

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN  
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED Y LOS SISTEMAS AISLADOS.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE LOS SISTEMAS DE  
GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED Y LOS  
SISTEMAS AISLADOS.**

**AUTOR:**

**GABRIEL ALEJANDRO SALAZAR DÍAZ**

**DIRECTOR:**

**DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, Noviembre de 2014**

## **DECLARATORIA DE AUTORÍA:**

Yo, Gabriel Alejandro Salazar Díaz autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 06 de Noviembre del 2014

---

**Gabriel Alejandro Salazar Díaz**  
**CC: 1718252990**

**AUTOR**

**CERTIFICA:**

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la tesis, así como la investigación respecto a la “COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED Y LOS SISTEMAS AISLADOS” realizada por el Sr. Gabriel Alejandro Salazar Díaz, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 06 de Noviembre del 2014

---

**Ing. Diego Francisco Carrión Galarza**  
**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA.**

### **Gabriel Alejandro Salazar Díaz**

Este proyecto es dedicado con mucho cariño para toda mi familia, en especial a mis padres y hermanos quienes me han ayudado cada día para salir adelante, a mi novia por su apoyo incondicional y amigos con los cuales he compartido momentos difíciles en este camino del aprendizaje.

## **AGRADECIMIENTO.**

### **Gabriel Alejandro Salazar Díaz**

Agradezco a la Universidad  
Politécnica Salesiana por haberme  
permitido ser parte de ella. A todos los  
docentes, por compartir sus  
conocimientos y experiencias, en especial  
a mi Director Ing. Diego Carrión por su  
apoyo en este trabajo y por los  
conocimientos impartidos como docente y  
amigo.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
ENERGÍA SOLAR .....	2
1.1 Modelos de estimación del recurso solar.....	2
1.1.1 Radiación solar extraterrestre .....	3
1.1.3 Estimación de la Radiación solar terrestre .....	4
1.1.3.1 Estimación de la radiación solar terrestre en el plano horizontal .....	5
1.1.3.2 Estimación de la radiación solar terrestre en el plano inclinado .....	6
1.2 Conversión de la Energía.....	7
1.2.1 Conversión Térmica .....	7
1.2.2 Conversión Fotovoltaica.....	11
1.2.2.1 La Célula Fotovoltaica .....	12
1.3 Generación Distribuida.....	14
1.4 Clasificación de los de sistemas fotovoltaicos .....	15
1.4.1 Componentes de los Sistemas Fotovoltaicos.....	15
1.4.2 Sistema fotovoltaico aislado (stand alone).....	20
1.4.3 Sistema fotovoltaico conectado a la red (grid connected).....	21
CAPÍTULO II .....	22
TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA .....	22
2.1 Celdas fotovoltaicas.....	22
2.1.1 Estructura de la celda fotovoltaica.....	22
2.1.2 Efecto fotovoltaico .....	25
2.1.3 Características eléctricas de la celda fotovoltaica .....	26
2.1.4 Módulos fotovoltaicos .....	33
2.2 Clasificación de las celdas fotovoltaicas .....	34
2.2.1 Celda de silicio monocristalino .....	36
2.2.2 Celda de silicio policristalino .....	36
2.2.3 Celda de silicio amorfo.....	37
2.1 Tipos de conexiones de las celdas fotovoltaicas .....	37
2.3.1 Conexión en serie .....	38
2.3.2 Conexión en paralelo.....	38
2.2.3 Celda de telurio de cadmio/sulfuro de cadmio .....	39
2.2.4 Celda de Arseniuro de Galio .....	39
2.2 Factores de planta en sistemas fotovoltaicos.....	39



CAPÍTULO III .....	41
EFICIENCIA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA .....	41
3.1 Eficiencia en los componentes de un sistema fotovoltaico .....	41
3.1.1 Eficiencia en el panel fotovoltaico .....	41
3.1.2 Eficiencia en el sistema de acumulación .....	42
3.1.3 Eficiencia en el regulador .....	43
3.1.4 Eficiencia en el inversor .....	43
3.2 Análisis matemático de cada componente del sistema .....	44
3.2.1 Modelo matemático del panel fotovoltaico .....	44
3.2.4 Modelo matemático del sistema de acumulación .....	49
3.2.2 Modelo matemático del regulador .....	52
3.2.3 Modelo matemático del inversor .....	55
3.3 Eficiencia en sistemas aislados .....	58
3.4 Eficiencia en sistemas conectados a la red .....	59
CAPÍTULO IV .....	60
ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO .....	61
4.1 Análisis de las pérdidas en una instalación fotovoltaica aislada y conectada a la red .....	61
4.1.1 Pérdidas en instalación fotovoltaica aislada .....	61
4.1.2 Pérdidas en instalación fotovoltaica conectada a la red .....	62
4.2 Comparación de la eficiencia en los componentes .....	62
4.3 Análisis de la vida útil en los componentes .....	65
4.4 Análisis Costo-Beneficio .....	66
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES .....	72
Referencias .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>1.1.</b>	Relación Sol-Tierra.....	2
<b>1.2.</b>	Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año.....	4
<b>1.3.</b>	Atenuación de la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera.....	5
<b>1.4.</b>	Colector solar plano de baja temperatura.....	9
<b>1.5.</b>	Partes de un colector solar plano.....	9
<b>1.6.</b>	Tipos de colectores concentradores.....	10
<b>1.7.</b>	Espectro electromagnético.....	11
<b>1.8.</b>	Carga de una célula fotovoltaica simple.....	12
<b>1.9.</b>	Tipos de células solares.....	13
<b>1.10.</b>	Redes eléctricas convencionales y micro redes.....	14
<b>1.11.</b>	Esquema de un sistema fotovoltaico aislado con sus componentes.....	20
<b>1.12.</b>	Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red con sus principales componentes.....	21
<b>2.1.</b>	Estructura de bandas en un semiconductor y creación de un par electrón-hueco.....	23
<b>2.2.</b>	Representación del Potencial eléctrico.....	24
<b>2.3.</b>	Estructura de la celda fotovoltaica.....	24
<b>2.4.</b>	Principio básico de trabajo de la tecnología fotovoltaica.....	26
<b>2.5.</b>	Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar.....	26
<b>2.6.</b>	Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.....	27
<b>2.7.</b>	Circuito equivalente de un panel fotovoltaico.....	28
<b>2.8.</b>	Curva característica V-I curva de potencia de una celda fotovoltaica.....	30
<b>2.9.</b>	Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar.....	31
<b>2.10.</b>	Curva I-V de una celda solar con la temperatura.....	32

