pruebas de simulación, Tiene el inconveniente de incorporar cantidades que son muy difíciles de determinar, Y no son dadas por los fabricantes. Debido a esto un modelo más apropiado debe ser usado.

El modelo seleccionado para nuestra construir nuestra simulación se conoce en la literatura como “Modelo de interpolación” (Wei Xu – 2016), el cual comparado con otros modelos matemáticos es más ventajoso, porque los parámetros están directamente dados en la hoja del fabricante (Data Sheet). Pero se caracteriza por una resolución muy simple, sólo requiere de algunos parámetros, a saber: y no es necesario

realizar otros cálculos adicionales. El modelo seleccionado es descrito a continuación.

$$I_{PV} = I_{SC} \left[ 1 - C_1 \left( \exp \left( \frac{V_{PV}}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right) \right] + D_I. \quad \dots \text{(Ec. 31)}$$

Esta ecuación se ajusta exactamente al punto de cortocircuito, Donde:

- $C_2 = \left( \frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1 \right) / \ln \left( 1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right).$  ... (Ec. 32)

- $C_1 = \left( 1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right) \exp \left( - \frac{V_{MP}}{C_2 V_{OC}} \right).$  ... (Ec. 33)

- $D_I = \alpha G (\Delta T) + I_{SC} (G - 1); \Delta T = T - T_{Ref},$  ... (Ec. 34)

- $V'_{OC} = C_2 V_{OC} \ln \left( \frac{\left( 1 - \frac{I_{SC}}{C_1} \right)}{C_1} + 1 \right) - \beta (\Delta T) - R_S D_I.$  (Ec. 35)

- $V_R = V_{PV} + \beta (\Delta T) + R_S D_I.$  ... (Ec. 36)

### 2.1.10.3. Parámetros eléctricos de una célula solar.

A partir de la curva I-V y P-V, de la figura 25 mostrada; pueden ser determinados los parámetros eléctricos que caracterizan a las células o módulos fotovoltaicos estos son: voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ), corriente de cortocircuito  $I_{SC}$ , punto máximo de potencia ( $MPP$ ), factor forma ( $FF$ ) y eficiencia ( $\eta$ ).

- **Voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ).** Es la tensión entre los terminales de una célula solar, cuando no hay corriente eléctrica circulando y es la máxima tensión que una célula solar puede producir. Puede ser medida directamente con un voltímetro en los terminales del módulo.  $V_{OC}$  depende de la corriente de saturación ( $I_0$ ), de la corriente eléctrica fotogenerada ( $I_{PV}$ ) y de la temperatura, de acuerdo a la ecuación obtenida N°28.

$$I = 0 = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{V_{OC}}{V_T}} - 1 \right). \quad \dots \text{(Ec. 37)}$$

$$V_{OC} = V_T \ln\left(\frac{I_{PV}}{I_0} + 1\right). \quad \dots \text{(Ec. 38)}$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{I_{PV}}{I_0} + 1\right). \quad \dots \text{(Ec. 39)}$$

Por depender de la corriente de saturación ( $I_0$ ),  $V_{OC}$  está relacionada con la recombinación de los portadores de carga minoritarios. O el valor de  $V_{OC}$ , varía según la tecnología utilizada en las células solares (*Si*  $0.5 V - 0.7 V$ ).

- **Corriente de corto-circuito ( $I_{SC}$ ).** Es uno de los parámetros principales al analizar un módulo PV. Es la máxima corriente que se puede obtener y es medida en la célula solar cuando la tensión eléctrica en sus terminales es igual a cero. Puede ser medida con un amperímetro corto – circuitando los terminales del módulo.  $I_{SC}$  depende del área de la célula solar, la irradiación solar y de su distribución espectral, de las propiedades ópticas y de la probabilidad de colección de los pares electrón – laguna formado. La densidad de la corriente de corto-circuito ( $J_{SC}$ ) es calculada dividiéndose  $I_{SC}$  por el área del dispositivo. Los valores de la densidad de corriente varían según la tecnología empleada tales como: (*Si*  $38mA/cm^2 - 42mA/cm^2$ ).
- **Factor de forma (FF).** Es la razón entre la máxima potencia de la celda fotovoltaica y el producto de la corriente de corto-circuito con la tensión de circuito abierto, y está definido por la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}}. \quad \dots \text{(Ec. 40)}$$

Cuando son menores las pérdidas resistivas (serie y paralelo), más próxima es la forma rectangular de la curva  $I - V$ . Una definición de  $FF$  esta representada en la figura N°28. Aunque  $FF$  puede ser

relacionado empíricamente con  $V_{OC}$ , las resistencias en serie o paralelo son los parámetros más relevantes en su variación. Los valores de  $FF$  dependen de la tecnología usada como, por ejemplo:  $Si(80,9\% - 82,8\%)$ , de forma que cuanto más se aproxima a la unidad, mayor potencia puede proporcionar el módulo PV.

- **Punto máximo de potencia ( $P_{max}$ ).** El punto de potencia máxima de un módulo PV, es el parámetro que expresa el punto de funcionamiento para la cual la potencia entregada es máxima, se obtiene multiplicando el voltaje máximo  $V_{MP}$  por la corriente máxima  $I_{MP}$  por el factor de forma, dando un valor de potencia en Watts, cuando el módulo opera a este punto se obtiene el mayor rendimiento.

$$P_{max} = V_{OC} I_{SC} FF. \quad \dots \text{(Ec. 41)}$$

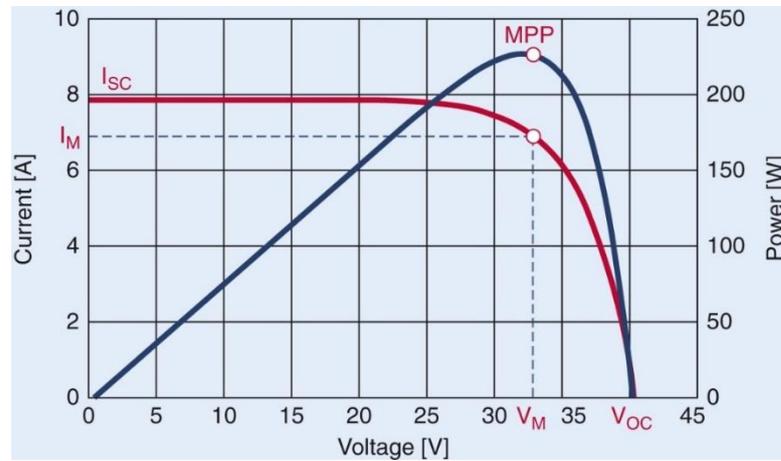
$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp}. \quad \dots \text{(Ec. 42)}$$

- **Eficiencia de conversión ( $\eta$ ).** La eficiencia es el parámetro más comúnmente utilizado para comparar el rendimiento de una celda solar con otro. Representa la relación entre la potencia eléctrica producida por la célula solar y la potencia de energía solar incidente y puede ser definida como sigue:

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{A \cdot G} \times 100\% = \frac{P_{max}}{A \cdot G} \times 100\%. \quad \dots \text{(Ec. 43)}$$

Donde:  $A$  ( $m^2$ ) es el área de la celda y  $G$  ( $W/m^2$ ) es la irradiación solar incidente. La unidad de potencia de la celda y del módulo fotovoltaico está asociada a las condiciones estándar de prueba ( $STC$ ). A partir de estos datos la curva  $I - V$ , puede ser determinada la curva de la potencia en función de la tensión, denominada curva

P – V, tal como se muestra en la figura N°28, donde se destaca el punto máximo de potencia (MPP) (Femia – Petrone, 2013).



**Figura 25:** Curva característica I–V (Rojo) y P–V (Azul) de un módulo PV.  
Fuente: Keane (2014).

En la siguiente tabla 06, se muestran valores de eficiencia en relación al material con el que se ha fabricado las células solares.

**Tabla 06:** Relación material y eficiencia módulo fotovoltaico.

Tecnología	Eficiencia (%)	
	Rendimiento Laboratorio	Rendimiento Directo
Silicio monocristalino	24	14 – 16
Silicio policristalino	19 – 20	10 – 12
Silicio amorfo	16	< 10 (6 – 8)

Fuente: Pareja Aparicio, Miguel (2008): “Energía Solar Fotovoltaico”.

- **Condiciones estándar de prueba (STC).** Los fabricantes usan lo que se denomina condiciones estándar de prueba. Esto significa que ellos ponen a los módulos PV dentro de un equipo conocido como flash – tester el cual se calibra para entregar una irradiación solar de  $1000(\frac{W}{m^2})$ , una temperatura del módulo de  $25^{\circ}C$  ( $300^{\circ}K$ ) y una masa de aire de  $1.5(AM)$  (ver Data–Sheet), con la finalidad de definir el comportamiento del panel bajo estas condiciones,

además las curvas que constan en la hoja de datos se determinan a partir de estas pruebas.

- **Temperatura de operación nominal de la célula (NOCT).** Un módulo PV puede operar normalmente a 25°C debajo de 1kW/m<sup>2</sup>. Sin embargo, cuando operan en el campo estas típicamente se encuentran a muy altas temperaturas y condiciones de insolación algo más bajas. Para determinar la potencia de salida de la célula solar, es importante determinar la temperatura de funcionamiento del módulo fotovoltaico.

La temperatura nominal de la célula en funcionamiento, se define la temperatura alcanzada por la célula a circuito abierto en un módulo en las condiciones que se enumeran a continuación:

Irradiancia en la superficie de la célula =  $800 \left(\frac{W}{m^2}\right)$ , Temperatura del aire = 20°C, Velocidad del viento = 1 m/s. Según (Arno – Klaus, 2014) una aproximación para calcular la expresión para calcular la temperatura de la célula está dada por la siguiente expresión:

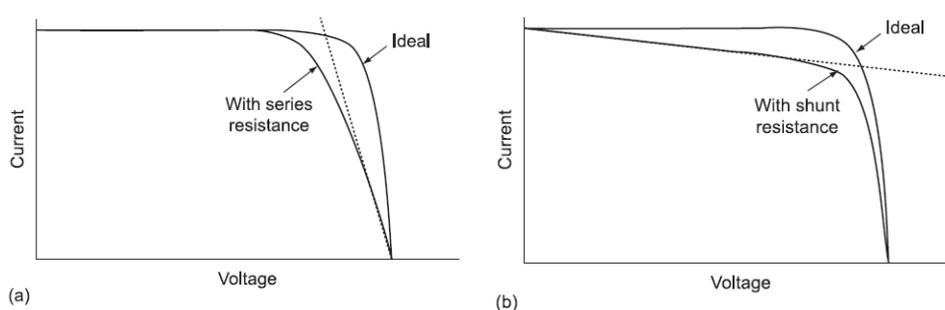
$$T_{Cell} = T_{Air} + \frac{NOCT-20}{800} \times G. \quad \dots \text{(Ec. 44)}$$

Dónde: G = irradiancia solar W/m<sup>2</sup>, NOCT aproximadamente 45 ±2°C (Data Sheet),  $T_{Air}$  = Temperatura de aire local.

- **Resistencias de pérdidas.** Los efectos de las resistencias de pérdidas en la curva característica I – V, se muestran de diferentes maneras, ambas resistencias contribuyen a la degradación de la curva. En general la caída de la corriente originada por la resistencia en paralelo  $R_{sh}$  es significativa en la parte de la curva I – V que va desde la corriente de cortocircuito hasta valores

cercanos al punto máximo de potencia.  $R_{Sh}$  determina la pendiente cerca de  $V = 0$ .

Por el contrario, la caída de la corriente debido a la resistencia  $R_S$  es mayor en los voltajes entre ( $V_{OC}$ ) y el máximo punto de potencia. En base a estas observaciones el punto máximo de potencia cae en la zona de transición donde hay mayores efectos para ambas resistencias. La resistencia en serie  $R_S$  determina la pendiente cerca del voltaje del circuito abierto el cual puede ser usado para determinar la  $R_S$  desde la hoja de datos técnicos (Castañer, 2011). En la figura 26, se puede observar los cambios que producen la variación de las resistencias  $R_S$  y  $R_{Sh}$  en la curva característica I – V de una célula solar.



**Figura 26:** Variación de  $R_s$  y  $R_{Sh}$  en la curva I–V en una célula solar.

Fuente: Castañer (2011).

### 2.1.11. El módulo solar fotovoltaico.

Una célula solar proporciona muy poca energía. Además, una sola célula es frágil y muy difícil de comercializar; el fabricante, agrupándolas para que trabajen como una sola, buscan suministrar niveles y potencia adecuados a cada aplicación, y las protege de los agentes climatológicos adversos. A esto se le llama módulo fotovoltaico; en este se le asocian eléctricamente un determinado número de células solares.

### 2.1.11.1. Asociación en serie.

En una conexión en serie, el terminal positivo de un dispositivo fotovoltaico está conectado al terminal negativo del otro dispositivo, y así sucesivamente. Para dispositivos idénticos y sometidos a la misma irradiación, cuando la conexión se encuentra en serie, las tensiones son sumadas y la corriente eléctrica no es afectada.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad \dots \text{(Ec. 45)}$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n. \quad \dots \text{(Ec. 46)}$$

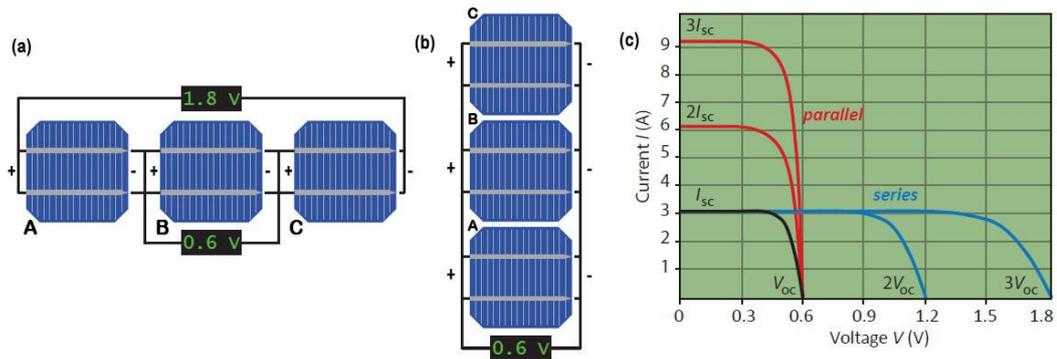
Este resultado está ilustrado en la figura 27 (c), por medio de las características I – V. Si los dispositivos son idénticos y se encuentran en las mismas condiciones de irradiación y temperatura, por lo tanto, las corrientes eléctricas individuales son iguales. Por lo tanto, la conexión en serie de las células solares permitirá aumentar la tensión final en el módulo fotovoltaico.

### 2.1.11.2. Asociación en paralelo.

En una asociación en paralelo, los terminales positivos de los dispositivos son interconectados entre sí, así como los terminales negativos. La figura 27 (c), ilustra el resultado de la suma de las corrientes eléctricas en las celdas ideales conectadas en paralelo. Las corrientes eléctricas son sumadas, permaneciendo inalterada la tensión. En conclusión, una conexión en paralelo permitirá aumentar la intensidad total del conjunto.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad \dots \text{(Ec. 47)}$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n. \quad \dots \text{(Ec. 48)}$$



**Figura 27:** (A) tres celdas solares conectados en serie, (B) conexión de tres celdas solares en paralelo, (C) curva I – V de celda solares conectados en serie y paralelo.

Fuente: Fuente: Arno – Klaus (2014).

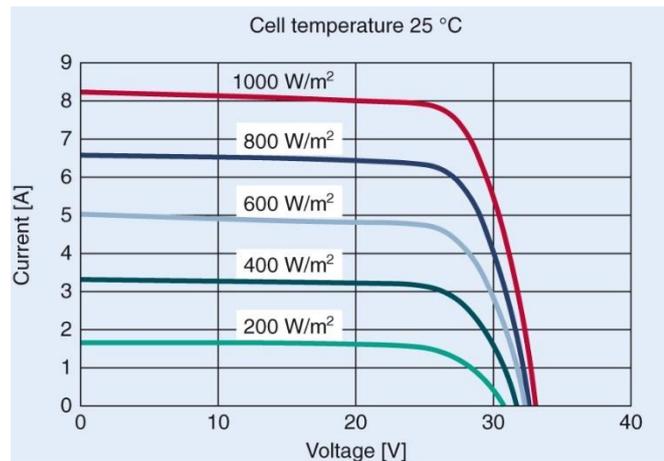
### 2.1.11.3. Parámetros externos que afectan las características eléctricas.

- **Influencia de irradiancia solar.** En la figura 28, se muestra como la irradiancia solar incidente afecta a la curva I – V, de una célula solar de silicio, mantenido a una temperatura de 25 °C. La corriente eléctrica generada por una célula solar aumenta linealmente con el aumento de la irradiancia solar incidente, en cuanto que la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) aumenta en forma logarítmica el cual es definido por la ecuación N°28, se mantiene a una misma temperatura.

$$I_{SC} = I_{SC_{stc}} \times \frac{G}{1000}. \quad \dots \text{(Ec. 49)}$$

Donde:

- $I_{SC}$  (A) : Corriente de cortocircuito del módulo, para una irradiancia  $G$  a una temperatura de 25 °C.
- $I_{SC_{stc}}$  (A) : Corriente de cortocircuito del módulo en STC.
- $G$  ( $W/m^2$ ) : Irradiancia incidente sobre el módulo.
- 1000 ( $W/m^2$ ) : Irradiancia en condiciones estándar de prueba (STC).



**Figura 28:** Curva I – V, para distintos valores de irradiancia, temperatura constante de la célula solar de silicio (25 °C).

Fuente: Keane (2014).

- Influencia de temperatura.** Los rangos de irradiancia solar incidente y de la temperatura ambiente afectan a la temperatura de operación de las células solares que componen los módulos PV. La figura 29, muestra la curva I – V, para diversas temperaturas de la célula solar, con irradiancia solar de 1000 W/m<sup>2</sup>. El aumento de la irradiancia incidente y la temperatura ambiente produce un aumento de la temperatura en la célula y consecuentemente tiende a reducir a una eficiencia. Esto se debe al hecho de que la tensión de la célula disminuye significativamente con el aumento de la temperatura, en cuanto la corriente sufre una elevación muy pequeña, casi despreciable. Las condiciones estándar se eligen generalmente para un valor de temperatura interna  $T_j = 25^\circ$ . Bajo el Sol, la temperatura interna a menudo es más alta y la eficiencia más baja. La corriente de corto-circuito  $I_{SC}$  se puede calcular a una temperatura dada  $T_j$ , para una pequeña variación de temperatura por:

$$\Delta T = T_j - T_{jref} \dots \text{(Ec. 50)}$$

$$I_{SC} = I_{SC-T_{jref}} [1 + \alpha_{SC} \cdot \Delta T] \dots \text{(Ec. 51)}$$

Donde  $\alpha_{SC}$  es el coeficiente de temperatura relativa de la  $I_{SC}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ).  $T_{jref}$  es la temperatura de referencia de la célula solar ( $^{\circ}\text{K}$ ).  $I_{SC-T_{jref}}$  es la corriente de corto-circuito en la temperatura de referencia. Similarmente, el voltaje a circuito-abierto, para una pequeña variación de temperatura puede estar también expresado como:

$$V_{OC} = V_{OC-T_{jref}} [1 + \beta_{OC} \cdot \Delta T]. \quad \dots \text{(Ec. 52)}$$

Donde  $V_{OC-T_{jref}}$  es el voltaje a circuito-abierto en la temperatura de referencia y  $\beta_{OC}$  es el coeficiente de temperatura relativo del voltaje ( $^{\circ}\text{K}$ ) puede ser encontrado en la hoja de datos (Rekioua – Matagne, 2012).



**Figura 29:** Curva I – V, Influencia de la temperatura en una célula solar; irradiancia de 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), espectro AM 1.5.

Fuente: Keane (2014).

Existen algunos coeficientes característicos de cada módulo, que indican por el cual los principales parámetros del módulo y/o célula varían con la temperatura. Estos son  $\alpha$ , para expresar una variación de la corriente de corto – circuito,  $\beta$  para expresar la variación de tensión a circuito – abierto y  $\gamma$  para expresar la variación de la potencia máxima. El valor aproximado para las células de silicio puede ser representados como:

**Tabla 07:** Valores típicos de coeficiente de temperatura para células de c-Si.

Coeficiente de Temperatura $I_{SC}$	Coeficiente de Temperatura $V_{OC}$	Coeficiente de Temperatura $P_{max}$
$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \approx +0.06\%$	$\beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \approx -0.31\%$	$\gamma = \frac{\partial P_{max}}{\partial T} \approx -0.42\%$

Fuente: ONUDI (2013): “Energía Solar Fotovoltaica”.