<b>2.11.</b>	Jerarquía fotovoltaica.....	33
<b>2.12.</b>	Estructura del panel fotovoltaico.....	33
<b>2.13.</b>	Conexiones de los módulos con sus diodos de protección.....	34
<b>2.14.</b>	Construcción de las Células Solares.....	35
<b>2.15.</b>	Método de Czochralski.....	36
<b>2.16.</b>	Celda policristalina.....	37
<b>2.17.</b>	Celda Silicio amorfo.....	37
<b>2.18.</b>	Conexión serie de Células Solares.....	38
<b>2.19.</b>	Conexión paralelo de Células Solares.....	39
<b>3.1.</b>	Curva característica de la Radiación Solar del día 16/07/2014 Sector Cotocollao....	44
<b>3.2.</b>	Representación esquemática del panel fotovoltaico.....	47
<b>3.3.</b>	Curva de la Potencia de salida del panel fotovoltaico .....	48
<b>3.4.</b>	Curva característica Potencia vs Radiación Solar del panel fotovoltaico.....	48
<b>3.5.</b>	Circuito eléctrico equivalente de la batería.....	49
<b>3.6.</b>	Representación esquemática de la batería.....	51
<b>3.7.</b>	Curva de la Potencia de salida de la batería.....	51
<b>3.8.</b>	Curva característica de la Potencia útil de la batería vs Radiación Solar diaria.....	52
<b>3.9.</b>	Circuito eléctrico equivalente del regulador de carga en serie.....	52
<b>3.10.</b>	Representación esquemática del regulador de carga.....	53
<b>3.11.</b>	Curva de la Potencia de salida del regulador de carga en serie.....	54
<b>3.12.</b>	Curva característica de la Potencia del regulador de carga vs Radiación Solar.....	54
<b>3.13.</b>	Representación esquemática del inversor.....	56
<b>3.14.</b>	Curva característica de la Potencia de salida del inversor .....	57
<b>3.15.</b>	Curva característica de la Potencia de salida del inversor vs la Radiación Solar.....	57

<b>3.16.</b>	Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico Aislado.....	58
<b>3.17.</b>	Curva de la Potencia de salida del Sistema Fotovoltaico Aislado vs la Radiación Solar en el día.....	59
<b>3.18.</b>	Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red.....	59
<b>3.19.</b>	Curva de la Potencia de salida del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red vs la radiación Solar en el día.....	60
<b>4.1.</b>	Eficiencia en los componentes del Sistema Fotovoltaico.....	63
<b>4.2.</b>	Eficiencia en los Sistemas Fotovoltaicos.....	64
<b>4.3.</b>	Comparación del Factor de Planta entre los Sistemas Fotovoltaicos.....	64
<b>4.4.</b>	Vida útil promedio de los componentes de los Sistemas Fotovoltaicos.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>1.1.</b>	Tipos de materiales de células solares.....	16
<b>1.2.</b>	Capacidad en función de la temperatura.....	17
<b>3.1.</b>	Tecnologías importantes de celdas solares.....	42
<b>3.2.</b>	Variación de la capacidad con la temperatura.....	43
<b>3.3.</b>	Características Eléctricas del fabricante Kyocera Solar.....	45
<b>3.4.</b>	Estado de los interruptores.....	55
<b>4.1.</b>	Eficiencia de los componentes del sistema fotovoltaico.....	62
<b>4.2.</b>	Índices de evaluación para el sistema fotovoltaico aislado.....	66
<b>4.3.</b>	Índices de evaluación para el sistema fotovoltaico conectado a la red.....	67

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>A1</b>	Datos de radiación solar proporcionados por la Secretaria del Ambiente en su página web.....	79
<b>A2</b>	Datos técnicos del panel fotovoltaico marca Kyocera.....	81

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>°C</b>	Grados Centígrados
<b>°K</b>	Grados Kelvin
<b>W</b>	Vatio
<b>Wp</b>	Vatio Pico
<b>KWp</b>	Kilovatio pico
<b>MW</b>	Megavatio
<b>KWh</b>	Kilovatio hora
<b>M<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>V</b>	Voltio
<b>I</b>	Corriente
<b>CC</b>	Corriente Continua
<b>CA</b>	Corriente Alterna
<b>VCC</b>	Voltaje de corriente continúa
<b>VAC</b>	Voltaje de corriente alterna
<b>FV</b>	Fotovoltaico
<b>AM</b>	Masa de aire
<b>MPPT</b>	Punto de Máxima Potencia
<b>T</b>	Temperatura
<b>J</b>	Joules
<b>Hz</b>	Hertz
<b>USD</b>	Dólar americano
<b>VAN</b>	Valor actual neto
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno

# Comparación de la Eficiencia entre los Sistemas de Generación Fotovoltaicos Conectados a la Red y los Sistemas Aislados

Gabriel Alejandro Salazar Díaz

gsalazardiaz30@gmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

*Resumen*—Ante el creciente interés por el cuidado del medio ambiente con el uso de las energías renovables como alternativas para la generación de energía eléctrica y su aplicación en el concepto de la generación distribuida, el presente trabajo tiene como fin calcular de manera rápida y sencilla la eficiencia mediante el cálculo de la potencia y energía de generación en cada sistema fotovoltaico tanto el conectado a la red como el sistema aislado, para luego compararlos entre sí y determinar qué sistema fotovoltaico tiene menores pérdidas eléctricas y con ello una mayor eficiencia en generación. También se ha tomado en cuenta la parte económica en su costo-beneficio que representa la inversión a corto o largo plazo en este tipo de sistemas de generación. Para este acometido se ha utilizado modelos matemáticos aplicados en cada uno de los componentes de los sistemas fotovoltaicos y por medio de herramientas de cálculo como es el Matlab y la plataforma Simulink para las respectivas simulaciones, ha sido de gran ayuda en cuanto se refiere a demostraciones junto con los datos horarios de Radiación Solar valores que han sido proporcionados por la Secretaria del Ambiente en su página web y que hoy por hoy es de acceso libre para todos quienes requieren este tipo de información en futuras investigaciones.

---



# Efficiency comparison between Generation Systems Grid Connected Photovoltaic and Isolated Systems

Gabriel Alejandro Salazar Díaz  
gsalazardiaz30@gmail.com  
Universidad Politécnica Salesiana

*Abstract-* With the growing interest in protecting the environment by using renewable energy as alternative to the power generation and its application in the concept of distributed generation, this paper aims to calculate quickly and easily the efficiency by calculating the power and energy generation at each PV system connected to both the network and alone systems, then compare and determine which PV system has lower electrical losses and thus more efficient generation. It also took into account the economic portion of its cost-benefit represents investment in the short or long term in such generation systems. For this undertaken has used mathematical models applied in each of the components of photovoltaic systems and through calculation tools such as Matlab and Simulink platform for the respective simulations, it has been a great help as it relates to demonstrations along with the Solar Radiation hourly data values that have been provided by the Ministry of Environment on its website today and is free for all who need this information in future research.

## INTRODUCCIÓN

Los altos índices de contaminación en el mundo debido a la quema de combustibles fósiles para producir electricidad, ha sido motivo de preocupación para que muchos países opten por aplicar nuevas alternativas en la generación de energía eléctrica, tales como son las energías renovables utilizando el viento, el sol; recursos naturales que aún no son explotados al máximo debido a la falta de estudios que nos permita elegir de manera acertada un sistema con menores pérdidas eléctricas.

Los sistemas fotovoltaicos tienen la particularidad de que su construcción es relativamente costosa debido primeramente al tipo de material que está fabricado el panel solar y luego por los verdaderos beneficios y prestaciones que implica invertir en su instalación, sin embargo sus prestaciones a futuro pueden ser positivas, más aun cuando los últimos gobiernos del país han aumentado su interés y apoyo económico para motivar su construcción a mayor escala. Un sistema fotovoltaico está conformado por varios componentes y en cada uno de ellos existen pérdidas eléctricas, por causa de muchos factores internos, externos y propios de cada componente; de los cuales no han sido evaluados a nivel de sistema; por lo que afecta a la eficiencia total del sistema fotovoltaico, disminuyendo su rentabilidad y productividad de su instalación. Por tal motivo se pretende conocer sobre la verdadera utilidad de un componente dentro un sistema fotovoltaico comparando la potencia de entrada y la de salida.

En este estudio se pretende comparar la eficiencia en los sistemas fotovoltaicos conectados a la red y los aislados con lo cual permitirá determinar qué tipo de sistema fotovoltaico tiene menores pérdidas eléctricas y de mejor capacidad de planta, con esto también se obtendrá un enfoque más claro para su construcción a gran escala, valorados a nivel económico para sacar su mayor provecho con respecto a inversiones y aprovechando de mejor manera los recursos naturales renovables como es, en este caso, la radiación solar que en nuestro país tiene una cierta ventaja en cuanto a la ubicación geográfica.

# CAPÍTULO I

## ENERGÍA SOLAR

La radiación solar que atraviesa la atmósfera hasta llegar a la superficie de la Tierra sufre diversas modificaciones, debido a la interacción de los rayos solares con los componentes atmosféricos (aire, agua, polvo) y por los factores geográficos (geometría Tierra-sol) según las coordenadas geográficas del lugar. Por lo que está compuesto de tres componentes que son: la radiación directa como aquella que llega a la Tierra en forma directa. La radiación difusa originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera, incluido las nubes y la radiación reflejada que es la radiación incidente en la superficie que procede de la reflejada en el suelo. El cociente entre la radiación reflejada y la incidente en la superficie de la tierra se denomina albedo.

### 1.1 Modelos de estimación del recurso solar

El sol recurso natural, formado de Hidrógeno en gran parte y el resto de pequeñas cantidades de Helio, es capaz de producir gran cantidad de energía, a causa de sus reacciones nucleares que adquiere en su interior debido a las altas temperaturas y presiones. El sol no es sólido, ni tampoco posee un núcleo por tal razón, no se lo puede considerar con un foco puntual de energía. Tiene algunas capas al su alrededor como la fotosfera, capa de inversión, cromósfera y corona con un diámetro de  $1,39 \times 10^9$  m. a una distancia de  $1,495 \times 10^8$  Km de la Tierra, el disco del sol forma un ángulo de 32 grados ver figura 1.1. Su temperatura interior no es la misma que exteriormente, así en el interior se tiene de 8 a 40 millones de grados Kelvin, mientras que en la parte exterior (fotosfera) se tiene una temperatura de 6000 grados Kelvin aproximadamente [1].



Figura 1.1. Relación Sol-Tierra

Fuente: S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Primera. United States of America, 2009, p. 760.

### 1.1.1 Radiación solar extraterrestre

La cantidad de energía solar recibida por unidad de tiempo y unidad de superficie perpendicular a los rayos del sol, situada distancia media Sol-Tierra y medida fuera de la atmósfera se la conoce como constante solar ( $I_o$ ) su unidad de medida es el watio por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Su valor no es fijo, cuando el sol se encuentra más cerca de la Tierra (3 de Enero) su valor aproximado es de  $1.400 W/m^2$  y cuando sucede lo contrario (4 de julio) su valor es de  $1.330 W/m^2$  [2]. Entre ambos valores se tiene una diferencia de 1.7 por ciento aproximadamente y las fluctuaciones en la estimación de la radiación solar terrestre son del 10 por ciento o más. Como referencia y para cálculos afines, la constante solar se utiliza el valor de  $1.367 W/m^2$  [3]. El factor de excentricidad es la relación entre la distancia del Sol-Tierra de un día determinado y es el valor medio de esta distancia a lo largo del año aproximadamente es  $1.496 \times 10^{11} m$ ; se puede calcular mediante (1.1) [4].

$$(D_o/D)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos(x) + 0.00128 \sin(x) + 0.000719 \cos(2x) + 0.000077 \sin(2x) \quad (1.1)$$

Dónde:

$D_o$  = Valor medio de la distancia Sol-Tierra.