Se debe de considerar que los valores de los coeficientes presentados en la tabla anterior son valores aproximados para dispositivos de silicio cristalino.

### 2.1.12. Sistema fotovoltaico.

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla como energía eléctrica. Estos sistemas independientes de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden clasificar según el esquema siguiente.

- Aislados.
- Conectados a la red.
- Híbridos (Microgrids).

Hay diferentes opciones para construir un sistema fotovoltaico, pero esencialmente posee los siguientes componentes:

- Generador fotovoltaico.
- Baterías o acumuladores
- Regulador de carga.
- Inversor o acondicionador.

Estos sistemas proporcionan energía 100% renovable y gratuita durante la vida útil de la instalación calculada entre 20 a 30 años (Méndez, 2011). En los últimos años el aumento del precio de la electricidad y de su correspondiente término de potencia, y el descenso de los precios que

integran un sistema fotovoltaico han hecho posible que estos sistemas sean sistemas cada vez más usados incluso en zonas donde el acceso a la energía eléctrica convencional es posible.

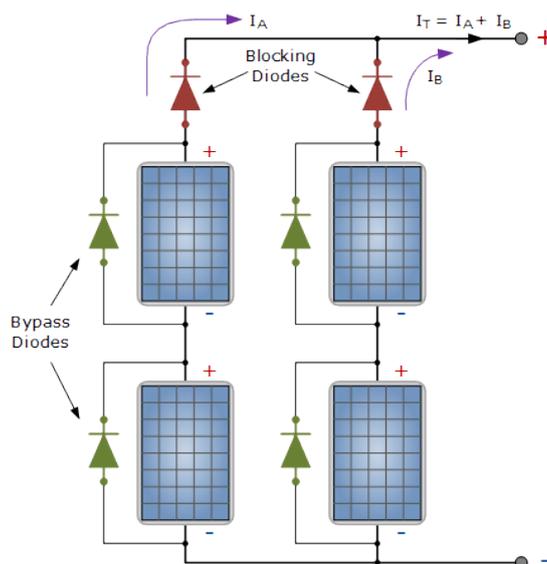
#### **2.1.12.1. El generador solar fotovoltaico.**

Cada célula solar fotovoltaica produce de  $0,4$  a  $0,7 V$  y aproximadamente  $3A$ , de acuerdo a sus características constructivas cuando se expone a la luz. Por lo tanto, un módulo fotovoltaico, está construido por una matriz de células fotovoltaicas dispuestas en conexión serie y paralelo. Al conectarse las células en paralelo, las corrientes se suman a cada módulo y el voltaje del módulo es exactamente el voltaje de la célula fotovoltaica. La corriente producida por el efecto fotovoltaico es continua.

Cuando una célula solar dentro de un módulo, por alguna razón presenta problemas al entregar la potencia de salida requerida por el módulo y cae drásticamente y está ligada en una conexión en serie, comprometerá todo el funcionamiento de las demás células fotovoltaicas del módulo.

Para que toda la corriente de un módulo fotovoltaico no esté limitada por una célula por el peor rendimiento en el caso de ser dañada, se utiliza una protección de diodos, llamado diodo de paso o bypass, eléctricamente conectada a la célula, pero con la polaridad opuesta. El uso del diodo de bypass se realiza en agrupamientos de células, lo que hace que sea muy barato en comparación con el coste de la conexión de un diodo en cada célula solar fotovoltaica.

La Figura 30, muestra una posible conexión de los diodos de bypass en un módulo PV (Wei Xu, 2016).



**Figura 30:** Conexión diodo bypass.  
Fuente: EPIA (2014).

Los módulos fotovoltaicos, pueden ser asociados en serie o en paralelo, de tal manera que se pueda obtener los niveles de corriente y tensión deseados. Estos dispositivos pueden ser desde células, módulos o arrays fotovoltaicos. La forma de curva I – V de un módulo ó array (conjunto de módulos), que compone un sistema fotovoltaico, también deberá de ser semejante a la de una única célula solar fotovoltaica obedeciendo el mismo criterio dado que:

$$I_{Array} = I_{cell} M_P N_P, \quad \dots \text{ (Ec. 53)}$$

$$V_{Array} = V_{cell} M_S N_S, \quad \dots \text{ (Ec. 54)}$$

Donde:

$M_P$  : Número de módulos en paralelo.

$M_S$  : Número de módulos en serie.

$N_P$  : Número de células en paralelo.

$N_S$  : Número de células en serie.

Una vez que todas las células son idénticas, la curva  $I - V$  del módulo podrá ser determinada por la definición de la curva  $I - V$  de cada célula fotovoltaica, en otras palabras, multiplicándose el voltaje  $V_{cel}$  por el número de líneas ( $N_S$ ) y la corriente  $I_{cel}$  por el número de columnas ( $N_P$ ). Como las curvas  $I - V$  de la célula y del módulo son semejantes, el mismo modelo es adecuado para ambos.

#### 2.1.12.2. Regulador de carga.

Para un correcto funcionamiento de un sistema fotovoltaico, es imprescindible la instalación de un sistema de regulación de carga en la unión entre los módulos solares y las baterías. Encargado de regular la cantidad de energía procedentes de los paneles y que se almacena en las baterías para su posterior uso. El regulador trabaja por tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería.

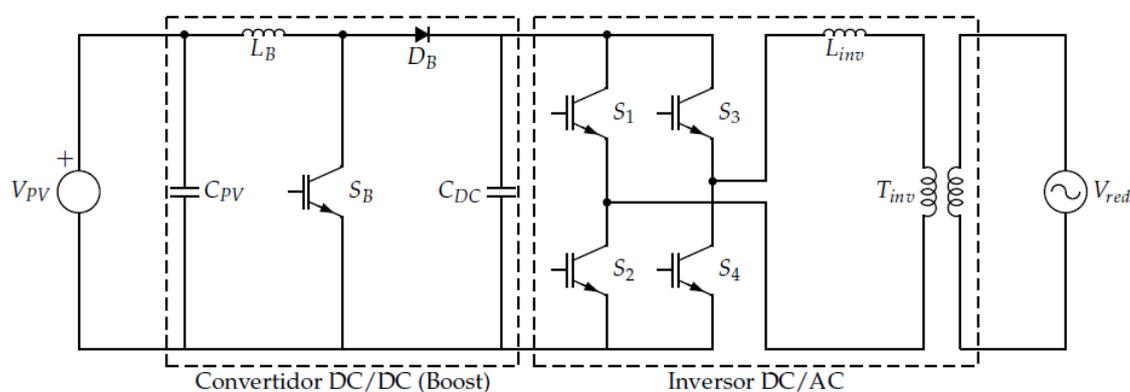
Estos elementos evitan cargas o descargas excesivas y protegen la vida de las baterías, los reguladores de carga PWM y MPPT son ambos ampliamente utilizados para cargar las baterías con energía solar.

- **El regulador PWM.** Es, en esencia, un interruptor que conecta los paneles solares a la batería. El resultado es que la tensión de dichos paneles descenderá a valores cercanos de la tensión de la batería.
- **El regulador MPPT.** Esta es la versión más sofisticada de los reguladores que hay en el mercado, ya que incorpora un convertidor de CC a CA a la salida de los módulos solares, lo que permite aislar el voltaje de trabajo de los módulos

fotovoltaicos del voltaje de las baterías. De esta manera, los módulos pueden trabajar en su punto de máxima potencia y, por tanto, el máximo rendimiento posible. Energía para suministrar un voltaje variable requerido por la batería, así como para la carga.

### 2.1.12.3. El inversor.

El sistema de acondicionamiento y control energético está formado por un inversor que transforma la corriente continua en alterna y controla la calidad de la energía destinada a la red mediante un filtro L-C montado en el interior del propio inversor. La figura 31, muestra el esquema de conexión de un inversor. La señal de potencia suministrada por un generador fotovoltaico iluminado es en tensión continua, que debe ser acondicionada para permitir el correcto acoplamiento a la red eléctrica. El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la conversión de continua a alterna cumpliendo con determinados requisitos de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, eficiencia y rendimiento, seguridad eléctrica, etc. El inversor generalmente funciona como fuente de corriente auto-conmutada y sincronizada con la red (Perpiñán, 2015).



**Figura 31:** Esquema de un inversor monofásico con topología VSI.

Fuente: Perpiñán (2015).

Este equipo electrónico es el elemento central de un sistema fotovoltaico. Además de realizar la conversión de continua a alterna, el inversor debe sincronizar la onda eléctrica generada con la de la corriente eléctrica de la red, para que su compatibilidad sea total. Los parámetros que determinan las características y prestaciones de un inversor son los siguientes:

- **Potencia.** Determinará la potencia máxima que podrá suministrar a la red eléctrica en condiciones óptimas.
- **Eficiencia máxima.** máximo valor que toma la relación entre potencia de salida y potencia de entrada. En inversores de calidad la eficiencia es estable en un amplio rango de funcionamiento del equipo y de un valor cercano a la eficiencia máxima.
- **Rendimiento energético.** Debería ser alto en toda la gama de potencias a las que se trabajará. Los modelos actualmente en el mercado tienen un rendimiento medio al 90%; El rendimiento del inversor es mayor cuanto más próximos estamos a su potencia nominal y con el fin de optimizar el balance energético es primordial hacer coincidir la potencia pico.
- **Umbral de arranque:** según las unidades en las que se expresa, puede indicar la radiación solar incidente en el generador ( $W/m^2$ ) o la potencia de entrada (W) necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.
- **Protecciones.** El inversor incorporar algunas protecciones generales que como mínimo serían las siguientes: Interruptor automático: dispositivo de corte automático, sobre el cual actuarán los relés de mínima y máxima tensión que controlarán la fase de la red de distribución sobre la que está conectado el inversor.

#### 2.1.12.4. Baterías.

En las instalaciones autónomas de suministro de electricidad, es necesario almacenar la energía captada durante las horas de radiación solar a fin de poder cubrir el suministro durante las horas en que no hay. Las baterías son dispositivos capaces de transformar la energía química en eléctrica. Las baterías son recargadas desde la electricidad producida por los módulos fotovoltaicos, a través de un regulador de carga, y pueden entregar su energía a la salida de la instalación, donde será consumida. Las principales tareas que tienen las baterías en un sistema fotovoltaico son:

- Almacenar energía durante un determinado tiempo.
- Proporcionar una potencia instantánea elevada.
- Fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Uno de los parámetros más importantes que debe de tener en cuenta en un acumulador es la capacidad de este. Las baterías se clasifican en función de la tecnología de fabricación y de los electrolitos utilizados; En la tabla 08, podemos comparar los principales tipos de baterías que hay en el mercado, a través de sus características básicas.

**Tabla 08:** Características de los principales tipos de baterías.

Tipo de Batería	Tensión por Vaso	Tiempo de Carga	Autodescarga por Mes	Nº. de Ciclos
Plomo – Ácido	2 V	8 – 16 horas	< 5%	Medio
Ni – Cd	1,2 V	1 hora	20%	Elevado
Li ion	3,6 V	2 – 4 horas	6%	Medio – Bajo

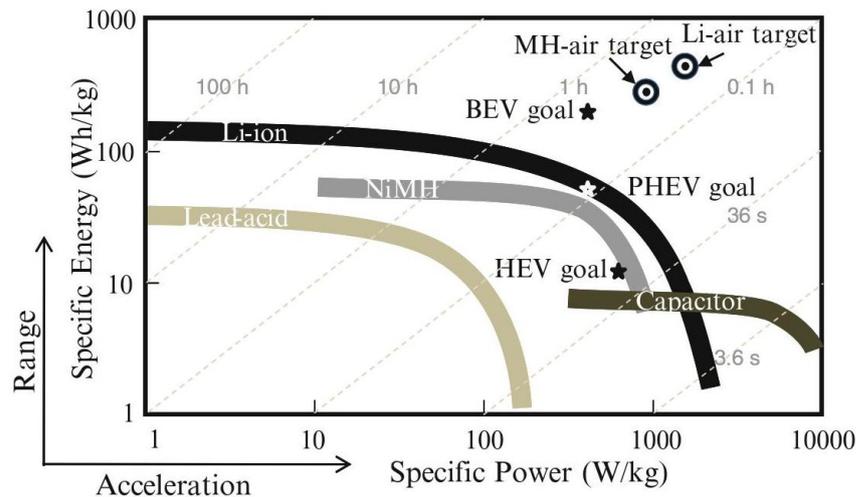
Fuente: Rahn, Christopher (2013): “Battery Systems Engineering”.

Existen numerosos tipos de baterías, para diferentes aplicaciones comunes y especiales, fabricados con diferentes materiales, Pero su selección depende mucho de la inversión de por medio para la aplicación a realizar (Rahn, 2013). La batería repite cíclicamente un proceso de acumulación de energía (carga) y entrega de la misma (descarga), dependiendo de la presencia o ausencia del sol. En este funcionamiento normal de la batería existen dos extremos:

- Sobrecarga: Cuando en el proceso de carga la batería llega al límite de su capacidad. Si en ese momento se le sigue inyectando energía, el agua de la disolución se empieza a descomponer produciendo oxígeno e hidrógeno.
- Es el regulador el encargado de impedir la entrada de energía por encima de la sobrecarga permitida y que se consuma más energía que la permitida por la sobre descarga.

En el mercado, hay diferentes tipos de baterías níquel-cadmio (NiCd), níquel-zinc (Ni-Zn), Litio-ion (Li-ion), ácido de plomo, etc. y la mayoría de ellos son aún sujeto a más investigación y desarrollo (Rekioua – Matagne, 2012).

La grafica muestra la energía específica vs potencia específica, resume el estado actual y las futuras perspectivas de las baterías en la aplicación de energía solar. Mientras que la ventaja de la batería Li-ion sobre las baterías NiMH y las de Plomo-Acido en energía específica y la potencia son obvias, el potencial de los súper-capacitores en aplicaciones de muy alta potencia no puede pasarse por alto. Un esfuerzo de desarrollo será combinar la energía específica superior ofrecida por las baterías, con la potencia específica superior ofrecida por el súper-capacitor (Garcia – Valle, 2013). El súper – capacitor ofrece una energía de caché para un acceso rápido y protege la batería de fluctuaciones muy rápidas.



**Figura 32:** Dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica.

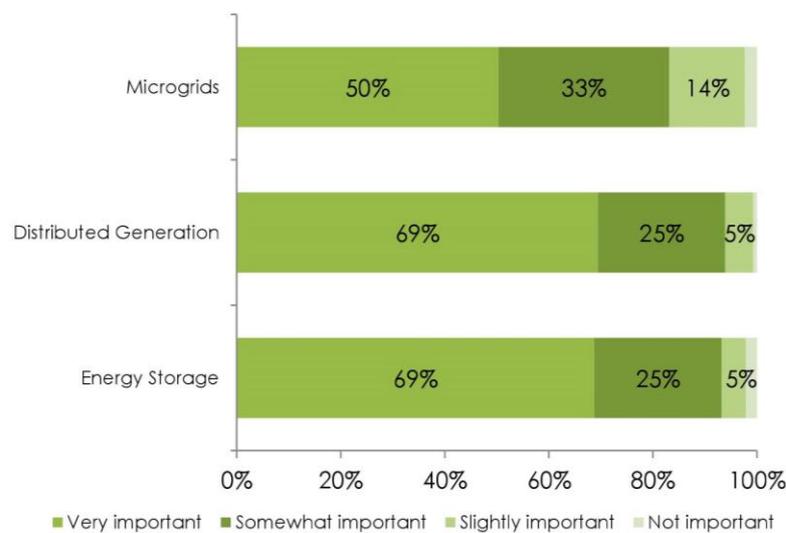
Fuente: Garcia Peças (2013).

### 2.1.13. Generación distribuida y microgrids.

El método tradicional de la generación de electrificación centralizada es gradualmente reemplazado por generación descentralizada (Jayaweera, 2016). En la búsqueda de la eficiencia y la calidad en un servicio de suministro cada vez más demandado, se ha hecho necesario construir nuevas estrategias que permitan la alta escalabilidad, un nivel de emisiones contaminantes bajos o iguales a cero y la adaptabilidad a diversas aplicaciones. Dichas cualidades pudieran estar presentes, no sólo a un nivel de descentralización macro, sino también en escalas de consumo y generación más pequeñas, concepto aplicado y relacionado a las microgrids.

En todo el mundo, el sistema de energía convencional se enfrenta a los problemas de progresivo agotamiento de los recursos de combustibles fósiles, baja eficiencia energética y contaminación ambiental. Estos problemas han dado lugar a una nueva tendencia de generación de energía, en nivel de distribución de voltaje mediante el uso de fuentes de energía renovables/no-convencionales como el: gas natural, biogás, energía eólica, Energía solar, microturbinas, y su integración en la red de distribución de servicios. Este tipo de generación de energía se denomina

como la generación distribuida (DG), y las fuentes de energía se denomina como la energía distribuida recursos (DERs). Colectivamente, el almacenamiento de energía, la generación distribuida y las microgrids impulsará la evolución de los mercados energéticos en los próximos años. Estas tecnologías incrementaran la adopción de las redes inteligentes (*SmartGrid*), y estimular nuevos mercados para el software y sistemas que integren estas tecnologías modernas y sistemas energéticos del futuro. El informe desarrollado por (*Zpryme Research & Consulting – IEEE Nov. 2012*) indica que el 69% de una Smart grid exclusivamente comienza con tecnología de almacenamiento de energía y la generación distribuida son muy importantes para aumentar el desarrollo de las Smart grid. Por otro lado, el 50% indica que la tecnología microgrid es mucho más importante para el desarrollo de una Smart grid.



**Figura 33:** Importancia e incremento del desarrollo de las nuevas tecnologías.

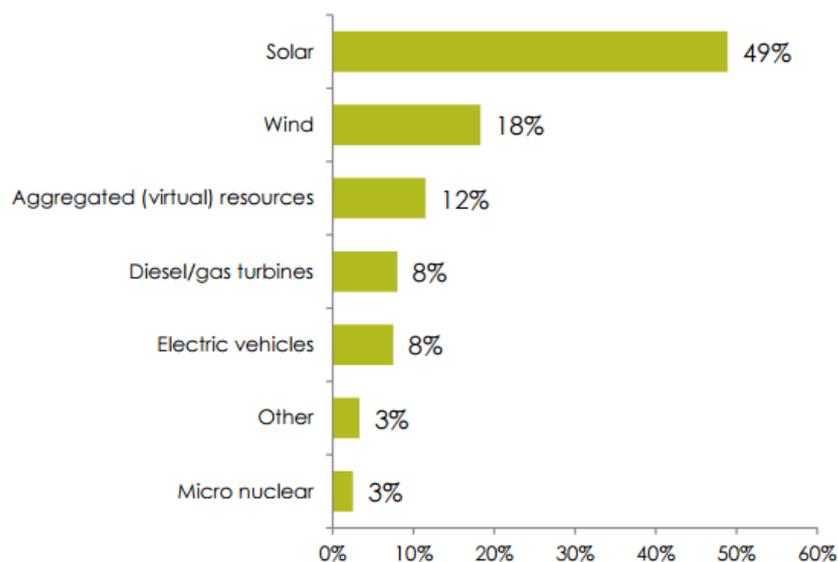
Fuente: Zpryme & IEEE (2012).

Se espera que la demanda de energía aumente considerablemente en los próximos años a causa de crecimiento demográfico y el desarrollo económico. Los incrementos mayores en la demanda de energía se registrarán en los países en desarrollo, donde se pronostica que la

proporción mundial del consumo de energía habrá de aumentar del 46 al 58% entre 2004 y 2030 (EIA, 2007).

#### 2.1.13.1. Energías renovables.

Esta consiste en energía que es producida o se deriva de fuentes que se renuevan indefinidamente, tales como en el caso de la energía hídrica, solar y eólica, o de fuentes producidas de forma sostenible, tales como la biomasa. A pesar de la predominancia pronosticada de los combustibles fósiles, se espera que el uso de las energías renovables registre un aumento, En la mayor parte de las regiones del mundo se espera que la proporción de la energía proveniente de fuentes renovables comercializadas aumente en los años venideros (Figura 34). La mayor proporción del consumo total de energía renovable se registrará con mucho en América Central y del Sur, donde las fuentes de energía no fósiles competitivas económicamente ya están bien implantadas.