$D$  = Distancia Sol-Tierra.

$X$  = Se la puede encontrar así (1.2):

$$x = 360(n - 1)/365 \quad (1.2)$$

Dónde:

$n$  = es el número de día empezando por número 1. Así por ejemplo: 1 de enero como valor 1, 2 de enero como valor 2, sucesivamente. Entonces la radiación extraterrestre se la puede calcular mediante (1.3):

$$I = I_o [1 + 0.034 \cos(360n/365.25)] \quad (1.3)$$

Dónde:

$I_o$  = Constante solar ( $W/m^2$ ).

$I$  = Radiación extraterrestre.

En la figura 1.2, se puede apreciar la radiación incidente extraterrestre en el plano normal

a la radiación solar en el año y que tiene un intervalo de variación aproximado del  $\pm 3,3$  por ciento debido a que la órbita terrestre es elíptica.

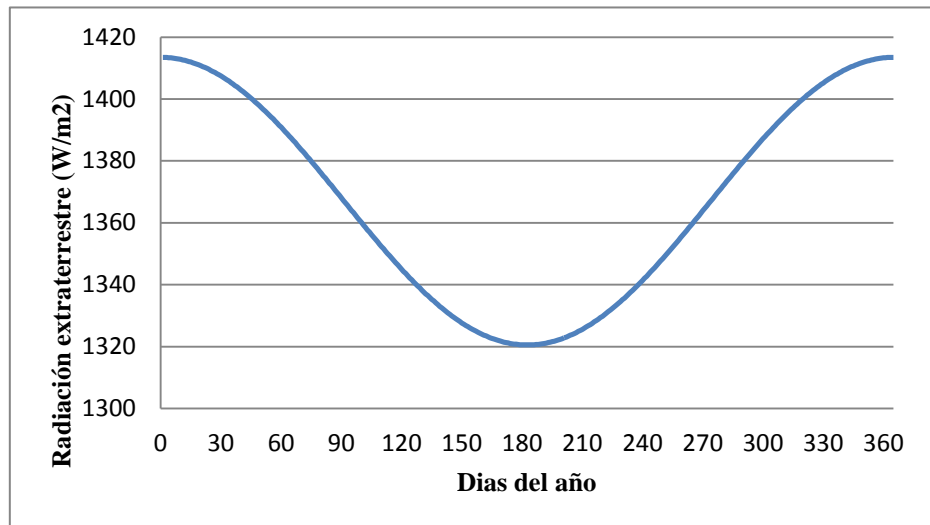


Figura 1.2. Variación de la radiación solar extraterrestre con la época del año  
Fuente: S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems, Primera. United States of America, 2009, p. 760.*

Para cualquier otra posición hay que tomar en cuenta el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre una superficie horizontal (ángulo Zenit). La radiación solar extraterrestre horizontal ( $G_o$ ), se calcula mediante (1.4) [3]:

$$G_o = I_o [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \times (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \delta) \quad (1.4)$$

Dónde:

$G_o$  = Radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$\delta$  = Angulo Declinación solar va desde  $+23.45^\circ$  hasta  $-23.45^\circ$ .

$\omega$  = Angulo Horario, 1 hora equivale  $15^\circ$ .

$\phi$  = Angulo latitud va desde  $-90^\circ$  hasta  $90^\circ$ .

### 1.1.3 Estimación de la Radiación solar terrestre

La radiación solar en contacto con la atmósfera se produce un fenómeno de absorción y de dispersión, que depende de factores climáticos como moléculas de aire, vapor de agua, polvo y del posicionamiento geográfico: masa, espesor y densidad de la capa de aire atravesada, que sobre una superficie terrestre cualquiera, produce varios tipos de energía radiante que se puede apreciar en la figura 1.3 [4].

La radiación directa es la que proviene del sol y no cambia de dirección excepto por la refracción atmosférica sobre la superficie incidente. Tenemos la radiación difusa la cual por choques continuos con moléculas y otras partículas del aire esta se ha difundido sobre la superficie incidente en forma uniforme y sin dirección distribuida en el hemisferio celeste. Y la radiación reflejada en la superficie terrestre que depende del coeficiente de reflexión de la superficie llamado albedo. Las superficies horizontales carecen, mientras que las superficies verticales son las que más tienen radiación reflejada. La radiación total es la suma de las anteriores, es decir de la directa, de la difusa y el albedo o reflectiva [1].

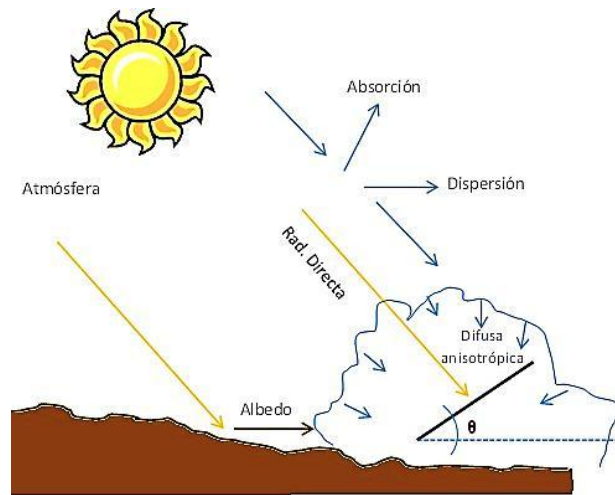


Figura 1.3. Atenuación de la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera.  
Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, *Tecnología solar, Mundi-Pren. Madrid-Barcelona-México, 2005, p. 544.*

### 1.1.3.1 Estimación de la radiación solar terrestre en el plano horizontal

Para predecir el rendimiento de un sistema fotovoltaico, se requieren valores por hora de la radiación solar, esta se obtiene integrando la ecuación anterior (1.4), el resultado de esta integral es (1.5) [3].

$$H_o = \frac{24 \times 3600 I_o}{\pi} [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi * \omega_s / 180) \sin \phi \sin \delta] \quad (1.5)$$

Dónde:

$H_o$  = Radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal diario ( $J/m^2$  ó  $Kwh/m^2$ ).