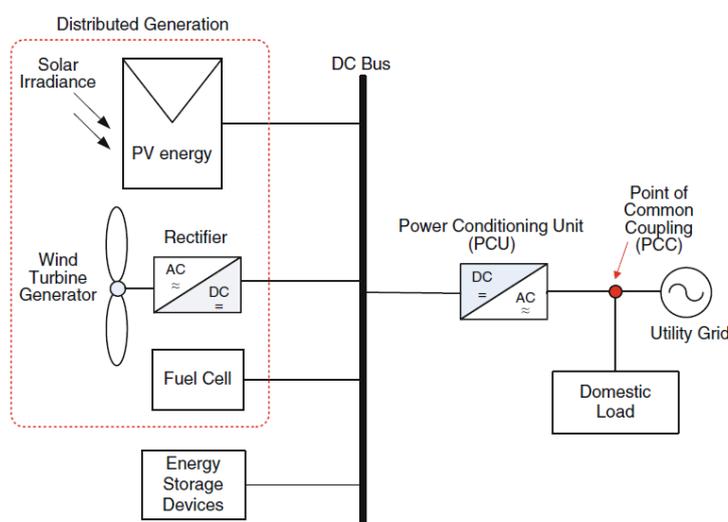


**Figura 34:** Demanda de energía renovables en los próximos años.

Fuente: Zpryme & IEEE (2012).

### 2.1.13.2. Microgrid.

Una Microgrid es una red de suministro de energía a pequeña escala, diseñado para suministrar electricidad a una pequeña comunidad, que puede operar de forma independiente o en conjunto con la red eléctrica principal. Las Microgrids son esencialmente una red de distribución activa, están compuestas por uno o más generadores distribuidos DG, interconectados entre sí para dar respuesta energética a un conglomerado de cargas. Los generadores o micro-fuentes empleados en una Microgrid son usualmente renovables no-convencionales (Chowdhury,2009).



**Figura 35:** Arquitectura elemental de una microgrid.

Fuente: Rahman, Xu (2016).

Aunque el término microgrid resulta por el momento algo impreciso, en general es aceptado debido a sus tres sus elementos característicos fundamentales (Chowdhury,2009):

- Uso de generadores distribuidos.
- Uso de centros de carga autónomos (donde no existe una planificación)
- Habilidad para aislarse o acoplarse a la red pública de suministro de energía.

Aunque son muchas las cualidades que las microgrids pudieran aportar al panorama de suministro eléctrico mundial, dado su incipiente desarrollo general, por ahora son perseguidos con más fuerza los objetivos de mejoramiento en la eficiencia y estabilidad de los procesos de producción y entrega de potencia a los consumidores, al tiempo en que se reducen las emisiones contaminantes del ambiente. Una comparación entre una red eléctrica convencional y una microgrid es mostrada en la tabla N°09.

**Tabla 09:** Comparación entre red eléctrica convencional y microgrid.

<b>Conventional grid</b>	<b>Smart grid</b>
Electromecánico	Digital
Comunicación Unidireccional	Comunicación Bidireccional
Generación Centralizada	Generación Distribuida
Pocos Sensores	Sensores por todas partes
Supervisión Manual	Auto-monitoreo
Restauración Manual	Auto-restauración
Fallos y Apagones	Adaptativa y Isla
Control Limitado	Control Penetrante
Pocas Opciones de Clientes	Muchas Opc. de Clientes

Fuente: Hatziargyriou (2014): "Microgrid: Advanced Control Methods".

En el 2008 fue publicada la estándar 1547. La estándar IEEE para las fuentes de distribución y de interconexión con sistemas eléctricos de potencia. En este documento expone los temas y aspectos en regulación en cuanto a la interconexión de microgrids basados en fuentes de energía distribuida (DER) y su coordinación inteligente e integración con la red (smartgrid), IEEE 1547 es aplicable a la operación y control de una microgrid. El desarrollo de las tecnologías a través de la investigación ha superado los estándares. Como resultado una revisión completa de IEEE 1547 actualmente está en desarrollo y debe de estar terminado en el 2018. La revisión total se

referirá al nivel de distribución de conexión DER y algunos temas relevantes a la operación y control de microgrid tales como:

- Generación, almacenamiento y funcionalidades avanzadas de DERs.
- Abastecimiento de inercia adecuada a la red con DER.
- MicroGrid.
- Intermittencia debido a la muy alta penetración de generación renovable.
- Respuesta a la demanda y efectos de carga.

## **2.2. Hipótesis de la investigación.**

### **2.2.1. Hipótesis general.**

A partir de la célula solar; es posible determinar un modelo matemático para un módulo fotovoltaico, el cual nos permita analizar los parámetros eléctricos y características de esta; y cómo se acoplaría a un sistema microgrid, en la ciudad de Puno.

### **2.2.2. Hipótesis específicas.**

- a) El modelo matemático computarizado del módulo fotovoltaico da la posibilidad de constatar la eficiencia de este.
- b) Ante la variación de irradiación solar y temperatura en nuestra zona; afectara a la potencia de salida del módulo fotovoltaico.
- c) Las energías renovables podrán integrar a nuevos sistemas de generación de energía.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación.

La presente investigación es de tipo descriptiva, pues busca desarrollar una imagen o una representación exacta (descripción) del fenómeno estudiado a partir de sus características. Se refiere a la etapa preparatoria del trabajo científico que permita ordenar el resultado de las observaciones de las conductas, las características, los factores, los procedimientos y otras variables de fenómenos y hechos.

El nivel de la investigación es del tipo analítica, porque se fundamenta en base a las teorías y formulaciones estudiadas y establecidas anteriormente por otros investigadores; implica la síntesis posterior de lo analizado, ya que se trata de entender las situaciones en términos de sus componentes, debido a que pretende descubrir los elementos que conforman la totalidad de las partes.

#### 3.2. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.

El presente proyecto de investigación titulado “Análisis y modelamiento para un módulo fotovoltaico, basado en un sistema de generación de energía renovable microgrid en la ciudad de Puno” elaborado por el tesista Bach. Wilmer SAGUA MAMANI, con la supervisión del director de investigación Ing. Marco Antonio Quispe Barra.

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizó los siguientes instrumentos para la recolección de datos y las respectivas mediciones:

- Computadora personal HP Pavilion dv4.
  - Procesador Intel(R) **Core(TM) i5** CPU 2.50GHz.
  - Memoria RAM 4.00 GB.
  - Sistema Operativo Windows 10 Pro, procesador x64 bits.

- Software MatLab/Simulink r2017a para el análisis y modelamiento del módulo fotovoltaico y el sistema microgrid.
- Módulo fotovoltaico para las pruebas para el cual se utilizó el modelo BW-L1 un módulo solar portable de la marca BlitzWolf de 20W de potencia y que puede suministrar una corriente hasta 3A.
- Multímetro Digital con sus respectivos accesorios.
- Termómetro Infrarrojo Digital Benetech GM300 Laser.

### 3.3. Procedimiento y análisis de datos.

Para el procedimiento y análisis de datos para la presente investigación como primer paso se solicitó los datos meteorológicos; específicamente temperatura y irradiación solar de la ciudad de Puno a Senamhi (Estación Central), en segundo lugar se realizó las mediciones respectivas de células solares en condiciones ambientales normales ( $G = 900 \text{ W/m}^2$  y  $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), para este caso específicamente se toman valores como corriente a corto – circuito y voltaje a circuito – abierto de las respectivas células, notándose claramente la alta eficiencia de conversión de estas. Y por último con los datos proporcionados por Senamhi y datos tomados por la medición se hace una simulación del módulo fotovoltaico en Matlab. Matlab es un software que se adapta a las necesidades de los procesos de desarrollo, investigación y análisis e interpretación de resultados, Se realiza el modelamiento del módulo fotovoltaico sometiendo a diversas condiciones ambientales en el software mencionado, obteniéndose una alta eficiencia, potencia deseada para nuestro medio.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados.

En este capítulo, se desarrollan y describen todos los procesos, cálculos matemáticos, métodos empleados en el desarrollo de la siguiente investigación, también se proporcionan los códigos de programa, y hojas de datos del fabricante (Data Sheet) con la finalidad de facilitar y permitir su uso para futuras investigaciones (ver Anexo). El desarrollo de esta investigación comprende, el análisis y modelamiento matemático de un módulo fotovoltaico en el cual esta pueda acoplarse a una red de suministro de energía a una pequeña escala (microgrid).

Para la presente tesis, aproximaremos nuestra curva característica al modelo BW – L1 un módulo fotovoltaico de la marca BlitzWolf, de 20W de potencia, una corriente de 3A y una eficiencia de conversión alta encima de del 21% y también se presenta de manera general un modelamiento para el modelo RNG-100D de 100W de potencia por ser un módulo de gama alta el cual puede cumplir con los rendimientos esperados en el tiempo.

##### 4.1.1. Modelamiento de la radiación del cuerpo negro.

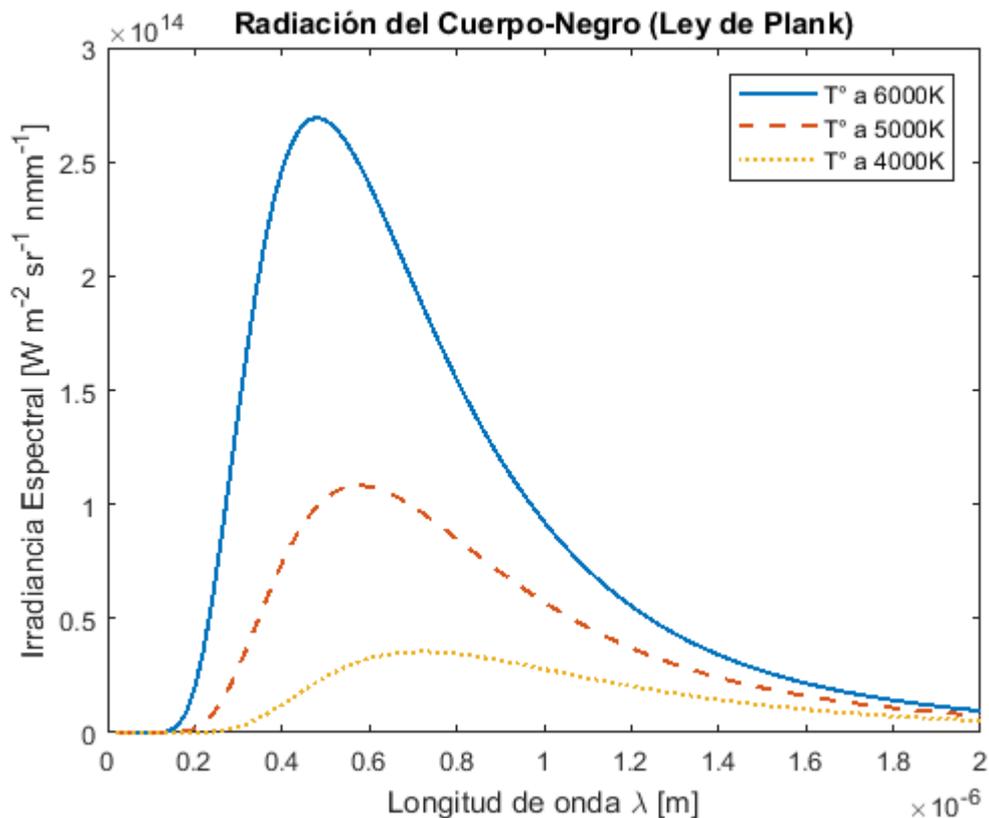
El primer paso para realizar el modelamiento de una fuente solar, es estimar la radiación emitida por el Sol. Como un factor; la energía radiante que emite cualquier objeto puede ser describir como una función de su temperatura. Una práctica usual para estimar la energía radiante por un objeto es comparar con un cuerpo negro; el cual es un perfecto emisor y absorbedor de radiación.

Puede absorber toda la energía radiante que incide sobre él, mientras un perfecto emisor; emite más energía que cualquier otro objeto. La ley de Plank; describe las ondas emitidas por un cuerpo negro a una temperatura específica como lo siguiente ecuación:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{14,400}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad \dots \text{(Ec. 55)}$$

Donde  $E_{\lambda}$  es la emisión total por unidad de área de un cuerpo negro ( $W/m^2 \mu m$ ),  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo negro ( $K$ ), y  $\lambda$  la longitud de onda en ( $\mu m$ ).

La radiación emitida por el Sol es absorbida por la atmósfera de la Tierra, por lo que no es fácil determinar la longitud de onda a la cual se produce la máxima intensidad. La radiación del Sol es emitida en todas las longitudes de onda, pero tiene un máximo en la región de luz visible tal como se muestra en la figura 36.



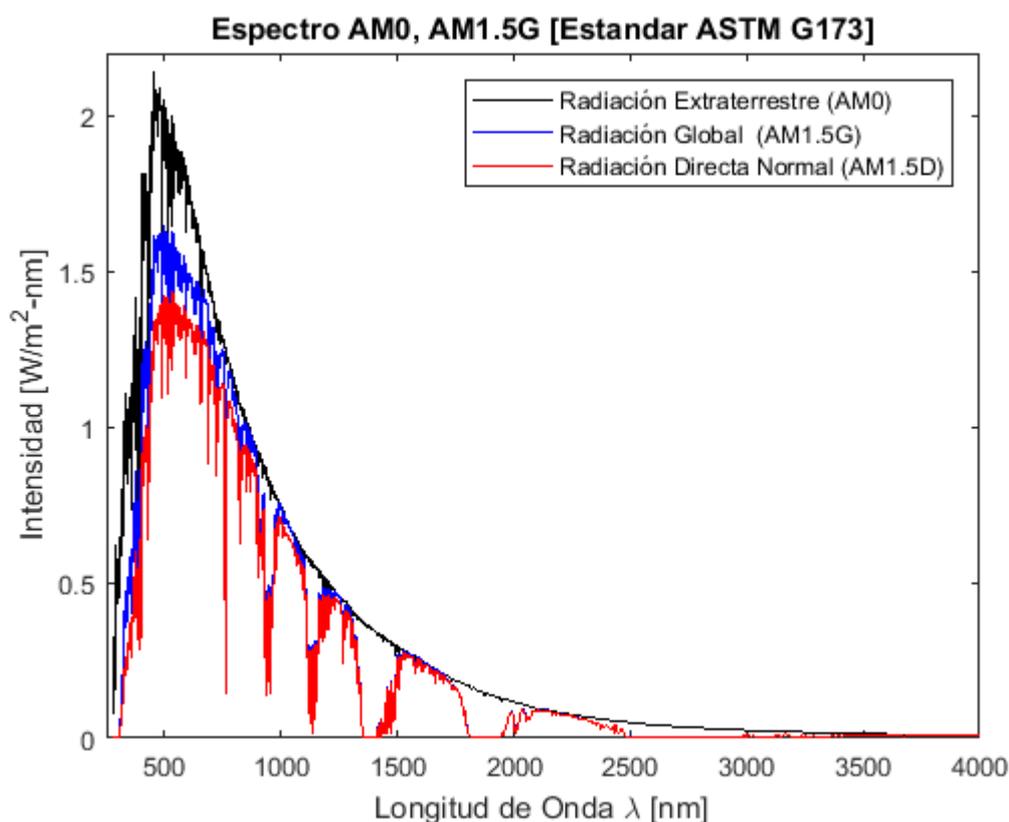
**Figura 36:** Radiación del cuerpo negro, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo "A").

#### 4.1.2. Modelamiento del espectro solar.

Es importante conocer la distribución espectral de la radiación solar. La temperatura en la superficie del Sol es alrededor de  $6000^{\circ}K$ . Cuando la radiación solar pasa a través de la atmósfera de la tierra, esta es

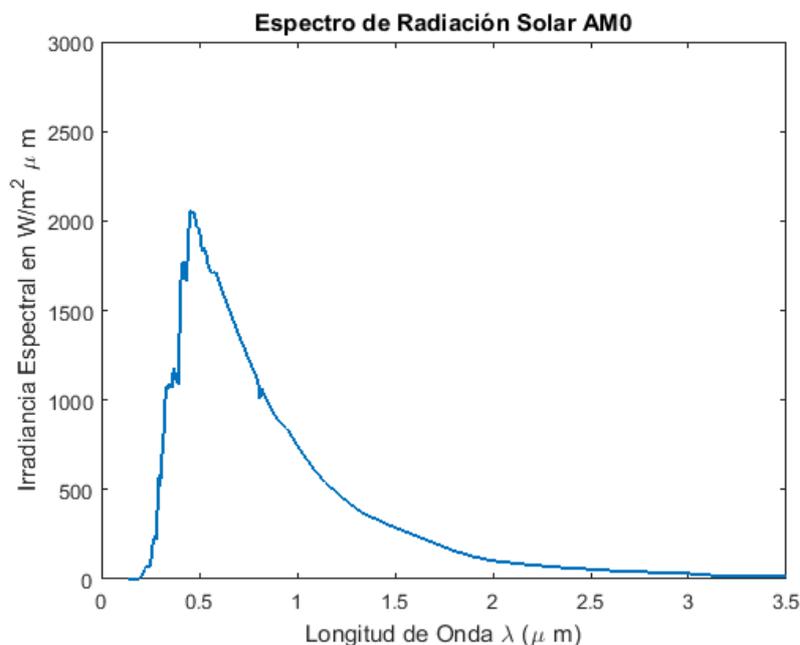
atenuada. El más importante parámetro para determinar la irradiancia solar en condiciones de cielo claro es la distancia a la que tiene que viajar la luz del sol a través de la atmosfera; esta distancia es mínima cuando el Sol está en el Zenith (directamente sobre la cabeza). La comparación real con el espectro solar es relativamente sencilla, En la figura 38, muestra el espectro AM0 es basado en el Standard ASTM E490 y usado para aplicaciones de satélites. La figura 39, muestra el espectro AM 1.5G, basado sobre el estándar ASTM G173, es para aplicaciones terrestres e incluye luz directa y difusa, esta integra los 1000 W/m<sup>2</sup> y el espectro AM1.5D también basado en G173 también para aplicaciones terrestres, pero solo incluye la luz directa e integra 888 W/m<sup>2</sup>. Una comparación entre espectros AM0, AM1.5G y AM1.5D desarrolladas en MATLAB/Simulink, se muestran en la figura 37.



**Figura 37:** Espectro solar de energía, comparación de AM0, AM1.5G y AM1.5D, modelado en Matlab.

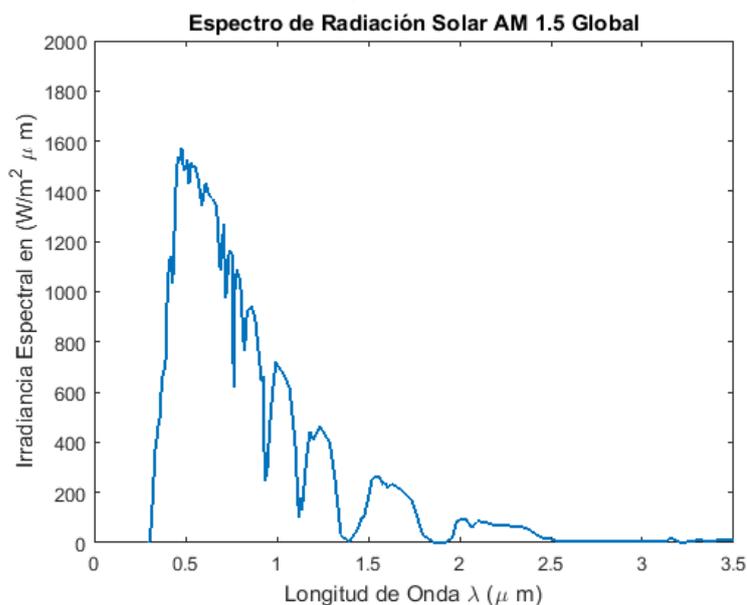
Elaboración: Propia (ver anexo "B").

Usando datos proporcionados (ver anexos), en las figuras 38 y 39, se muestran las curvas AM0 (con una irradiancia total de 1353 W/m<sup>2</sup>) y AM1.5G cuyas unidades están dadas en W/m<sup>2</sup>μm.



**Figura 38:** Espectro AM0, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo “C”).



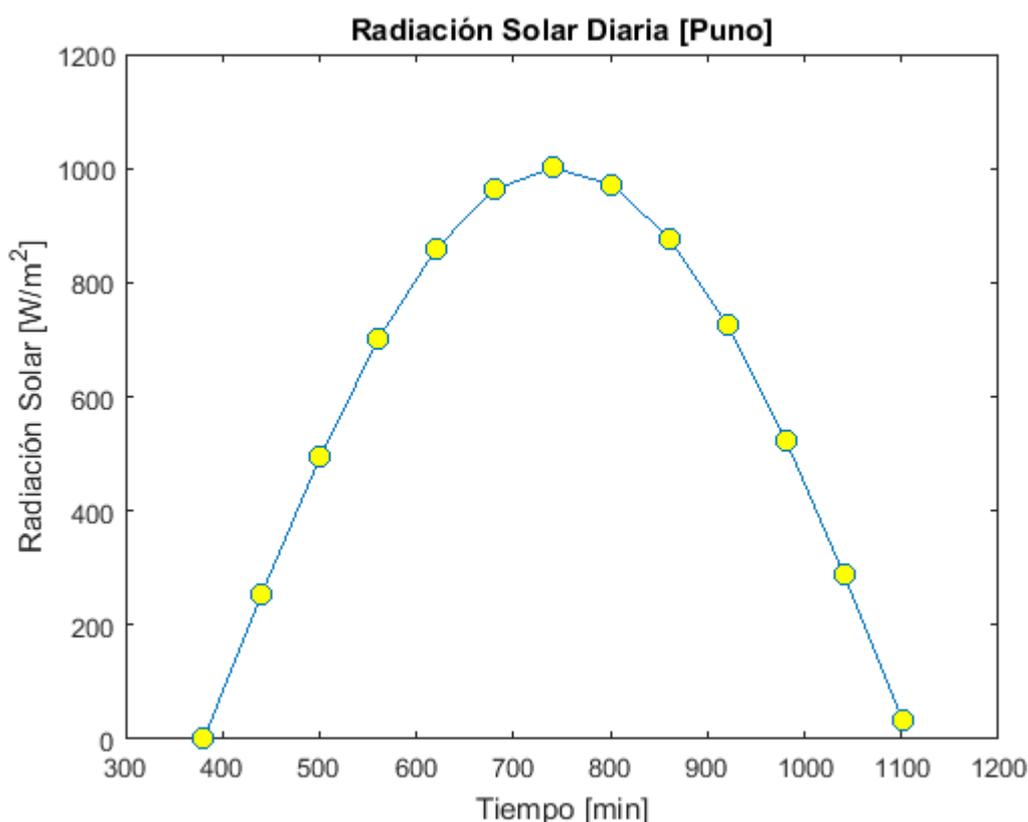
**Figura 39:** Espectro AM1.5G expresados en términos fotones incidentes, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo “D”).

#### 4.1.3. Modelamiento de radiación solar en una superficie horizontal.

La radiación solar global (radiación solar terrestre  $G_T$ ), está disponible desde el nivel del mar hasta la atmosfera de la tierra; la radiación solar en una superficie consiste normalmente de dos componentes, llamados radiación solar directa (beam) y radiación solar difusa. Según la ecuación N°3 denominado ángulo de declinación esta nos da una forma aproximada a la figura 40 .

Para la ciudad de Puno (Latitud =  $15^{\circ}50'31''$  S, Longitud=  $70^{\circ}01'11''$  O); se tiene una energía solar incidente de 5.5 a 6.5 KWh/m<sup>2</sup> dependiendo de la estación del año, y una cantidad promedio anual de insolación diaria a 5.95 KWh/m<sup>2</sup>dia, la figura muestra la insolación promedio en un día (24h).



**Figura 40:** Radiación solar diaria para Puno, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo "E").

#### 4.1.4. Demostración de las ecuaciones para el modelamiento matemático para una célula solar.

Una célula solar puede ser descrita como un modelo de primer orden y está determinada por la ecuación 21, en la que se describe a la célula por la superposición de la respuesta del dispositivo a dos excitaciones: voltaje y la irradiancia solar (Castañer, 2002).

$$J = J_{SC} - J_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right), V_T = \frac{kT}{q} \quad \dots \text{(Ec. 56)}$$

Así:  $J_{SC}$ , es la densidad de corriente espectral a corto-circuito en  $A/cm^2$  y  $J_0$ , como la densidad de corriente de saturación en  $A/cm^2$ ;  $V$ , como el voltaje en los terminales de la célula solar y  $V_T$  como el voltaje térmico de la célula solar. Según la figura 20 (tabla 2.2), para una célula solar con línea de base de Silicio se tiene que  $J_0 = 1 \times 10^{-12} A/cm^2$  y que  $J_{SC} = 31,188 \times 10^{-3} A/cm^2$ . Para el  $V_T$ , reemplazar los valores constantes de  $k$ , constante de Boltzmann y  $q$ , carga eléctrica del electrón y la temperatura en °C queda expresada la siguiente fórmula expresada en milivoltios.

$$V_T = 0.081615 \times (t + 273.15) \quad \dots \text{(Ec. 57)}$$

El valor de la corriente generada por la célula solar está dado por:

$$I = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right). \quad \dots \text{(Ec. 58)}$$

Donde  $I_{SC}$  y  $I_0$  se relacionan con sus respectivas densidades de corriente  $J_{SC}$ ,  $J_0$  y  $A = 121 \text{ cm}^2$  es el área total de la célula como sigue:

$$I_{SC} = A J_{SC}, I_0 = A J_0 \quad \dots \text{(Ec. 59)}$$

Reemplazando valores:

$$I_{SC} = 121 \text{ cm}^2 * 31,188 \times \frac{10^{-3} A}{\text{cm}^2} = 3.7 A$$

$$I_0 = 121 \text{ cm}^2 * 1 \times \frac{10^{-12} A}{\text{cm}^2} = 1.21 \times 10^{-10} A$$

Un segundo punto importante en una célula solar es  $V_{OC}$ , aplicando la condición,  $I = 0$  así la ecuación:

$$I = 0 = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad \dots \text{(Ec. 60)}$$

El voltaje a circuito abierto es dado por:

$$V_{OC} = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad \dots \text{(Ec. 61)}$$

$$V_{OC} = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad \dots \text{(Ec. 62)}$$

$$P = V I = V \left[ (I_{Ph} - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)) \right] \quad \dots \text{(Ec. 63)}$$

Del cual resulta la curva característica de I-V mostrada en la figura 42. El valor de la corriente generada por la célula solar está dado por la ecuación 56. Como se mencionó anteriormente un módulo PV está integrada básicamente por un arreglo de células solares, de modo que a partir del circuito en la figura 23, de una célula individual ideal, se agrupa en serie y/o paralelo para formar el módulo PV.



**Figura 41:** Medición de parámetros eléctricos para célula solar, en módulo PV modelo BW\_L1 - 20W.

Fuente: Foto tomada por el investigador (06/04/2017).

Se configuró el multímetro para la medición de voltaje DC y se colocó las puntas terminales en paralelo a la salida de los bornes del módulo PV como se ilustra en la figura 41. Obteniéndose un  $V_{OC} = 6.45 \text{ V}$ , el cual es el máximo voltaje entregado por el módulo PV, para determinar el voltaje suministrado por cada célula es calculada por la siguiente relación:

$$\frac{V_{OC-Módulo}}{N^{\circ} \text{ Células}} = \frac{6.45V}{6} = 1.075V \quad \dots \text{ (Ec. 64)}$$

Para determinar la  $I_{SC}$  del módulo PV, se tomó mediciones bajo condiciones normales, para los valores de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y temperatura de  $24.5^{\circ}\text{C}$ . Obteniéndose un  $I_{SC} = 3 \text{ A}$ , el cual es la máxima corriente que puede entregar el módulo PV.

La resistencia  $R_S$  afecta significativamente la construcción de la curva I-V en la pendiente, como una consecuencia de aproximación se puede definir como:

$$R_S \rightarrow 0 = R_S \approx -\frac{dV}{dI} \Big|_{V=V_{OC}} \quad \dots \text{ (Ec. 65)}$$

El cual tiene un valor muy pequeño comprendido entre los  $0.05 \Omega - 0.012 \Omega$ , mientras la resistencia  $R_{Sh}$  afecta la curva I-V en el nivel de corriente de corto – circuito, y se puede aproximar a:

$$R_{Sh} \rightarrow \infty = R_{Sh} \approx -\frac{dV}{dI} \Big|_{I=I_{SC}} \quad \dots \text{ (Ec. 66)}$$

Y tiene un valor comprendido entre los  $200 \Omega - 350 \Omega$ , los valores de  $V_{mp}$  y  $I_{mp}$ , pueden ser estimados a partir de  $V_{OC}$  y  $I_{SC}$  mediante las siguientes relaciones:  $V_{mp} \approx (0.75 - 0.9)V_{OC}$ ,  $I_{mp} \approx (0.85 - 0.95)I_{SC}$ , porque el voltaje de la célula y corriente; dependen de la  $T^{\circ}$ ; la potencia suministrada también cambia con la temperatura.

$$\begin{aligned} T_{Cell} &\approx 18^{\circ}\text{C} + \frac{45^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C}}{800G} * 1000G = 49.25^{\circ}\text{C} \rightarrow 49.25^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} \\ &= 24.25^{\circ}. \end{aligned}$$

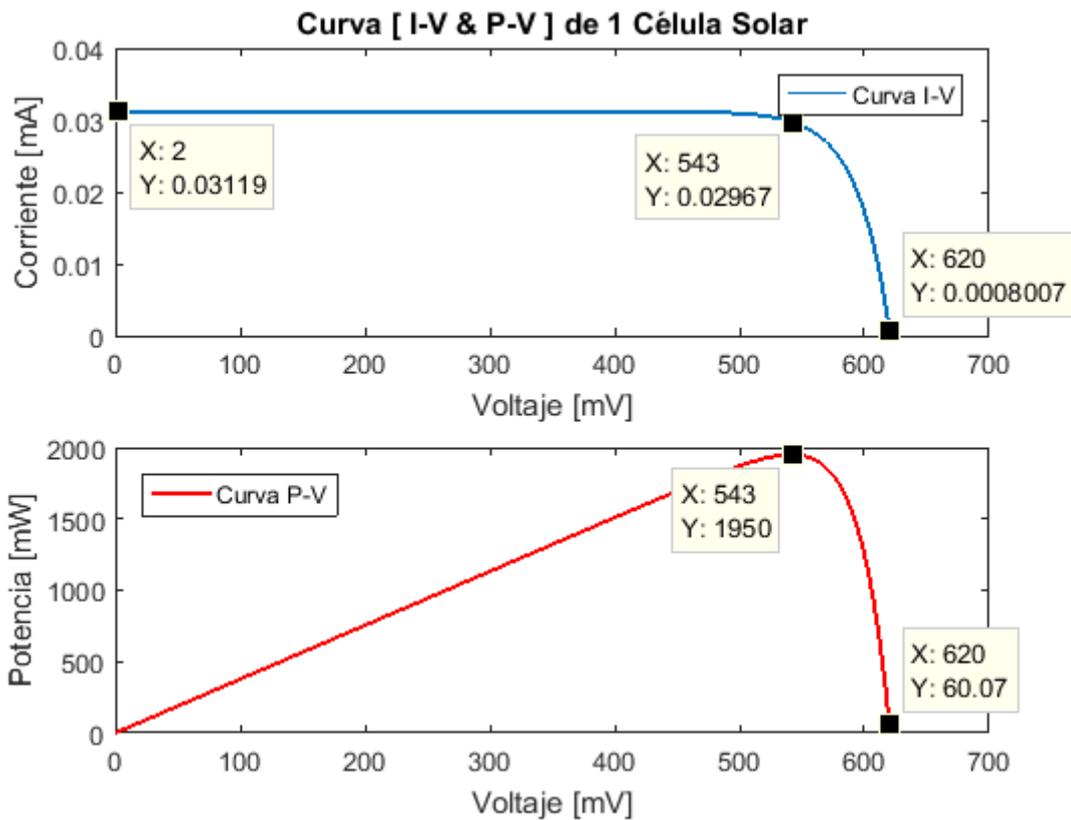
**Tabla 10:** Valores obtenidos para célula solar.

	Temp (°C)	Área (cm <sup>2</sup> )	$P_{Max-Cell}$ (W)	$I_{SC-Cell}$ (A)	$V_{OC-cell}$ (V)
Simulado (Ideal)	25°C	Ideal (100)	1.95 W	0.031mA	0.62 V
Medido	24.25	121	2 W	3.7 A	1.075 V

Elaboración: “Propia del investigador – 2017”.

**4.1.5. Modelamiento de una célula solar en condiciones (STC).**

El más simple circuito equivalente de una célula solar es una fuente de corriente conectado en paralelo con un diodo como se muestra en la figura 23. La salida de la fuente de corriente es directamente proporcional a la luz que cae sobre la célula. Si la luz cae en la célula solar esta genera una corriente de diodo. El diodo D, determina la curva característica I – V, P – V de la célula solar, esta es mostrada en la figura 42.



**Figura 42:** Curva característica I – V. de célula solar, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo “F”).

#### 4.1.6. Comportamiento de la curva $I - V$ , $P - V$ ; por la variación de la irradiancia solar.

Sobreentendiendo que un módulo PV, está conformado por la agrupación de células solares conectados en serie y/o paralelo; para el cual se consideró el módulo PV modelo “RNG-100D” para las simulaciones respectivas, (Ver Anexo “J” Data Sheet). A continuación, se realiza las respectivas simulaciones en STC y en condiciones ambientales no uniformes, para tal se utilizó la ecuación 30 (método de interpolación) como principal referente. Los ensayos simulados en MATLAB/Simulink nos permiten llevar a cabo comparaciones a STC y condiciones no uniformes del módulo PV. Las condiciones de ensayo se definen como sigue: irradiancia:  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura:  $T = 25^\circ\text{C}$ , masa aire:  $AM = 1,5AM$ .

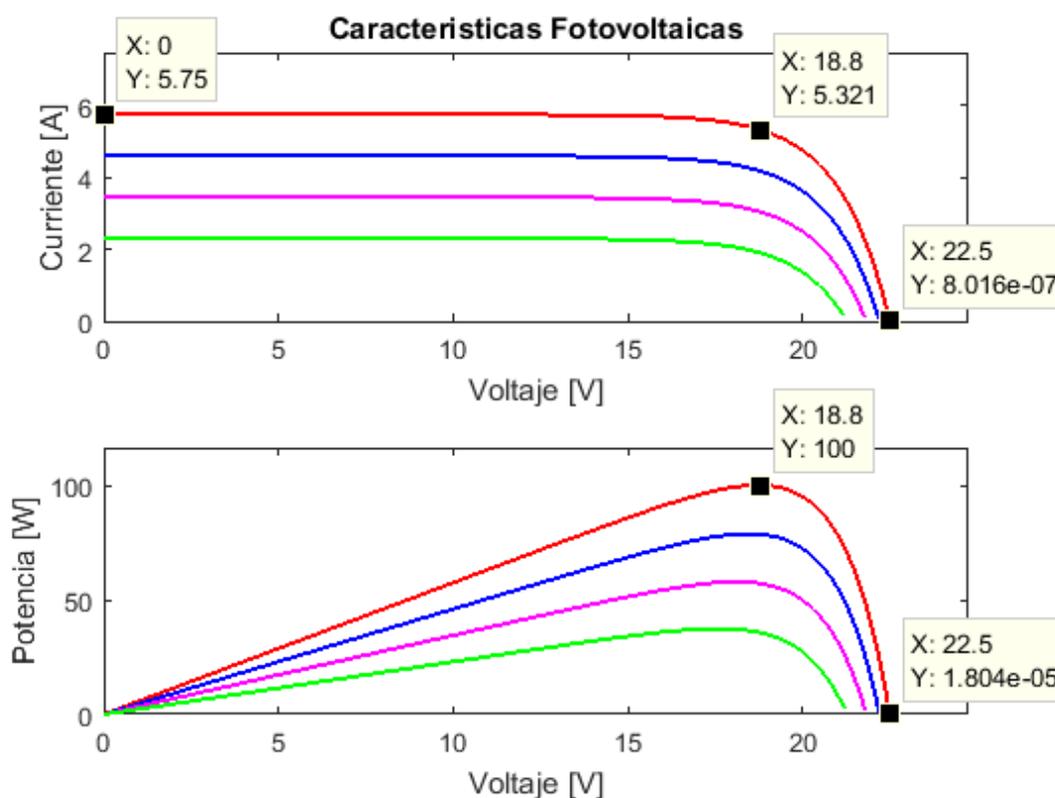
Las características eléctricas del módulo fotovoltaico son representadas por medio de  $I - V$  y  $P - V$ , como se representa en la figura 43, son totalmente dependientes en particular de las condiciones climáticas. Específicamente, las curvas características  $I - V$  y  $P - V$  dependen de la irradiancia solar incidente ( $G$ ), que recae sobre el módulo PV y la temperatura del módulo PV. En la figura 43, se refleja el efecto de la curva característica de un módulo fotovoltaico en diferentes niveles de irradiancia, Se puede notar que la corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) es semi - linealmente dependiente de la irradiancia solar, mientras el cambio del voltaje a circuito abierto ( $V_{OC}$ ) es menor. Así, la salida de la potencia en el punto máximo de potencia incrementa cuando incrementa la irradiancia solar.

También se presenta una tabulación en la siguiente tabla (ver tabla 11), de cómo evoluciona la potencia nominal de salida del módulo PV, y los otros parámetros eléctricos presentados en ella, esto debido al cambio de la irradiancia solar.

**Tabla 11:** Valores obtenidos para el módulo PV (Variación de Irradiancia).

G	T	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
1000W/m <sup>2</sup>	25 °C	100W	5.75A	22.5V	5.32A	18.8V	15.47
800W/m <sup>2</sup>	25 °C	78.8W	4.6A	22.2V	4.259A	18.5V	12.20
600W/m <sup>2</sup>	25 °C	57.88W	3.45A	21.8V	3.198A	18.1V	8.96
400W/m <sup>2</sup>	25 °C	37.42W	2.3A	21.2V	2.126A	17.6V	5.79

Elaboración: “Propia del investigador – 2017”.



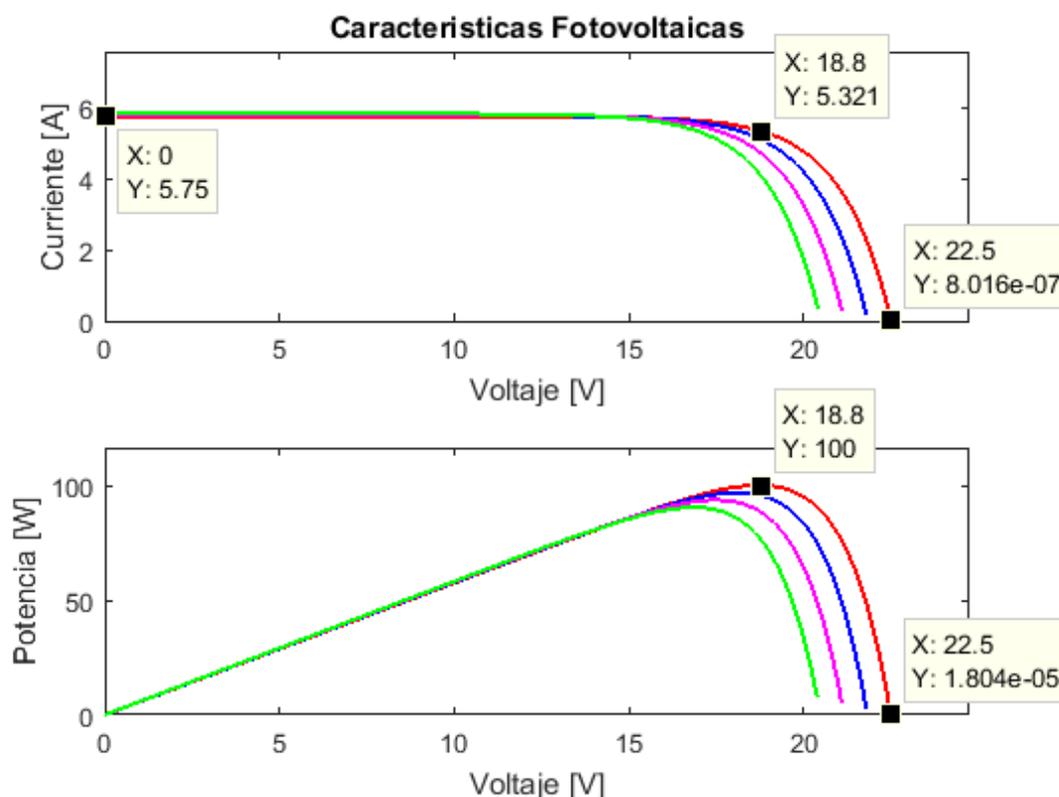
**Figura 43:** Efecto irradiancia (G), curvas I – V, P – V de un módulo PV, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo “G”).