$\omega_s$  = Angulo horario de puesta de sol, se puede encontrar así (1.6):

$$\cos \omega_s = -\tan \phi * \tan \delta \quad (1.6)$$

Algunos modelos se basan en la técnica de mínimos cuadrados y ecuaciones de regresión lineal, para hallar una relación relevante entre la radiación solar terrestre y los factores de predicción.

El primer modelo global de estimación de la cantidad de radiación solar a partir de los datos de duración de la insolación fue por Angstrom en 1924, Dónde utilizaba como variable el dato de la irradiación promedio diaria sin nubes, que luego otros científicos incluyendo a Page en 1964 modificó este modelo, para basarse en la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal, se calcula mediante (1.7) [3], [5]:

$$\frac{H}{H_o} = a + b \frac{S}{S_o} \quad (1.7)$$

Dónde:

H = Radiación global diaria recibida sobre una superficie horizontal a nivel del suelo.

H<sub>o</sub> = Radiación solar diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal.

S = Duración media de sol.

S<sub>o</sub> = Duración de la insolación sin nubes.

a y b = Constantes empíricas que dependen del clima.

### **1.1.3.2 Estimación de la radiación solar terrestre en el plano inclinado**

Es de gran utilidad disponer de ecuaciones que permitan calcular la radiación sobre un plano cualquiera, ya que los paneles fotovoltaicos generalmente son instalados con una cierta inclinación, por ello hay que tomar en cuenta la radiación difusa. Liu y Jordan en 1960 correlacionaron la proporción de radiación difusa-total con el índice de claridad mensual, (1.8) [3], [4] :

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (1.8)$$

Dónde:

K<sub>T</sub> = Índice de claridad

El índice de claridad es la relación entre la radiación global y la radiación solar extraterrestre. Este parámetro es igual en casi todas partes del mundo, pero es diferente en el transcurso del año.

Para ángulos horarios de puesta de sol  $\omega_s \leq 81.4^\circ$ , se calcula mediante (1.9)

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 - 0.2727K_T + 2.4495K_T^2 - 11.9514K_T^3 + 9.3879K_T^4 & \text{Para } K_T < 0.715 \\ 0.143 & \text{Para } K_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (1.9)$$

Para ángulos horarios de puesta de sol  $\omega_s > 81.4^\circ$ , se calcula por medio (1.10)

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 - 0.2832K_T + 2.5557K_T^2 + 0.8448K_T^3 & \text{Para } K_T < 0.722 \\ 0.175 & \text{Para } K_T \geq 0.722 \end{cases} \quad (1.10)$$

## 1.2 Conversión de la Energía

La energía que llegar a la superficie de la Tierra emitida por el sol, puede ser aprovechada de dos maneras: como una radiación en forma de onda electromagnética aplicada a la energía solar térmica (conversión térmica) y la otra forma es un flujo de fotones o luz del sol aplicado en la energía fotovoltaica (conversión fotovoltaica). En ambos casos requieren de dispositivos para captar el calor y la luz del sol respectivamente.

### 1.2.1 Conversión Térmica

Fue 1865 por James Clerk Maxwell quien propuso es que la luz es una onda electromagnética que viaja en el vacío a la velocidad de la luz [6]. La radiación térmica es una forma de emisión y de transmisión de energía que depende directamente de las características de temperatura de la superficie del cuerpo; parte de esta radiación se refleja, otra se absorbe y otra se transmite, pero los cuerpos negros emiten la mayor cantidad de radiación a una temperatura dada. La radiación de un cuerpo negro está dado por (1.11) llamada ecuación de Planck [2]:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1.11)$$

En Dónde:

$E_{b\lambda}$  = Potencia de emisión monocromática de un cuerpo negro ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ).

T = Temperatura del cuerpo (K).

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\mu m$ ).

$C_1$  = Constante equivalente a  $3.74 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2$ .



$C_2 =$  Constante equivalente a  $1.44 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ .

Al integrar (1.11) sobre todas las longitudes de onda obtenemos la ecuación de Stefan–Boltzmann (1.12) así:

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.12)$$

Dónde:

$\sigma =$  La constante de Stefan-Boltzmann equivalente a  $5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4$ .

$T =$  Temperatura absoluta (K).

El concepto de cuerpo negro como absorbente perfecto no existe en la naturaleza, sin embargo si un cuerpo absorbe más calor, mayor temperatura este tendrá. Para transformar la energía del sol en energía aprovechable se realiza por medio de unos dispositivos denominados colectores solares, los cuales concentran e intensifican el efecto térmico producido por la radiación solar.

La conversión térmica no es más que la absorción del calor del sol para producir energía en tres etapas que son captación, absorción, transformación. Según la temperatura de absorción, la conversión térmica se los clasifica en baja, media y alta temperatura.

Los de baja temperatura utilizan dispositivos denominados colectores o captadores formados de placas planas, quienes son los que absorben el calor del sol y los transmiten a un fluido generalmente agua, aire o aceite, al no ser concentradores de calor, estos no sobrepasa el punto de ebullición ( $100^\circ\text{C}$ ), es un sistema muy utilizado a nivel residencial para el calentamiento de agua y la calefacción ( $50\text{-}60^\circ\text{C}$ ) [1].

El funcionamiento del colector plano se basa en una base de color negro que forma una trampa de calor por el efecto de cuerpo negro y la tapa de vidrio para mantener el calor adentro como el efecto invernadero, a medida que el colector se calienta, el agua caliente se eleva hacia el tubo superior de salida almacenándola en un tanque o acumulador con se observa en la figura 1.4.

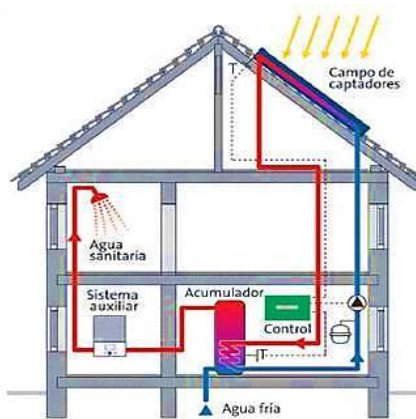


Figura 1.4. Colector solar plano de baja temperatura.  
 Fuente: J. Cascales and J. Marín, "ENERGÍA SOLAR TÉRMICA," volans.si.upct.es.