#### 4.1.7. Comportamiento de la curva I – V, P – V; por la variación de la temperatura.

La temperatura de la célula posee un efecto importante sobre el valor de la tensión en circuito abierto ( $V_{OC}$ , que es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna

carga), y lo podemos ver sobre la curva  $I - V$ , según muestra en la figura 44. Así, al aumentar la temperatura, la tensión  $V_{OC}$  disminuye del orden de unos pocos milivoltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura; tiene un efecto en la curva característica  $I - V$  y  $P - V$ , del módulo PV. Con un incremento de la temperatura, la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  aumente marginalmente, como resultado de la absorción de la luz. Por otra parte, el voltaje a circuito abierto  $V_{oc}$  es afectado fuertemente por la temperatura y disminuye significativamente. En situaciones de la vida real, bajo condiciones del Sol las temperaturas a menudo son más altas que las STC, y constantemente la eficiencia de los módulos fotovoltaicos es baja; las curvas características para diferentes niveles de temperatura desarrollado en Matlab se pueden observar en la figura 44.



**Figura 44:** Efecto temperatura, curvas características de un módulo PV, modelado en Matlab.

Elaboración: Propia (ver anexo "G").

En la siguiente tabla N°12 se puede apreciar, como cambia drásticamente  $V_{OC}$  y  $V_{mp}$  en el módulo fotovoltaico; y como consecuencia existe una diferencia aproximada de 10W en la  $P_{Max}$  (potencia máxima) de salida (STC = 100W), esto debido al incremento de la temperatura del módulo fotovoltaico, también se puede notar un breve incremento en  $I_{SC}$  y  $I_{mp}$ . De forma resumida; la temperatura es un segundo factor determinante de un módulo PV.

**Tabla 12:** Valores obtenidos para el módulo PV (Variación de Temperatura).

T	G	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
25 °C	1000W/m <sup>2</sup>	100W	5.75A	22.5V	5.32A	18.8V	15.47
35 °C	1000W/m <sup>2</sup>	96.86W	5.77A	21.8V	5.351A	18,1V	14.99
45 °C	1000W/m <sup>2</sup>	93,65W	5.79A	21.1V	5.352A	17.5V	14.49
55 °C	1000W/m <sup>2</sup>	90.42W	5.82A	20.4V	5.35A	16.9V	13.99

Elaboración: "Propia del investigador – 2017".

#### 4.1.8. Comportamiento de la curva I – V, P – V; por efecto de sombreado parcial.

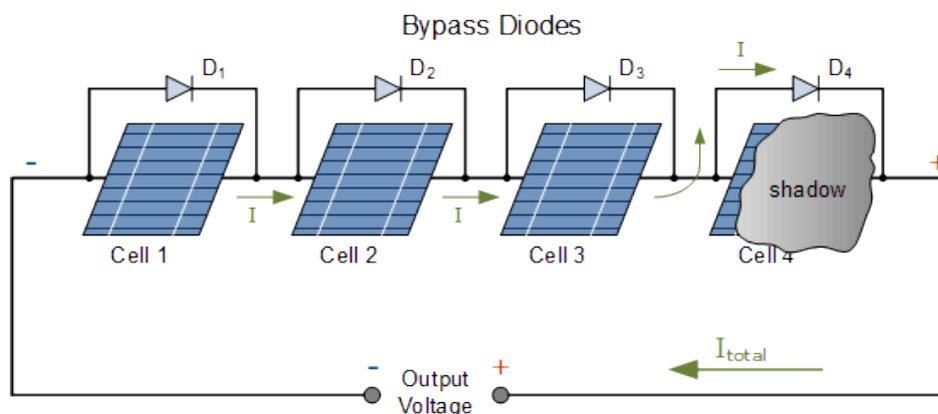
En esta sección se describe el procedimiento usado para la simulación de la curva característica I – V y P – V, de un sombreado parcial en un módulo PV.

Es importante entender como el patrón de sombreado en la estructura de un módulo PV; son definidos mediante el esquema (ver figura 47) el cual es desarrollado en MATLAB/Simulink. En el diagrama desarrollado en Simulink, se tiene un típico módulo PV, el cual es configurado como una combinación de 3 conjuntos, las cuales en su interior simulan que posee 12 células solares conectadas en serie en cada grupo; haciendo un total de 36 células solares fotovoltaicas en todo el módulo PV.

Cada conjunto de las células solares opera bajo diferentes niveles de irradiancia solar y diferentes niveles de temperaturas en otras palabras en

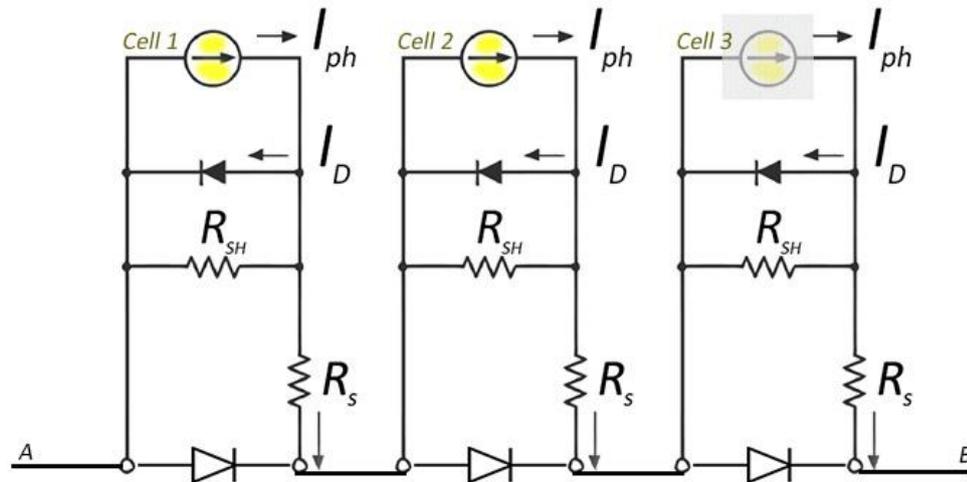
condiciones ambientales no uniformes (se debe ingresar variables  $G$  y  $T$ ) de tal manera que se puede observar como el MPPT siempre busca el punto más alto en el eje  $Y$ , el cual vendría a ser la potencia máxima deseada del módulo. Básicamente un diodo es un dispositivo electrónico en el cual la corriente eléctrica circula en un solo sentido, la función del diodo(s) bypass es proteger básicamente la integridad del propio módulo PV o array del cual puede ser parte, pues si una célula del módulo no recibe radiación debido a puntos calientes o efectos de sombra; esta se comporta como circuito abierto y la corriente circula a través de la resistencia ( $R_{shunt}$ ) el cual se comporta como carga resistiva, la potencia se disipa a través de esta por lo que la potencia se transforma en temperatura, y esto produce un punto caliente; es en ese momento que entra en operación los diodos bypass; sin estos se vería afectado negativamente el rendimiento del módulo PV puesto que las células solares están conectadas en serie.

La figura 45 muestra cómo se debería conectar los diodos bypass. Y la figura 46, muestra el circuito equivalente de las células solares; las cuales son conectadas en serie con su respectivo diodo bypass para formar un módulo fotovoltaico.



**Figura 45:** Protección de células solares con diodos bypass.

Fuente: Sumathi (2015).



**Figura 46:** Conexión de células solares con diodos bypass.

Fuente: Sumathi (2015).

Para el análisis analítico por el efecto de sombras parciales propuesto aquí, esta se basa en varios supuestos; como describe la figura 47. Lo primero que se tiene un módulo PV (típico escenario de 36 células); compuesto por subconjuntos de células solares, conectados en serie; cada uno protegido por un solo diodo bypass.

Basados en las condiciones anteriormente expuestas se ilustra los resultados de las simulaciones del módulo PV, las curvas características son mostradas de la figura 48 a la 50, observándose en cada ilustración tres múltiples diferentes picos. El pico máximo es llamado el punto máximo de potencia (pico global) y los dos picos restantes se llaman como los picos locales.

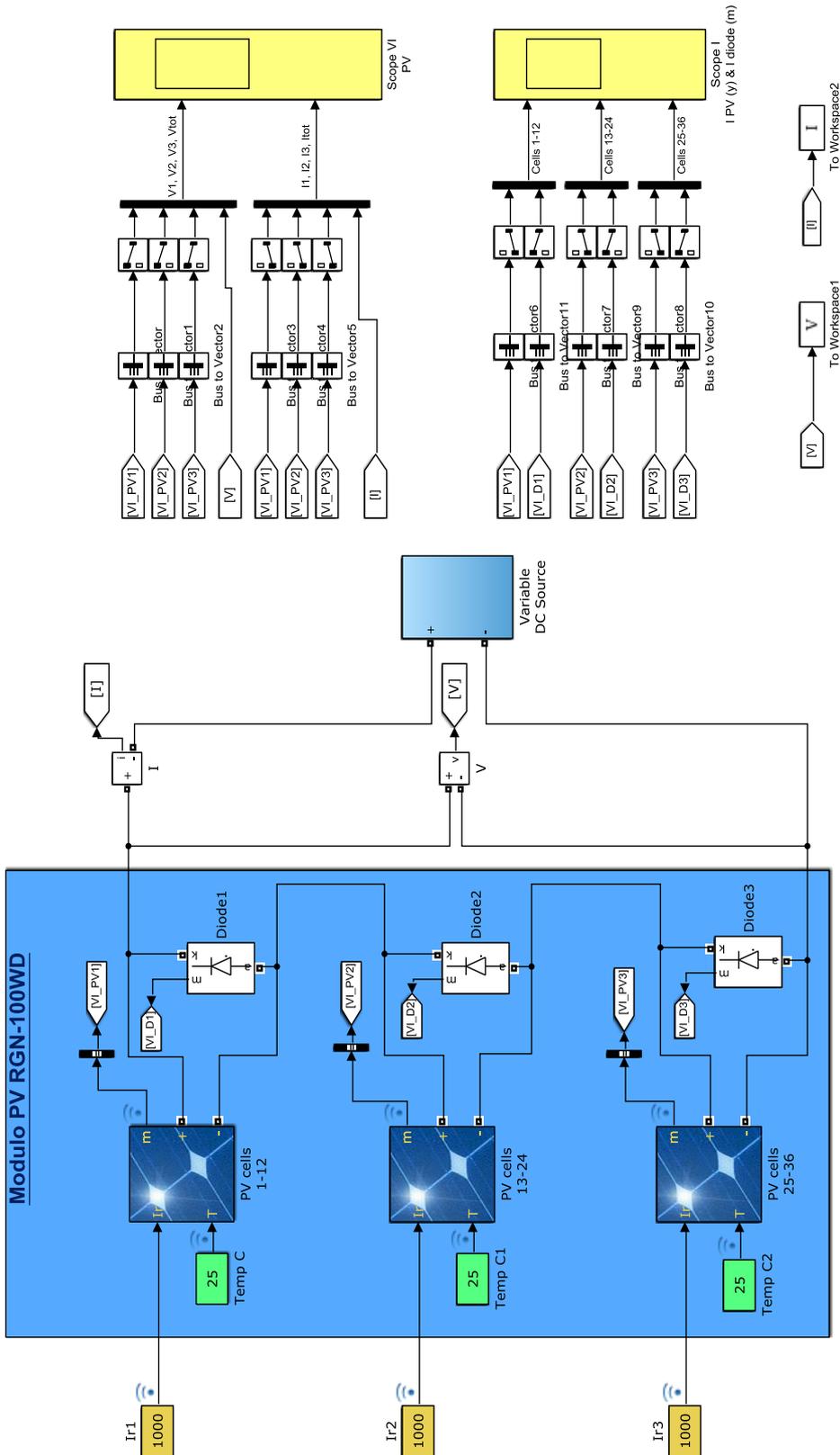
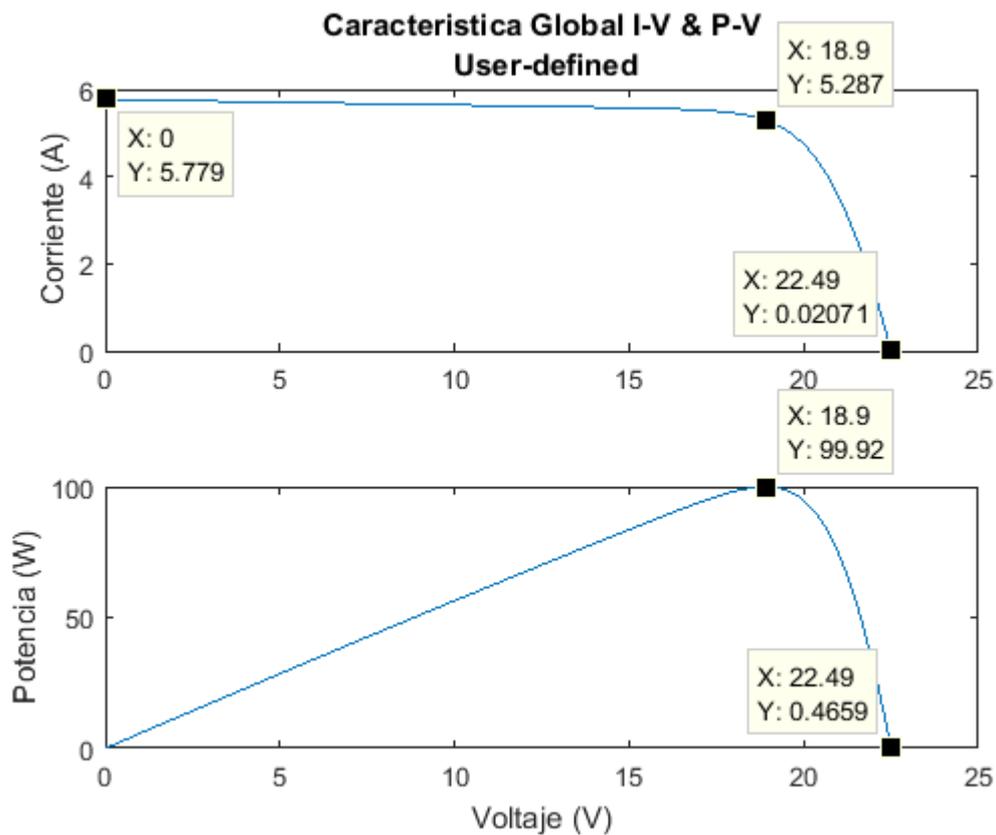


Figura 47: Modelo propuesto y desarrollado en Simulink; efecto sombra.

Fuente: Elaboración Propia.

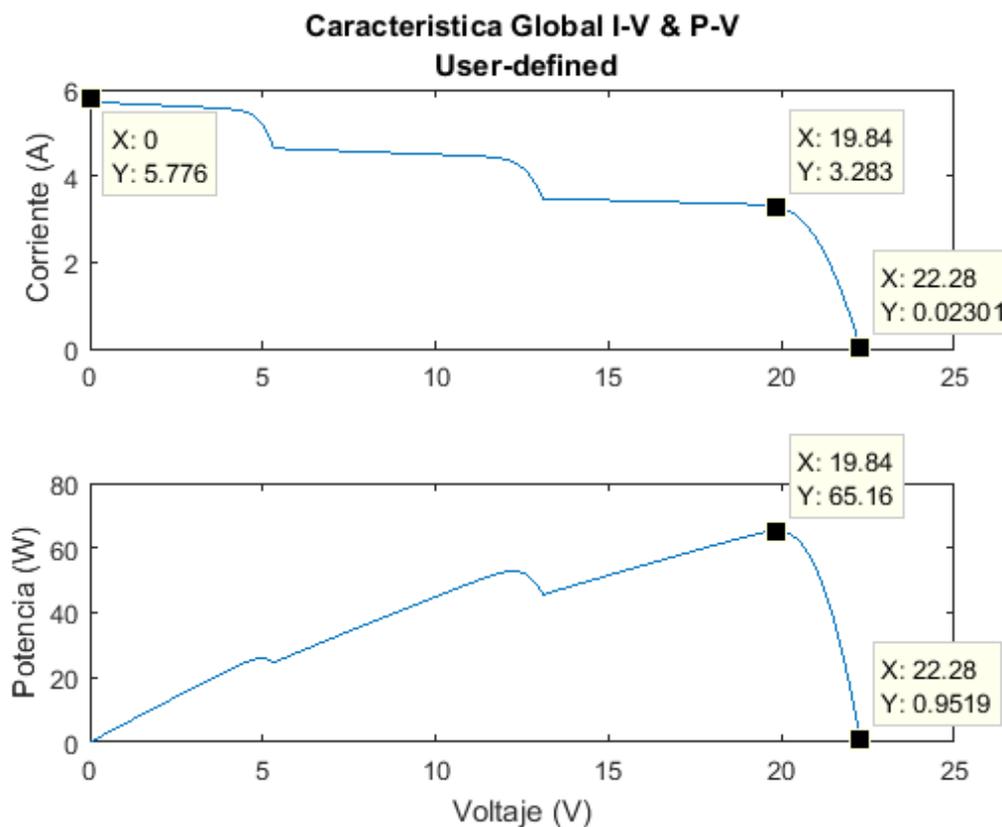
Una vez desarrollado el modelo (módulo PV) en Simulink; sobreentendiendo como funciona una célula solar (curva I – V). Ahora analizaremos el comportamiento de diversas células conectadas en serie sometidas a sombras parciales.

Para ello se ha introducido en primer lugar valores uniformes a todo el módulo PV ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  y  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dando como resultado la figura 48, en segundo lugar se introduce diversos valores de irradiancia (sombras parciales), a los tres grupos de las células solares; obteniéndose la curva característica I – V, P – V (ver figura 49), esta muestra el pico global de  $P_{max}$  muy por debajo de la  $P_{max}$  (figura 48) un módulo PV sin sombras ( $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ).



**Figura 48:** Curvas I – V, P – V módulo PV sin sombra,  $G = 1000\text{W/m}^2$  y  $T = 25^\circ\text{C}$  modelado en Simulink.

Elaboración: Propia.



**Figura 49:** Curva I – V & P – V, con sombra  $G$  ( $W/m^2$ ) = 1000, 800, 600 y  $T^\circ = 25^\circ C$ , modelado en Simulink.

Elaboración: Propia.