Las partes de un colector, ver figura 1.5, están recubiertas de una caja herméticamente cerrada. En la cara superior de esta caja se coloca una superficie de vidrio que deja atravesar la radiación solar e impide que no se pierda la ganancia térmica obtenida. En su interior se encuentran el sistema captador formado de tubos en forma de radiador. Generalmente la carcasa que envuelve al equipo de captación es metálica o plástico aislante [7]. El colector se debe colocar perpendicular a la dirección de la radiación solar para una mayor ganancia de energía solar.

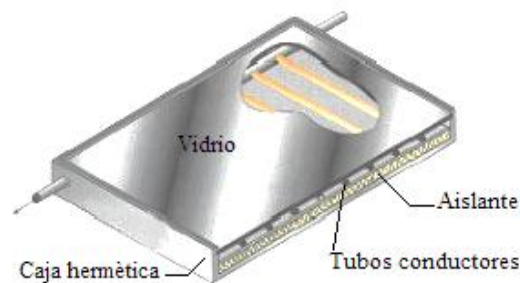


Figura 1.5. Partes de un colector solar plano.  
 Fuente: R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, SOLAR ENERGY. New York: Taylor and Francis Group, LLC, 2010, p. 352.

La conversión térmica de media y alta temperatura utiliza colectores concentradores para reunir mayor cantidad de calor del sol. Tienen formas parabólicas, parabólicos lineales o esféricas véase en la figura 1.6 [8], cubiertas de lentes o espejos para aumentar la temperatura y concentrarlo en un punto determinado que puede llegar 300°C hasta 6000°C. El colector cilindro parabólico consiste en un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación recibida sobre un tubo de vidrio dispuesto en la línea focal. Dentro del tubo se

vidrio están el fluido (agua, aceite) portador del calor. Tienen menores superficies de absorción y menores pérdidas de calor. Los colectores parabólicos lineales o esféricos son utilizados para la producción de energía eléctrica a gran escala. Aquí el fluido portador circula en un circuito cerrado que pasa a un sistema de almacenamiento, para luego ser utilizado en un sistema de generación de vapor, y el que alimenta a una turbina. Esta actúa sobre un alternador, que permite obtener energía eléctrica conocidas como centrales termoeléctricas [5].

Para mejorar la eficacia los colectores deben tener dispositivos seguidores de sol llamados helióstatos y deben estar agrupados en forma circular u oval para obtener una alta potencia[9]. Los helióstatos son espejos montados sobre un eje de dos dimensiones los cuales captan la luz del Sol y la concentran en un receptor ubicado en una torre [6]. Con este sistema de captación se consigue absorber la mayor parte de la radiación solar que llega hasta la superficie y devolver la menos posible.

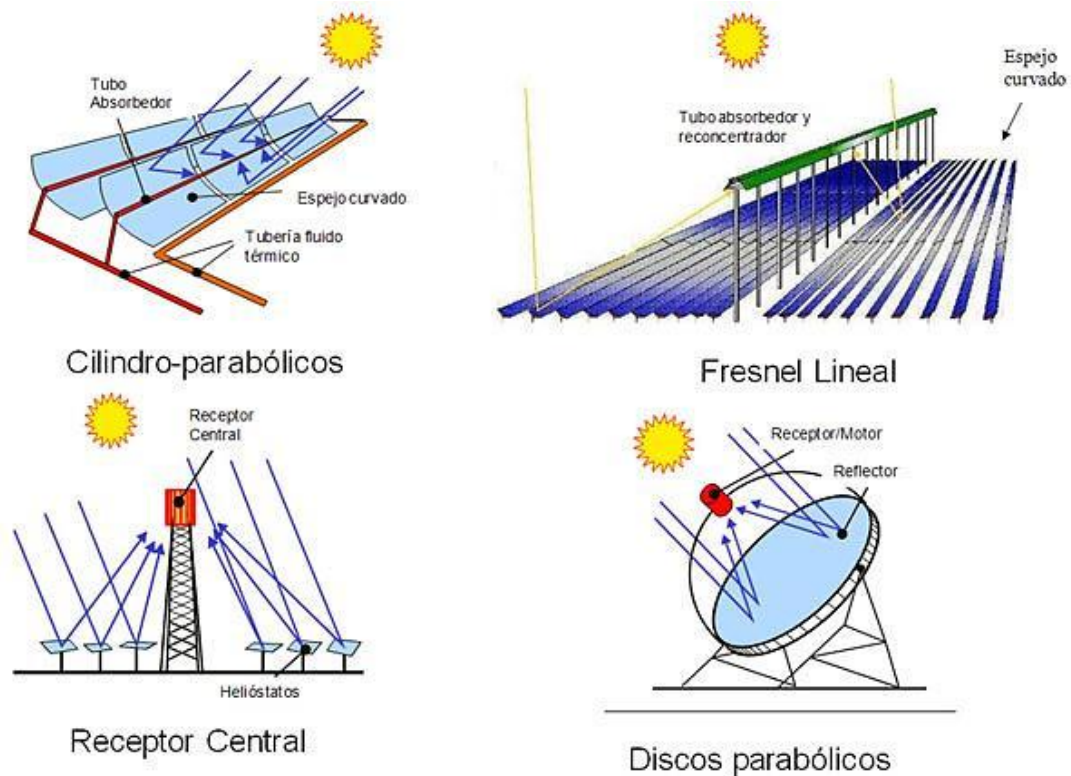


Figura 1.6. Tipos de colectores concentradores.

Fuente: L. Salgado, "Diseño y construcción de un sistema de control para la orientación de un concentrador solar cilindro-parabólico este-oeste," Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2010.

## 1.2.2 Conversión Fotovoltaica

Edmond Becquerel en 1839, fue quien descubrió el efecto fotoeléctrico en el que se basa la tecnología fotovoltaica. Albert Einstein en 1905, en uno de sus artículos titulado “*Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de luz*”, fue quien habló acerca de los fotones y su teoría para explicar con mayor claridad el efecto fotoeléctrico quien recibió el Premio Nobel por ello en 1921. En el cual decía que la energía de un fotón depende de su frecuencia de la luz, como se puede apreciar mediante (1.13) [6]:

$$\varepsilon = h\nu \quad (1.13)$$

Dónde:

$\varepsilon$  = El valor de energía de un fotón.