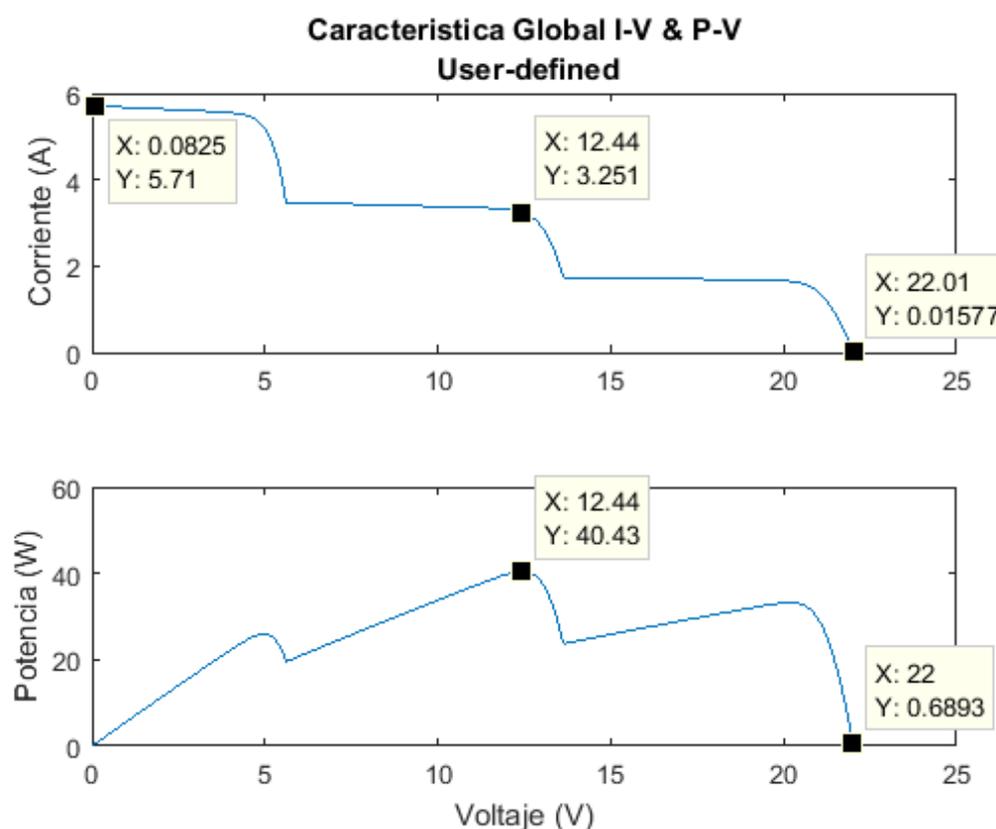
En la siguiente tabla, se presenta la potencia máxima que se puede obtener del módulo PV; ante supuestos efectos de sombra al cual está sometido el sistema, también se puede notar que el rendimiento se ve seriamente comprometido al valor inicial que se tenía (STC).

**Tabla 13:** Valores obtenidos para el módulo PV (Por Sombreado Parcial).

T	G	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
25 °C	1000W/m <sup>2</sup>						
25 °C	800W/m <sup>2</sup>	65.16W	5.776A	22.28V	3.283A	19.84V	10.08
25 °C	600W/m <sup>2</sup>						

Elaboración: “Propia del investigador – 2017”.

A continuación, se realiza la simulación para valores distintos de irradiancia solar ( $G$ ) para el módulo PV 1000, 300, 600 ( $W/m^2$ ); observándose el comportamiento  $I - V$  y  $P - V$  en la figura 50. Los parámetros eléctricos de salida del módulo PV, son presentados en la tabla 14, notamos que la  $P_{max}$  de salida es cerca a los 40W, lo cual da a entender que se ha perdido un buen rendimiento del módulo PV.



**Figura 50:** Curvas características  $I - V$  &  $P - V$ , con sombra  $G$  ( $W/m^2$ ) = 1000, 300, 600 y  $T^\circ = 25^\circ C$ , modelado en Simulink.

Elaboración: Propia.

**Tabla 14:** Valores obtenidos para el módulo PV (Por Sombreado Parcial).

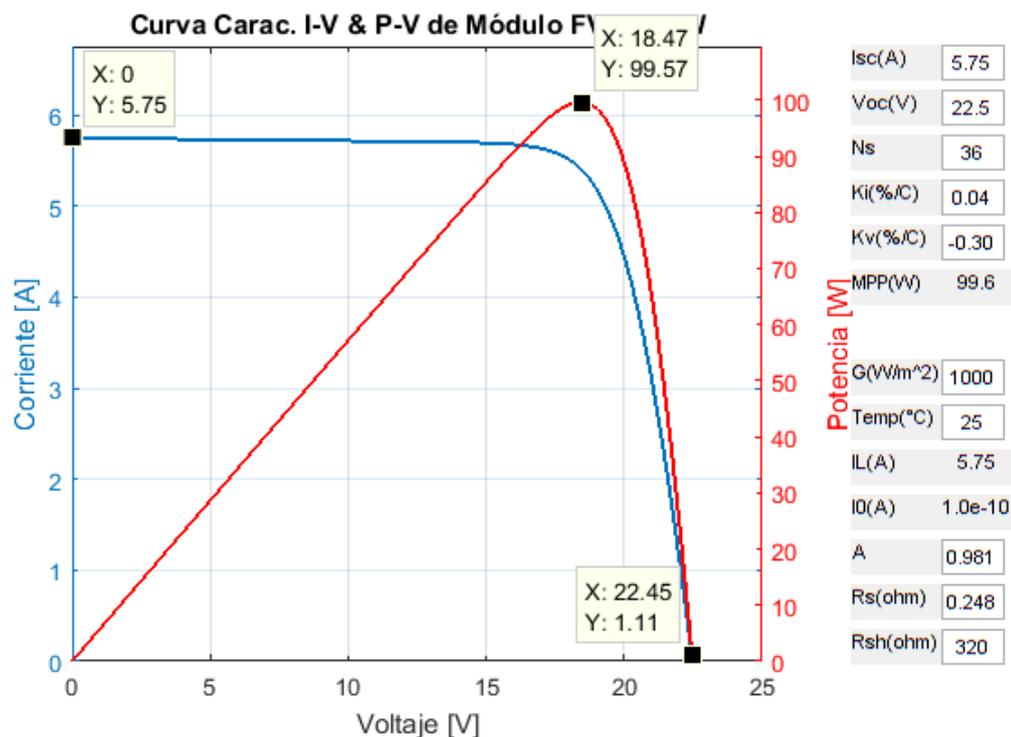
T	G	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
25 °C	1000W/m <sup>2</sup>						
25 °C	300W/m <sup>2</sup>	40.43W	5.71A	22V	3.251A	12.44V	6.25
25 °C	600W/m <sup>2</sup>						

Elaboración: "Propia del investigador - 2017".

#### 4.1.9. Modelamiento de módulo fotovoltaico de 100W (GUIDE).

Una de las características principales que mejor describen un módulo fotovoltaico es la relación  $I - V$  y  $P - V$ , la cual se representa mediante la figura 51, del módulo modelo (RNG – 100D). Como se evidencia a partir de la figura 42 a la figura 50 se realizó la simulación del modelo matemático del módulo PV, con el fin de contrastar los datos teóricos con los datos experimentales para los diferentes valores de entrada indicados en cada una de las gráficas, En la figura 51, se muestra el bosquejo del interfaz desarrollado en Matlab (GUIDE), en la cual constan con variables de entradas de texto con sus respectivas unidades de medida.

Luego de haber ingresado las variables correspondientes como irradiancia, temperatura, y otros datos necesarios (Data Sheet), para graficar la curva característica, se puede compilar el modelo matemático obteniéndose como resultado la gráfica interactiva  $I - V$  y  $P - V$ .



**Figura 51:** La curva normal  $I - V$  (azul), y curva  $P - V$  (rojo).

Elaboración: Propia (ver anexo "H").

La eficiencia del módulo PV, según el fabricante está definida por la potencia nominal del módulo dividido entre el área física del módulo en (STC), siendo esta equivalente a 15.47%. En la siguiente tabla se puede apreciar los datos obtenidos en supuestos de STC, coincidiendo con la hoja de datos en gran parte con los datos proporcionados por fabricante.

**Tabla 15:** Valores obtenidos para el módulo PV, en condiciones STC.

T	G	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
25 °C	1000W/m <sup>2</sup>	99.56W	5.75A	22.45V	5.396A	18.45V	15.47

Elaboración: "Propia del investigador – 2017".

Es necesario entender como la irradiancia solar, la temperatura superficial del módulo uniforme ( $T^{\circ}_{cell} - T^{\circ}_{Ambiente}$ ) y las características eléctricas del módulo; afectan el comportamiento de la curva característica de este conocimiento depende el buen análisis, diseño, instalación y evaluación de sistemas fotovoltaicos para sus diferentes aplicaciones.

La eficiencia del módulo PV esta dado por la potencia nominal que entrega el módulo en condiciones NOCT expresado por la siguiente ecuación.

$$T^{\circ}_{Módulo} = T^{\circ}_{Amb.} + K * G \quad \dots \text{(Ec.67)}$$

$$T^{\circ}_{Amb.} = 16^{\circ}C, K = 0.03^{\circ}C \cdot m^2/W, T^{\circ}_{Amb.} G = 1000W/m^2$$

Reemplazando valores:

$$T^{\circ}_{Módulo} = 16^{\circ}C + 0.03^{\circ}C \cdot \frac{m^2}{W} * 1000W/m^2$$

$$T^{\circ}_{Módulo} = 46^{\circ}C$$

Evaluación de la potencia de salida del módulo PV:

$$P_{Modulo} = P_{Pico} (P_{Pico} \cdot \delta \cdot \Delta T) \quad \dots \text{(Ec.68)}$$

Con:  $\Delta T = \text{incremento de } T^{\circ} \text{ encima de los } 25^{\circ}C = T^{\circ}_{Módulo} - 25^{\circ}C$

$$P_{Modulo} = 100W - [100W \cdot 0.3\%/^{\circ}C \cdot (46 - 25)^{\circ}C]$$

$$P_{Modulo} = 100W - [100W \cdot 0.003/^{\circ}C \cdot (21)^{\circ}C]$$

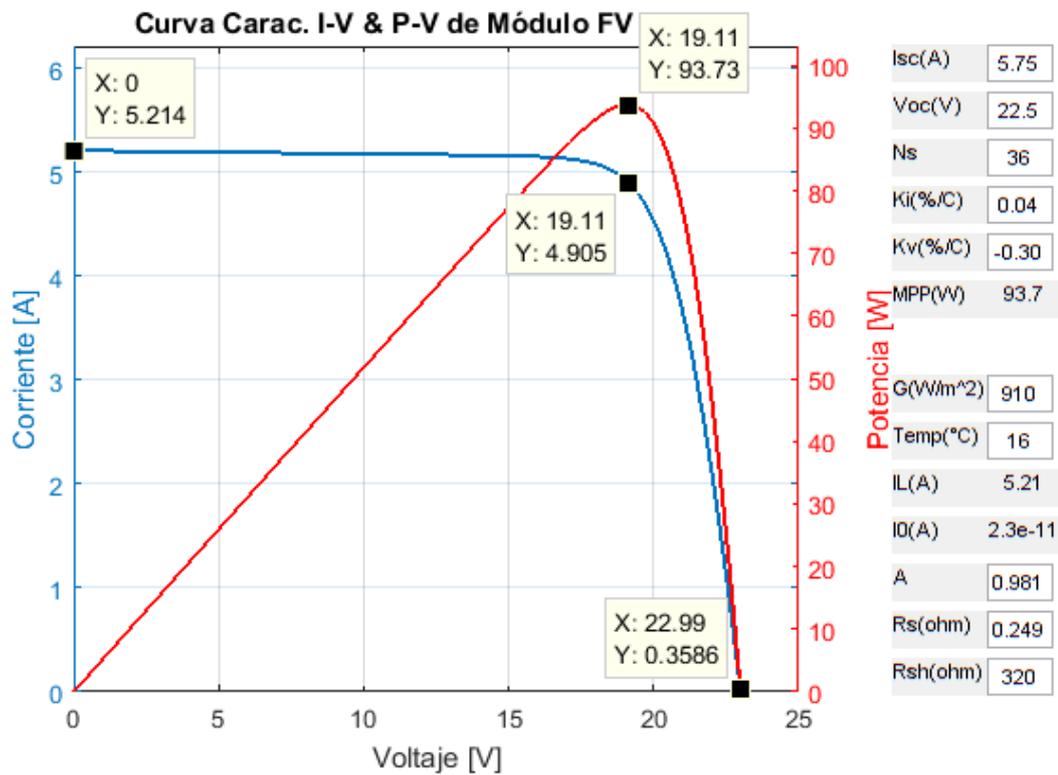
$$P_{Modulo} = 100W - (6.3W) = 93.7W.$$

Calculo de eficiencia del módulo PV:

$$\eta = \frac{P_{Módulo}}{G * Area_{Módulo}} = \frac{93.7W}{\frac{1000W}{m^2} * (1195 * 541)mm}$$

$$= \frac{93.7W}{\frac{1000W}{m^2} * (0.646495m^2)}$$

$$\eta = 0.145 * 100\% = 14.5\%$$



**Figura 52:** Curvas Características I – V, P – V.

Elaboración: Propia (ver anexo “H”).

En la figura 52, se muestra la salida de las curvas características I – V y P – V; está en NOTC y enseguida se presenta una tabulación en la

tabla 16, observándose que solo ha disminuido en un valor del 1% del valor inicial (15.47%).

**Tabla 16:** Valores obtenidos para el módulo PV, en condiciones normales.

T	G	$P_{Max}$	$I_{SC}$	$V_{OC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$\eta$ %
16°C	910W/m <sup>2</sup>	93.73W	5.214A	22.99V	4.905A	19.11V	14.45

Elaboración: "Propia del investigador – 2017".

De forma resumida: se dispone un promedio anual de 5.95 KWh/m<sup>2</sup>/día, en la ciudad de Puno. Si utilizamos un módulo de 100W y la eficiencia de este 0.145 tenemos:

$$\frac{5.95 \text{ h}}{\text{día}} \times 100W \times 0.145 = \mathbf{86.23Wh/día}$$

Esta es la cantidad de energía producida en una hora, y si a eso multiplicamos por las horas de Sol disponible en la ciudad de Puno, aproximadamente 6 horas (esta puede variar según estación del año) tenemos **517.38W/día** producidos en un día, energía que es desaprovechada actualmente.

#### 4.1.10. Modelo de sistema fotovoltaico para una microgrid.

En esta sección se da una propuesta un sistema microgrid, una red que puede suministrar energía a una pequeña escala según los valores tomados anteriormente y como en cuyo elemento principal tenemos a al módulo fotovoltaico, baterías, regulador e inversor tal como se puede apreciar en la figura 53, el cual es desarrollado en MATLAB/Simulink. Se puede observar el comportamiento de un modelo de sistema microgrid durante un día es decir 24 horas.

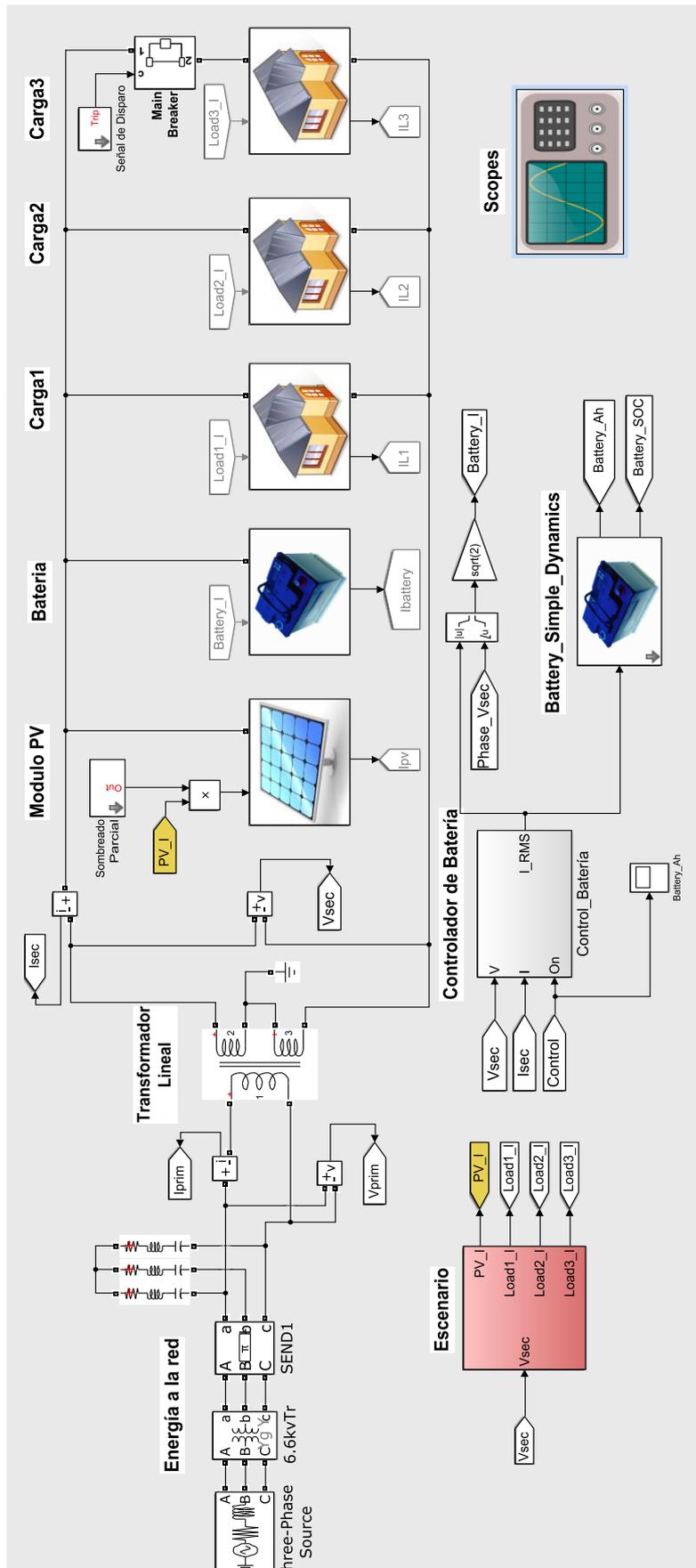


Figura 53: Esquema sistema microgrid.

Elaboración: Propia.

De la simulación, de 18h a 5h, la generación de energía es 0 W. Obteniéndose la cima del pico (5 kW) de 13h a 14h. Las cargas típicas en casas comunes (cargas locales), la cantidad de carga de energía eléctrica alcanzada al máximo consumo se produce a las 9h (6,500 W), y de 19h a 22h (7,500 W).

De 0h a 12h y de 18h a 23h, El control de la batería es realizado por el controlador de batería. El control de la batería realiza el control de seguimiento de la corriente de modo que la potencia activa que fluye, en la potencia del sistema desde el lado secundario del transformador de polo se pone cerca de 0.

La batería de almacenamiento suministra la corriente suficiente a la microgrid. De 12h a 18h, el control de la batería no trabaja. El estado de carga (SOC) de la batería de almacenamiento se fija a una constante y no cambia desde la carga o descarga del almacenamiento, si hay escases de suministro de energía a la microgrid, entra en funcionamiento el interruptor de apagado durante 10 segundos en la carga número 3, Las tres casas ordinarias consumen energía (máximo 2,5 kW) los cuales se comportan como cargas eléctricas.

La microgrid está conectado a la red eléctrica a través de un transformador lineal que baja la tensión de 6,6 kV a 220 V. La generación de energía solar y la batería de almacenamiento son fuentes de alimentación de CC. La estrategia de control supone que el microgrid no depende enteramente de la potencia suministrada por la red eléctrica y que la energía suministrada por la generación y el almacenamiento de energía solar son suficientes en todo momento. Y claro comportamiento de esto son detallados en la figura 54, en la que se observa las señales del sistema microgrid.