$h$  = Constante de Planck equivalente a  $6.63 \times 10^{-34}$  J.s.

$\nu$  = Frecuencia de la luz.

Hay muchas formas de radiación electromagnética como se observa en la figura 1.7, se tiene las ondas ultrasónicas, las ondas de radio, la radiación infrarroja (calor), luz ultravioleta, los rayos X, rayos gamma, rayos cósmicos y en la luz visible que su rango es muy pequeño, con la luz roja se tiene una longitud de onda más larga de  $7 \times 10^{-7}$  m y con la luz azul  $4 \times 10^{-7}$  m. Estas diferentes formas de radiación electromagnética se caracterizan por su longitud de onda y frecuencia. Toda radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz. Las ondas electromagnéticas vienen en unidades como los fotones y una alta frecuencia corresponde a fotones de alta energía (ondas cortas) y una baja frecuencia en cambio a fotones de baja energía (ondas largas).

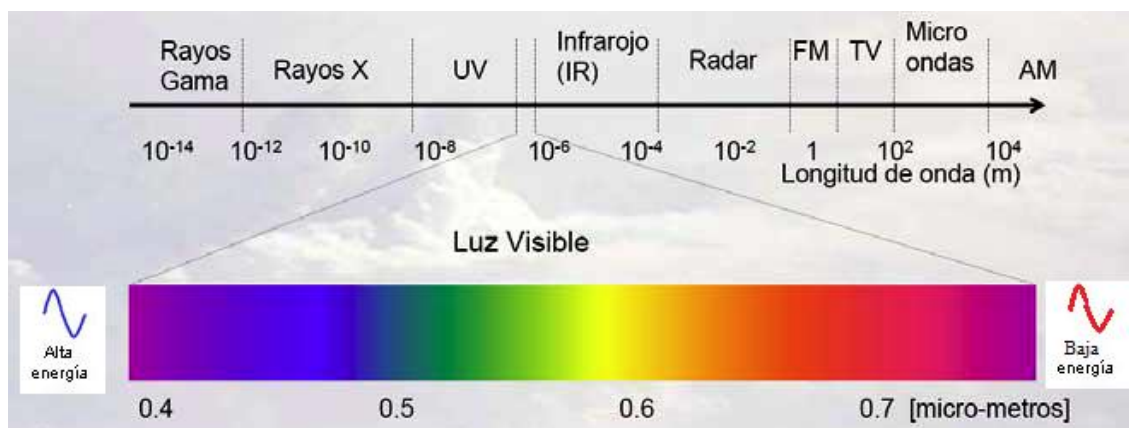


Figura 1.7. Espectro electromagnético

Fuente: Sen Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. 2008, p. 273.

Cuando los fotones chocan o golpean la superficie de un material semiconductor como el silicio, desalojan electrones que provocan una diferencia de potencial entre la superficie frontal y la posterior [5].

La conversión fotovoltaica se base en el efecto fotoeléctrico, es transformar la luz solar en energía eléctrica en dos etapas absorción y conversión mediante dispositivos de estado sólido denominados células solares formadas por semiconductores.

### 1.2.2.1 La Célula Fotovoltaica

Una célula fotovoltaica consiste en la unión de dos capas delgadas (positivo y negativo) de materiales semiconductores generalmente de Silicio por su mayor eficiencia y por ser un elemento abundante que cubre el 25 por ciento de la corteza terrestre. Está formado de rejillas metálicas, recubrimientos anti-reflectantes y un material para encapsulado.

El efecto fotoeléctrico está basado en la propiedad que tienen los semiconductores (aumentar la densidad de electrones libres bajo ciertos estímulos externos) y un campo eléctrico constante formado por la unión p-n. Los electrones libres se generan en la capa negativa por la acción de los fotones de la luz solar, por cada electrón que se libera aparece un hueco con carga positiva. Si la energía del fotón es mayor o igual a la banda prohibida del semiconductor, entonces los electrones se mueven hacia el lado de tipo n y los huecos en el lado de tipo p. Si los dos lados de la célula solar están conectados a través de una carga, una corriente eléctrica fluirá siempre y cuando la luz solar incide en la célula, ver figura 1.8 [2], [5].

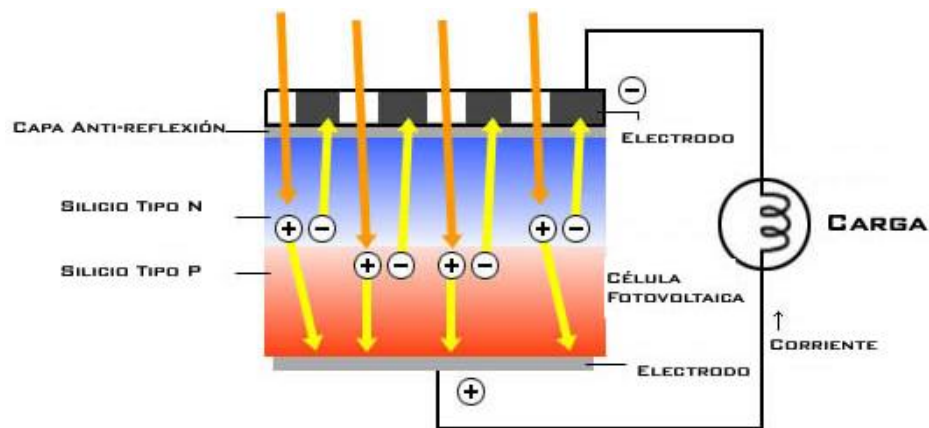
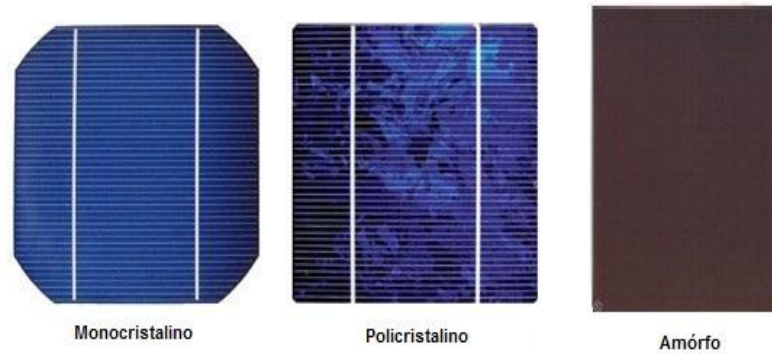


Figura 1.8. Carga de una célula fotovoltaica simple  
Fuente: Sen Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. 2008, p. 273.