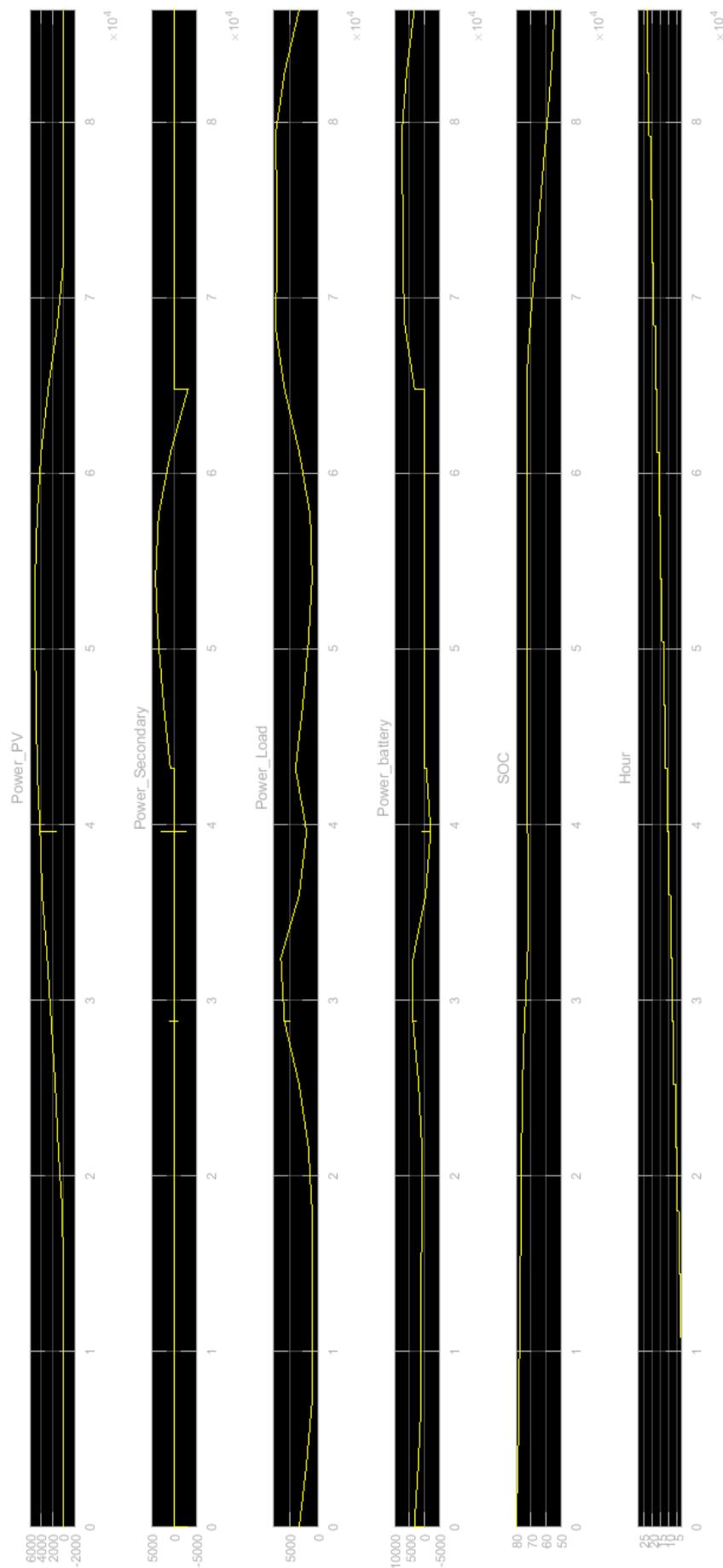


Figura 54: Señales de salida del sistema microgrid.

Elaboración: Propia.

#### 4.2. Discusión.

En esta sección se hace una descripción, acerca de los resultados obtenidos en cada uno de los aspectos de análisis del siguiente proyecto de investigación.

- **Análisis.** Se hace un análisis y estudio de las células solares; de cómo están compuestas estos dispositivos fotovoltaicos (propiedades del silico) y finalmente entender la conversión del efecto fotovoltaico.
- **Modelamiento (Matlab/Simulink).** Se empieza con criterios simples, a partir del circuito equivalente de una célula solar; obteniéndose una ecuación la que mejor describe la corriente, voltaje y potencia que producir una célula solar. Estos resultados se muestran en las figuras 41 y 42, en el cual se muestran una curva característica ideal según el modelo matemático propuesto.
- **Energía solar.** Se empieza con el modelamiento de la superficie del Sol; mostrada en la figura 36. Se hace el modelamiento del espectro solar mostradas en las figuras 37 a 39 y finalmente la energía disponible provenientes del Sol en nuestro medio la cual es mostrada en la figura 40, teniendo un promedio de energía por día igual a 5.95 KWh/m<sup>2</sup>dia.
- **Módulo fotovoltaico.** Se hace el modelamiento para efectos de irradiancia solar, temperatura y sombras parciales, las cuales se muestran de la figura 43 a la 52. Las tablas del desenvolvimiento sometidas a los efectos mencionados son presentadas de la tabla 11 a la 16.
- **Microgrid.** Finalmente los aspectos mencionados anteriormente son integrados en un sistema microgrid desarrollado en Simulink.

## V. CONCLUSIONES

**PRIMERO.** Durante el desarrollo de la presente investigación, se partió de los principios físicos teóricos, del circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica, obteniéndose un modelo matemático; el cual mediante un algoritmo de programación se puede simular en MATLAB/Simulink y obteniéndose como respuesta; el comportamiento exacto de la curva característica  $I - V$  y  $P - V$  de un módulo PV.

**SEGUNDO.** La corriente generada por el módulo PV, está ligada directamente a la irradiancia solar; mientras la temperatura se relaciona al voltaje de esta; al cual también está sujeto la potencia de salida y la eficiencia del módulo. Estos son los factores determinantes para modelamiento del módulo PV.

**TERCERO.** Este modelo es una herramienta efectiva para el análisis y la comprensión del funcionamiento de un módulo PV. Puede considerarse como un instrumento útil para estudiar diferentes tipos de módulos PV, disponibles en los mercados, especialmente, analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones ambientales.

**CUARTO.** De acuerdo con los datos suministrados para la zona de interés, el nivel de radiación solar promedio mensual varía desde 5.5 a 6.80 kWh/m<sup>2</sup>día. El promedio anual de insolación diaria para la ciudad de Puno es de 5.95 kWh/m<sup>2</sup>día, esto nos indica que tenemos aproximadamente 6 horas solar pico garantizados en un día; suficiente para generar energía y que al día de hoy esta no es aprovechada. Si bien los datos suministrados no son los más precisos, la información disponible es suficiente para poder diseñar diferentes aplicaciones fotovoltaicas.

**QUINTO.** El sistema microgrid, propuesto puede permitir una mayor integración de las energías renovables en el sistema eléctrico. Cuyo elemento principal es el módulo PV. Este tipo de sistema pretende suplir la quema de combustibles fósiles, y aprovechar las energías renovables sobre todo la energía solar un recurso del cual goza nuestro medio.

## VI. RECOMENDACIONES

**PRIMERO.** Si bien es cierto que hay métodos para el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT) para módulos PV, es recomendable desarrollar nuevos algoritmos, de tal manera que siempre se busque tener un alto nivel de eficiencia en condiciones ambientales para nuestro medio.

**SEGUNDO.** Las herramientas de simulación desempeñan un papel importante durante el diseño óptimo y la gestión inteligente; por ende, es necesario realizar el modelamiento para entender su funcionamiento; algunos elementos importantes por recomendar son: generación eólica, inversores multinivel, equipos reguladores de corriente de carga y descarga de baterías.

**TERCERO.** Las simulaciones desarrolladas en la presente investigación, para un módulo fotovoltaico; pueden ser mejoradas, a partir de las ecuaciones más apropiadas en el que el módulo se ajuste mejor en todas las condiciones atmosféricas. En cuanto al modelo del sistema fotovoltaico monofásico conectado a la red, también debería mejorarse desarrollando simulaciones de todos los componentes para entender su funcionalidad.

**CUARTO.** Se recomienda buscar alternativas de solución para nuevos sistemas almacenamiento de energía. Y para una adecuada integración de la generación distribuida; y un mejor aprovechamiento óptimo de la energía solar, desarrollar investigaciones en la electrónica de potencia en calidad de potencia y suministro de energía.

**QUINTO.** Hoy en día, la integración de la energía solar en microgrids, se está convirtiendo en una preocupación para la industria de sistemas de energía. Al mismo tiempo, se está realizando el modelado de fuentes de energía renovable es cada vez más importante y a gran escala, por esta razón es necesario realizar estudios sobre esta, y no hay manera mejor que mediante la simulación y la integración del sistema de energía.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Goetzberger V.U. Hoffmann (2005): *“Photovoltaic Solar Energy Generation”*. Freiburg, Germany – Springer.
- Alfaro Rodríguez, Carlos Humberto (2012): *“Metodología de Investigación Científica Aplicado a la Ingeniería”*. Lima, Perú – FIEE/UNAC.
- Castañer Luis & Silvestre Santiago (2002): *“Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice”*. Barcelona, Spain – John Wiley & Sons.
- Chen, Julian C. (2011): *“Physics of Solar Energy”*. New Jersey, USA – John Wiley & Sons, Inc.
- Chowdhury S, Chowdhury S.P. & P. Crossley (2009): *“Microgrids and Active Distribution Networks”* London, United Kingdom – The Institution of Engineering and Technology.
- Djamila Rekioua, Matagne Ernest (2012): *“Optimization of Photovoltaic Power Systems – Modelization, Simulation and Control”*. London, British – Springer.
- Femia Nicola, Petrone Giovanni, Spagnuolo Giovanni, Massimo Vitelli (2013): *“Power Electronics and Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems”*. CRC Press Taylor & Francis Group
- Fonash Stephen J. (2010): *“Solar Cell Device Physics”* Second Edition. Burlington, USA – Elsevier Inc.
- Garcia – Valle, Rodrigo & Peças Lopes, João A (2013): *“Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks”*. New York, USA – Springer.
- Hankins Mark (2010): *“Stand-Alone Solar Electric Systems”*. Washington, USA – Earthscan.
- Hatziargyriou Nikos (2014): *“Microgrids Architectures and Control”*. Noida, India – John Wiley and Sons Ltd.

- Instituto Tecnológico de Canarias (2008): “*Energías Renovables y Eficiencia Energética*”
- Jayaweera Dilan (2016): “*Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration*”
- Keane, John (2014): “*Pico-Solar Electric Systems, The Earthscan Expert Guide to the Technology and Emerging Market*”. New York, USA – Routledge.
- Klaus Jäger, Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, Miro Zeman (2014): “*Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems*”. Delft, the Netherlands – Delft University of Technology.
- Mackay Michael E. (2015): “*Solar Energy An Introduction*”. New York, USA – Oxford University Press.
- Markvart Tom & Castañer Luis (2012): “*Principles of Solar Cell Operation*”. Barcelona, Spain – Elsevier.
- Marsili-Libelli Stefano (2016): “*Environmental Systems Analysis with MATLAB*”. Florence, Italy – CRC Press Taylor & Francis Group.
- Masters, Gilbert M (2004): “*Renewable and Efficient Electric Power Systems*”. New Jersey, USA – John Wiley.
- Md. Rabiul Islam, Faz Rahman, Wei Xu (2016): “*Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*”
- Méndez Muñoz Javier María (2011): “*Energía Solar Fotovoltaica*” Marcombo – Madrid, España.
- Messenger Roger A. & Ventre Jerry (2004): “*Photovoltaic Systems Engineering 2° Edition*”. Florida, USA – CRC Press LLC.
- Mírez Tarrillo Jorge Luis (2016): “*Introducción al Modelamiento y Simulación de Microredes de Energía*” Editorial Académica Española.
- Perpiñán Lamigueiro Oscar (2015): “*Energía Solar Fotovoltaica*”. Madrid, España – Creative Commons.

- Power Systems of the Future (2012): “*The Case For Energy Storage, Distributed Generation, and Microgrids*” IEEE.
- Rahn, Christopher D & Chao-Yang Wang (2013): “*Battery Systems Engineering*”. Pennsylvania, USA – John Wiley & Sons Inc.
- REN21 (2016): “*Energías Renovables 2016 Reporte De La Situación Mundial*”.
- Roldán Viloría José (2008): “*Fuentes de Energía*” Parainfo – Madrid, España
- Solar Generation 6 (2011): “*Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World*” Greenpeace - EPIA (European Photovoltaic Industry Association).
- Sumathi S, Ashok Kumar L & Surekha P. (2015): “*Solar PV and Wind Energy Conversion Systems. An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques*”. Switzerland – Springer.
- Tamayo Pacheco, Jesús F. (2017): “*La Industria de la Energía Renovable en el Perú: 10 Años de Contribuciones a la Mitigación del Cambio Climático*”. Lima, Perú – Osinergmin.
- Tamayo Pereyra Roberto (2011): “*Potencial de las Energías Renovables en el Perú*” Ministerio de Energía y Minas. Lima, Peru.

## ANEXOS

### Anexo “A”: Código de la Ley de Plank.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ley de Plank (Radiación del sol)
% Author: Wilmer SAGUA MAMANI
% Date: November 11th 2016
% Institution: UNA - Puno
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h = 6.626e-34;          % Constante de Plank = 4.135 x 10^-15 eV s
c = 3e8;               % Velocidad de la luz (MKS)
T= 6000;              % Temperatura en grados kelvin
k= 1.38066e-23;       % Constante de boltzman en J/K
l=0:20e-9:2000e-9;
p=2*3.14*h*c*c./(l.^5); %
b6000=p./(exp(h*c./(l*k*T)-1));
b5000=p./(exp(h*c./(l*k*5000)-1));
b4000=p./(exp(h*c./(l*k*4000)-1));
plot(l,b6000,'Linewidth',1.5);
title('Radiación del Cuerpo-Negro (Ley de Plank)');
xlabel('Longitud de onda \lambda [m]');
ylabel('Irradiancia Espectral [W m^-2 sr^-1 nmm^-1]');
hold on;
plot(l,b5000,'--','Linewidth',1.5);
plot(l,b4000,':','Linewidth',1.5);
legend('T° a 6000K','T° a 5000K','T° a 4000K');
grid
    
```

### Anexo “B”: Código del Espectro Solar.

```

***** Solar Spectrum Plotter *****
% Author: Wilmer SAGUA MAMANI
% Date: December 2016
% Institution: UNA - Puno
*****
clc; close all;
SolarData = xlsread('ASTMG173.xls');
% AM0 (Extraterrestrial Radiation) subplot(1,3,1)
plot(SolarData(:,1),SolarData(:,2),'black')%Full Espectro Natural
hold on
axis([250 2500 0 2.2])
% AM1.5G ("Global Tilt") subplot(1,3,2)
plot(SolarData(:,1),SolarData(:,3), 'blue')%Full Espectro Natural
% AM1.5D ("Direct plus Circumsolar") subplot(1,3,3)
plot(SolarData(:,1),SolarData(:,4), 'red') %Full Natural Spectrum
xlabel('Longitud de onda \lambda [nm]')
ylabel('Intensidad [W/m^2-nm]')
title('Espectro AM0, AM1.5G basado en el estandar ASTM G173')
legend('Radiación Extraterrestre (AM0)', 'Radiación Global (AM1.5G)',...
'Directa + Circumsolar (AM1.5D)')
grid
    
```

**Anexo “C”:** Código del Espectro Solar AM0.

```
function am0
m = load ('AM0.txt');
x = m(:,1);
y = m(:,2);
plot(x,y,'Linewidth',1.5)
axis([0, 3.5, 0, 3000])
xlabel('Longitud de Onda \lambda (\mu m)')
ylabel('Irradiancia Espectral en W/m^2 \mu m')
title('Espectro de Radiación Solar AM0')
grid
clear
end
```

**Anexo “D”:** Código del Espectro Solar AM1.5.

```
function am15G
m = load ('AM15G.txt');
x = m(:,1);
y = m(:,2);
plot(x,y,'Linewidth',1.5)
axis([0, 3.5, 0, 2000])
xlabel('Longitud de Onda \lambda (\mu m)')
ylabel('Irradiancia Espectral en (W/m^2 \mu m)')
title('Espectro de Radiación Solar AM 1.5 Global')
grid
clear
end
```

**Anexo “E”:** Código de la Curva de Insolación Solar.

```
%----- Curva de Insolación Solar Diaria -----%
% Author: Wilmer SAGUA MAMANI
% Date : November 17th 2016
% Institution: UNA - Puno
%-----%
% (N=90)
%Location Puno, Perú, L = (15.50), LOD = (70.01)

L=15.50; %Latitud
LOD=70.01; %Longitud
N=90; %numero de días
T_GMT= +5; %Time difference with reference to GMT
Step=60; %step each hour
Ds=23.45*sin((360*(N-81)/365)*(pi/180)); % angulo de declinación
B=(360*(N-81))/364; %Equación del tiempo
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))- (7.53*cos(B*pi/180))- (1.5*sin(B*pi/180)); %Equación de tiempo
Lzt= 15* T_GMT; %LMST
```

```

if LOD>=0
Ts_correction= (-4*(Lzt-LOD))+EoT;      %Corrección de tiempo solar
else
Ts_correction= (4*(Lzt-LOD))+EoT;      %Corrección de Tiempo solar
end
Wsr_ssi=- tan(Ds*pi/180)*tan(L*pi/180); %Amanecer/atardecer (Angulo hora)
Wsr_r_ss=acosd(Wsr_ssi);                %Amanecer/atardecer (Angulo Hora)
ASTsr=abs((((Wsr_r_ss/15)-12)*60));     %Tiempo Solar Amanecer
ASTss=(((Wsr_r_ss/15)+12)*60);         %Tiempo Solar Atardecer
Tsr=ASTsr+abs(Ts_correction)           %Tempo Actual Amanecer
Tss=ASTss+abs(Ts_correction)           %Tiempo Actual atardecer
sin_Alpha=[];
for LMT = Tsr:Step:Tss                  %for loop for the day time
Ts= LMT + Ts_correction;                %solar time at each step
Hs=(15 *(Ts - (12*60)))/60;            %hour angle at each step
sin_Alpha_i = (sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+cos(L*pi/180)*cos(Ds*pi/180)*
cos(Hs*pi/180)); %altitude angle
sin_Alpha=[sin_Alpha;sin_Alpha_i];     % store altitude angle results
end
LMT=Tsr:Step:Tss
sin_Alpha;
Go=1000;                                %Constante Solar
Gext=Go*(1+(0.0333*cos(360*N/365)));     %available Gext
GextH=Gext*sin_Alpha;                   %Gex on horizontal surface
plot(LMT,GextH,'y','Linewidth',2)
grid                                     %Graficar Resultados
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Radiación Solar [W/m^2]')
title('Radiación Solar Diaria [Puno]')

```

### Anexo “F”: Código de Curva I - V y P - V de Célula Solar.

```

function PV = Curve_Solar_Cell( t )

% Developed by: Wilmer Sagua Mamani
% Date: January 17th, 2017
% University: UNA - Puno
J = 0;
Jo = 0;
v = 0:1:700;
Jsc = 31.188*10^(-3);
Jo = 10^(-12);
tt = 25 + 273.15;                        % Entrada "t" célula solar: tt = t + 273.15 in(°K)
vt = 0.08615259*tt;                      % vt= k*tt/q Constantes; Expresados en mV
J = Jsc - Jo.*(exp(v/vt)-1);             % v/vt in mV (millivolts)
subplot(2,2,1:2)
plot(v,J,'Linewidth',1.3)
axis([0,700,0,0.04])
xlabel('Voltaje [mV]')
ylabel('Corriente [mA]')
title('Curva [ I-V & P-V ] de 1 célula solar')
legend('Curva I-V')

I = 0;
Jo = 0;

```

```
v = 0:1:700;
Jsc = 31.188*10^(-3);
Jo = 10^(-12);
tt = 25 + 273.15;           % Entrada "t" célula solar: tt = t + 273.15 in(°K)
vt = 0.08615259*tt;       % vt= k*tt/q Constantes; Expressados en mV
%I = (Jsc - Jo.*(exp(v/vt)-1)).*A; Area de la célula solar en Cm2
I = (Jsc - Jo.*(exp(v/vt)-1)).*121;
P = v.*I;
subplot(2,2,3:4)
plot(v,P,'r','Linewidth',1.5)
axis([0,700,0,2000])
xlabel('Voltaje [mV]')
ylabel('Potencia [mw]')
legend('Curva P-V','Location','northwest','Orientation','horizontal')

end
```

[Published with MATLAB® R2016b](#)

### Anexo “G”: Código para curva de módulo PV, por la variación de irradiación solar y temperatura.

```
*****%
% codigo para calcular las características de modulo PV para Varios
% Niveles de temperatura y Irradiancia, Based0 en las ecu. metodo de interpolación.
% Author: Wilmer SAGUA MAMANI
% Date: November 11th 2016
% Institution : UNA - Puno
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Entrada de (G) y (T)
irradiance=[1000 800 600 400];
temperature=[25 25 25 25];
color=['r' 'b' 'm' 'g'];

% Modulo PV: Modelo RNG-100D

100w Monocrystalline Solar Panel
Rs=0.0;                               %calculos basados en la hoja de Datos.
Voc=21.8;
Isc=5.51;
Vmp=17.6;
Imp=5.11;
temperatureref=25;
irradianceref=1000;
coefP=-0.45;
coefVoc=-0.35;
coefIsc=0.015;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Init
Vmax=0;
Imax=0;
Pmax=0;
a=coefIsc*Isc/100;
b=-coefVoc*Voc/100;

figure; hold on;
```

```

for i=1:length(irradiance)
    C2=(Vmp/Voc-1)/log(1-Imp/Isc);
    C1=(1-Imp/Isc)*exp(-Vmp/(C2*Voc));
    D1=a*irradiance(i)/irradianceref*(temperature(i)-
temperatureref)+Isc*(irradiance(i)/irradianceref-1);
    Vmax1=C2*Voc*log((1-(0-D1)/Isc)/C1+1)-b*(temperature(i)-temperatureref)-Rs*D1;
    Vrmx=0+b*(temperature(i)-temperatureref)+Rs*D1;
    Imax1=Isc*(1-C1*(exp(Vrmx/(C2*Voc))-1))+D1;
    Pmax1=Vmax1*Imax1*0.9;
    if Vmax1>Vmax Vmax=Vmax1; end
    if Imax1>Imax Imax=Imax1; end
    if Pmax1>Pmax Pmax=Pmax1; end
    V=0:0.1:(Vmax1);
    Vr=V+b*(temperature(i)-temperatureref)+Rs*D1;
    I=Isc*(1-C1*(exp(Vr/(C2*Voc))-1))+D1;
    P=V.*I;
    subplot(2,1,1);
    plot(V,I,color(i),'Linewidth',1.5);
    axis([0,Vmax*1.1,0,Imax*1.3]);
    title('Características Fotovoltaicas');
    ylabel('Corriente [A]');
    xlabel('Voltaje [V]');
    grid minor
    hold on;
    legend('1000 w/m^2','800 w/m^2','600 w/m^2','400 w/m^2')
    title(legend,'T = 25°C, Irradiancia a')
    subplot(2,1,2);
    plot(V,P,color(i),'Linewidth',1.5);
    axis([0,Vmax*1.1,0,Pmax]);
    ylabel('Potencia [W]');
    xlabel('Voltaje [V]');
    grid minor
    hold on;
    legend('1000 w/m^2','800 w/m^2','600 w/m^2','400 w/m^2')
    title(legend,'T = 25°C, Irradiancia a')
end

%Look Up table creation for use in Simulink
PV_characteristic=zeros(length(V),2);
PV_characteristic(:,1)=V(:);
PV_characteristic(:,2)=I(:);

clearvars a b C1 C2 color D1 i I Imax Imax1 Imp irradiance irradianceref Isc mode P Pmax
Pmax1 Rs temperature temperatureref V Vmax Vmax1 Vmp Voc Vr Vrmx coefIsc coefP coefVoc
    
```

**Anexo “H”:** Código para curva característica interactiva del módulo fotovoltaico.

```

%*****%
% Curva Caracteristica Interactiva de Modulo PV
% Written by: Wilmer SAGUA MAMANI
% Date: (Sept 2016)
% Institution: UNA - Puno
%*****%
    
```

```

function PVModuleCharacteristicCurveMain
figure('NumberTitle','off','Name',...
      'Photovoltaic Module Characteristic Curve Interactive');

uicontrol('Style','text','String','Isc(A)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 370 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Voc(V)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 345 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Ns','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 320 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Ki(%/C)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 295 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Kv(%/C)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 270 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','MPP(W)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 245 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','G(W/m^2)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 195 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Temp(C)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 170 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','IL(A)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 145 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','IO(A)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 120 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','A','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 95 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Rs(ohm)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 70 50 20]);
uicontrol('Style','text','String','Rsh(ohm)','HorizontalAlignment','left',...
          'Position',[470 45 50 20]);

hIsc=uicontrol('Style','edit','String','5.51','Position',[520 370 35
20],'Callback',@Model);
hVoc=uicontrol('Style','edit','String','21.8','Position',[520 345 35
20],'Callback',@Model);
hNs=uicontrol('Style','edit','String','36','Position',[520 320 35
20],'Callback',@Model);
hKi=uicontrol('Style','edit','String','0.165','Position',[520 295 35
20],'Callback',@Model);
hKv=uicontrol('Style','edit','String','-0.35','Position',[520 270 35
20],'Callback',@Model);
hMPP=uicontrol('Style','text','Position',[520 245 40 20]);

hG=uicontrol('Style','edit','String','1000','Position',[520 195 35
20],'Callback',@Model);
hTC=uicontrol('Style','edit','String','25','Position',[520 170 35
20],'Callback',@Model);
hIL=uicontrol('Style','text','Position',[520 145 40 20]);
hIO=uicontrol('Style','text','Position',[520 120 40 20]);
hA=uicontrol('Style','edit','String','0.981','Position',[520 95 35
20],'Callback',@Model);
hRs=uicontrol('Style','edit','String','0.393','Position',[520 70 35
20],'Callback',@Model);
hRsh=uicontrol('Style','edit','String','220','Position',[520 45 35
20],'Callback',@Model);

Model;

```

```

function Model(~,~)
    Isc = str2double(get(hIsc, 'String'));
    Voc = str2double(get(hVoc, 'String'));
    Ns = str2double(get(hNs, 'String'));
    Kv = str2double(get(hKv, 'String'));
    Ki = str2double(get(hKi, 'String'));
    A = str2double(get(hA, 'String'));
    Rs = str2double(get(hRs, 'String'));
    Rsh = str2double(get(hRsh, 'String'));
    G = str2double(get(hG, 'String'));
    TC = str2double(get(hTC, 'String'));

    Gref = 1000;
    q = 1.6e-19;
    k = 1.38e-23;
    TK = 273+TC; % Temperatura de Célula en °K
    vt=(A*k*TK*Ns)/q; % Voltaje Termico

    Isc_T = Isc+((Isc*(Ki/100))*(TC-25)); % Isc con Temperature Coeff
    Voc_T = Voc+((Voc*(Kv/100))*(TC-25)); % Voc con Temperature Coeff
    I0 = Isc_T/(exp(Voc_T/vt)-1); % corriente de saturación Inversa
    IL = Isc_T*(G/Gref); % Corriente light (photogenerada)

    i = 0; % Set initial current i=0
    idx=1;
    I = zeros(1, length(0:Voc_T/1000:Voc_T));
    for V=0:Voc_T/1000:Voc_T
        I(idx)= IL - I0*(exp((V+(i*Rs))/vt)-1)-((V+(i*Rs))/Rsh);
        i = I(idx); %Actualizar corriente
        idx=idx+1;
    end
    end
    V=0:Voc_T/1000:Voc_T;
    P = I.*V;

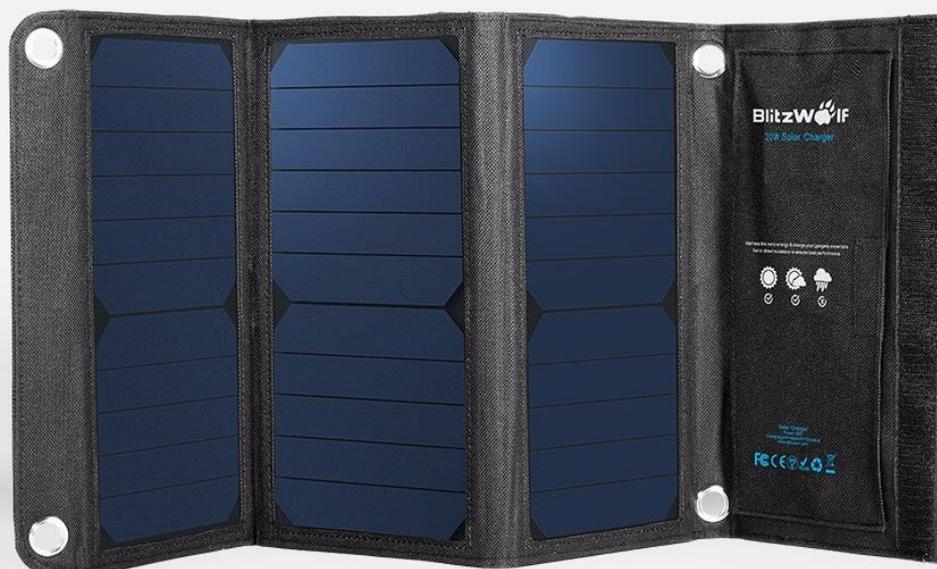
    set(hMPP, 'String', num2str(max(P), '%0.1f'));
    set(hIL, 'String', num2str(IL, '%0.2f'));
    set(hI0, 'String', num2str(I0, '%10.1e'));

    cla;
    h=subplot(1,1,1);
    set(h, 'position', [0.07 0.11 0.68 0.815]);
    [AX,H1,H2]=plotyy(V,I,V,P);
    title('Curva Caracteristica de Módulo Fotovoltaico');
    set(H1, 'Linewidth', 1.5);
    set(H2, 'Color', 'r');
    set(H2, 'Linewidth', 1.5);
    set(get(AX(2), 'Ylabel'), 'String', 'Potencia [W]', 'Color', 'r');
    set(AX(2), 'Ycolor', 'r');
    set(AX(2), 'ylim', [0 max(P)*1.1]);
    set(AX(2), 'YTick', 0:10:max(P)*1.1);
    set(AX(1), 'YTick', 0:1:max(I)+1);
    ylim([0 max(I)+1]);
    xlabel('voltaje [V]');
    ylabel('Corriente [A]');
    grid on;
end
end

```

**Anexo “I”:** Descripción del módulo solar, para pruebas de célula solar.

BlitzWolf 20W 2 Ports Portable Foldable Outdoor Solar Charger with Power3s Technology



**Product Description**

**Powerfull SunPower Panel**

The transformation efficiency of SunPower is up to 21.5%-23.5%, most other similar products on the market are 15% or less.

**Dual Port Power3S Technology:**

Smartly identifies your connected device and provides the fastest and safest charging current for up to two devices.

**Automatic Restart**

If the Sun fades and there is not enough light to charge your device, the BlitzWolf® Solar Charger will automatically restart charging when the sunlight becomes strong enough. Perfect for multiday day charging or on a cloudy day.

**18-month Warranty**

We're so confident in the quality of our products, we back them all with an 18-month warranty.

**Specifications:**

Model	BW-L1
Total maximum Output	5V /3A
Power	20W
Panel Type	SunPower
Opened Size	270*675*4 mm
Closed Size	270*150*28 mm
Weight	550g

**Package Includes:**

- 1 X 20W BlitzWolf® BW-L1 Solar Charger
- 1 X User Manual
- 1 X Warranty Card

Fuente: <https://www.banggood.com/buy/solar-charger.html>.

**Anexo “J”:** Descripción del Data Sheet, para realizar pruebas de simulación acorde al modelo matemático.

## RNG-100D

### 100W Monocrystalline Solar Panel

#### Electrical Data

Maximum Power at STC*	100 W
Optimum Operating Voltage ( $V_{mp}$ )	18.9 V
Optimum Operating Current ( $I_{mp}$ )	5.29 A
Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )	22.5 V
Short Circuit Voltage ( $I_{sc}$ )	5.75 A
Module Efficiency	15.47%
Maximum System Voltage	600 VDC UL
Maximum Series Fuse Rating	15 A

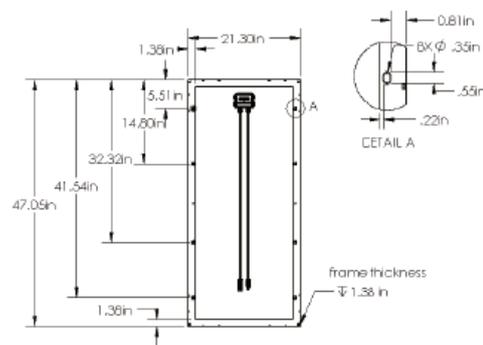
#### Thermal Characteristics

Operating Module Temperature	-40°C to +80°C
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	47±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.30%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C

#### Junction Box

IP Rating	IP 65
Diode Type	HY 10SQ050
Number of Diodes	2 Diode(s)
Output Cables	12 AWG (2.10 ft long)

#### Module Diagram



#### Mechanical Data

Solar Cell Type	Monocrystalline (4.92 x 4.92 in)
Number of Cells	36 (4 x 9)
Dimensions	47 x 21.3 x 1.4 in (1195 x 541 x 35 mm)
Weight	16.5 lbs (7.5 kg)
Front Glass	Tempered Glass 0.13 in (3.2 mm)
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Connectors	MC4 Connectors
Fire Rating	Class C

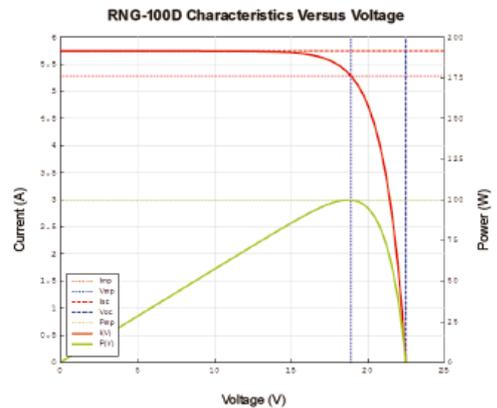
#### MC4 Connectors

Rated Current	30A
Maximum Voltage	1000VDC
Maximum AWG Size Range	10 AWG
Temperature Range	-40°F to 194°F
IP Rating	IP 67

#### Certifications



#### IV-Curve



\*All specifications and data described in this data sheet are tested under Standard Test Conditions (STC - Irradiance: 1000W/m<sup>2</sup>, Temperature: 25°C, Air Mass: 1.5) and may deviate marginally from actual values. Renogy and any of its affiliates has reserved the right to make any modifications to the information on this data sheet without notice. It is our goal to supply our customers with the most recent information regarding our products. These data sheets can be found in the downloads section of our website, [www.renogy-store.com](http://www.renogy-store.com)

Renogy | [www.renogy-store.com](http://www.renogy-store.com) | [info@renogy.com](mailto:info@renogy.com) | T: 909-517-3598  
2775 E Philadelphia Street, Ontario, CA 91761

**Anexo “K”:** Descripción del módulo solar, en plena prueba de las células solares.



Fuente: Fotografía tomada por el investigador, modulo solar en plena pruebas de irradiacion solar, tomada el 04/06/2017.

Anexo “L”: Descripción del Atlas del Perú, irradiación solar y temperatura.

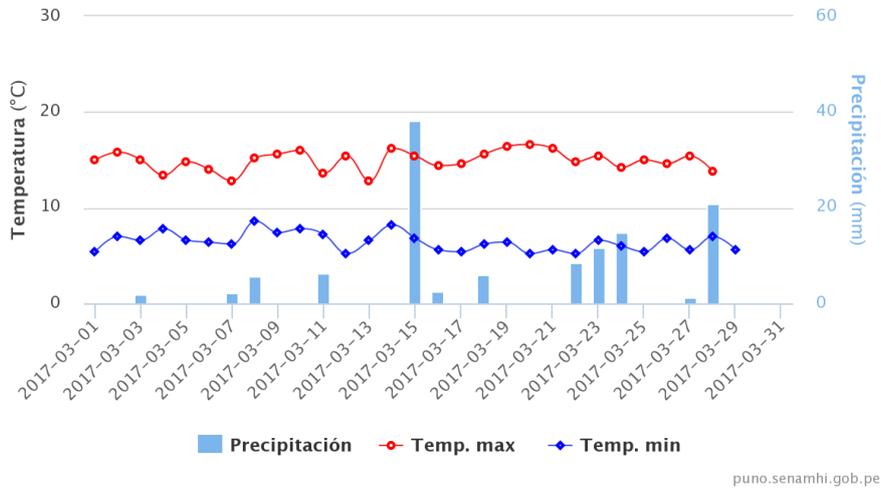


Fuente: Senamhi (2003).

**Anexo “M”:** Datos de temperatura y radiación solar.

**ESTACIÓN : CP PUNO**

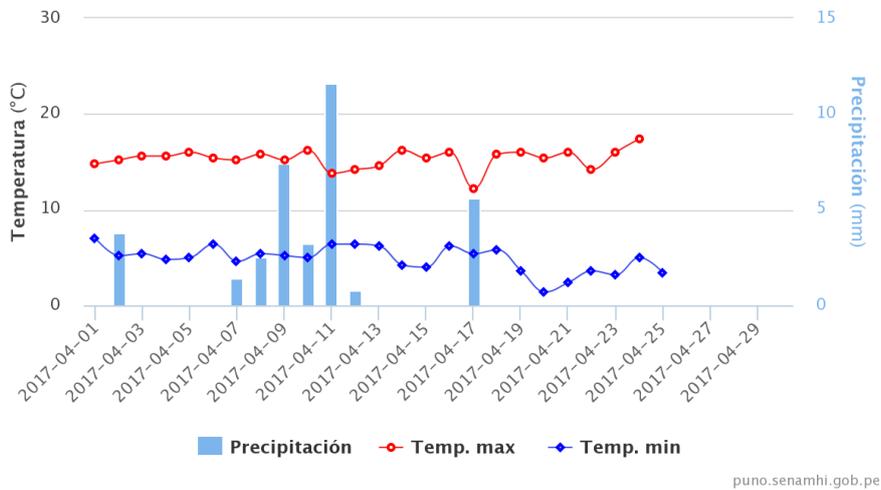
Dep.: PUNO, Prov.: PUNO, Dist.: PUNO  
 Lat.: 15°49'33.9'', Long.: 70°00'42.9'', Alt.: 3812.



Fuente: Senamhi (2017).

**ESTACIÓN : CP PUNO**

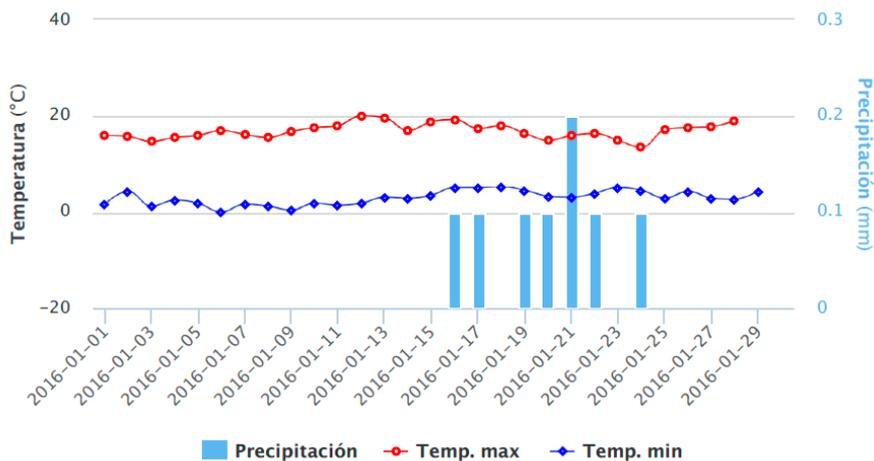
Dep.: PUNO, Prov.: PUNO, Dist.: PUNO  
 Lat.: 15°49'33.9'', Long.: 70°00'42.9'', Alt.: 3812.



Fuente: Senamhi (2017).

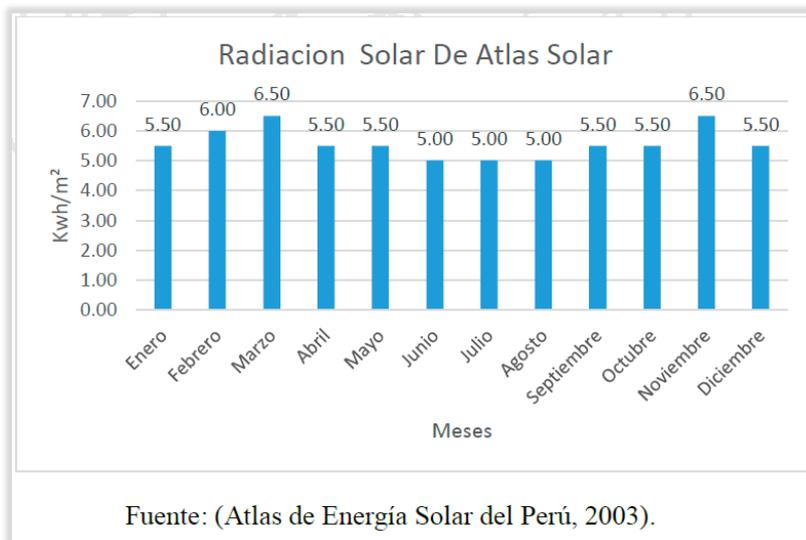
ESTACIÓN : CP PUNO

Dep.: PUNO, Prov.: PUNO, Dist.: PUNO  
 Lat.: 15°49'33.9'', Long.: 70°00'42.9'', Alt.: 3812.



puno.senamhi.gob.pe

Fuente: Senamhi (2017).



Fuente: (Atlas de Energía Solar del Perú, 2003).