El Silicio a escala microscópica es una estructura cristalina dispuesta con átomos

ordenados. Según los métodos de fabricación que se empleen, existen diferentes tipos de células solares comúnmente utilizados para producir energía fotovoltaica: amorfo, policristalino (color azulado) y monocristalino (color oscuro) [7], ver figura 1.9.



*Figura 1.9. Tipos de células solare*

*Fuente: R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, SOLAR ENERGY. New York: Taylor and Francis Group, LLC, 2010, p. 352.*

La célula de Silicio amorfo no tiene ninguna estructura cristalina. El espesor de toda la celda es de 300 a 800  $\mu\text{m}$ . Se desarrollan con tecnología de capas delgadas 20  $\mu\text{m}$  (tamaño de un tercio de grueso de un cabello) sucesivas de Silicio puro sobre un sustrato de vidrio, cerámica, metal o plástico para un panel flexible. Es muy económica por su baja eficiencia y poca vida útil. Para su fabricación no utilizan elementos contaminantes y la ausencia de soldaduras (conexionado) [10].

La Célula de Silicio policristalino proceden del corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar en un molde generalmente cuadrado con un vértice de 45° en las esquinas para un mayor compactación dentro del panel. Su superficie no tiene un color uniforme, sino que presentan diferentes tonos azulados. Su costo de fabricación es más elevado que el anterior. Su estructura atómica no es tan ordenada, por lo que pierde rendimiento, su costo es menor al silicio monocristalino.

La Célula de Silicio monocristalino tiene su superficie totalmente homogénea de color azul oscuro o negro si cuentan con recubrimiento anti reflejante o color gris si no cuentan con él. Para su fabricación, se toma una pequeña porción de silicio de orientación cristalina uniforme en una varilla y se la introduce en un crisol con silicio fundido a 400°C. Luego se extrae lentamente la porción girándola hacia arriba, en forma helicoidal de 1 a 2m de largo y 10-15cm de diámetro. El corte y pulido de éstas crea un gran desperdicio de material. El mayor aprovechamiento de material se logra con el corte redondo, pero éste aprovecha de

manera menos eficiente la superficie del módulo Dónde se colocan las celdas. Su costo como su eficiencia es mucha mayor que las dos anteriores [11].

### 1.3 Generación Distribuida

Existen varias definiciones que los autores y organismos utilizan para explicar la generación distribuida, debido a los múltiples factores que afectan a su definición como: tecnología empleada (solar, eólica, Turbinas de gas), capacidad de potencia, conexión a red. Sin embargo todos coinciden que la generación distribuida (GD) se refiere a pequeños sistemas de generación eléctrica que se encuentran conectados en las redes de distribución, ubicados en puntos cercanos al consumo. La potencia de estos sistemas siempre son menores que los generadores tradicionales [12].

La generación convencional fue diseñada para un flujo de potencia unidireccional desde la subestación hacia los usuarios finales mediante líneas de transmisión y subestaciones. La generación distribuida no es más que una generación descentralizada aplicada a nivel de distribución que al estar más cerca de la carga beneficia a la infraestructura de transmisión y distribución, ver figura 1.10.



Figura 1.10. Redes eléctricas convencionales y micro redes.

Fuente: L. Tecnalia, "Guía Básica de la Generación Distribuida," Fund. la Energ. La Comunidad Madrid, p. 64, 2007.

La generación local puede aliviar las instalaciones de transmisión y distribución sobrecargadas, así como reducir las pérdidas y la caída de voltaje [13].

Las aplicaciones de la Generación Distribuida van desde la generación para carga base (un sistema de generación principal y continua interconectada a la red de distribución para operaciones de compra y venta de energía), generación para carga en picos (un sistema alterno de respaldo para reducir el consumo desde la red de distribución en los periodos de mayor precio del KWh, de acuerdo con las fluctuaciones de la oferta en el mercado), generación aislada (un sistema de generación para poblaciones totalmente incomunicadas al sistema de interconexión eléctrica), mejora de la calidad de suministro, respaldo y soporte a la red de transporte y distribución (un sistema de respaldo empleado especialmente en empresas de alto consumo energético sólo en ciertos periodos del año, o para casos en los que se requiere elevar los niveles de confiabilidad en el suministro eléctrico) [14].

Ninguna tecnología abarca todo el rango de beneficios por sí misma, sino que cada una se ajusta mejor a unas aplicaciones que a otras. Muchos equipos de generación distribuida operan en paralelo con la red eléctrica, para lo cual necesitan estar conectados a ella de forma adecuada. El sistema de interconexión está formado por una serie de equipos (hardware y software) que permite realizar la conexión física del generador distribuido y los equipos de almacenamiento con la red eléctrica (normalmente, la red de distribución local) y con las cargas locales (consumidores). Proporciona acondicionamiento y conversión de la energía (en caso necesario), protección, monitorización, control, medida y despacho de la unidad de GD [15].

#### **1.4 Clasificación de los de sistemas fotovoltaicos**

A los sistemas fotovoltaicos se los puede clasificar por varios criterios como por ejemplo: por su configuración y conexión de sus componentes, por su aplicación, por su utilización o por la capacidad de generación, de todos los anteriores se los puede abarcar en dos grandes grupos que son los sistemas fotovoltaicos aislados (stand alone) y los sistemas conectados a la red eléctrica (grid connected) [16]. Conformado por los siguientes componentes:

##### **1.4.1 Componentes de los Sistemas Fotovoltaicos**

Los componentes de los Sistemas Fotovoltaicos son los siguientes:

###### **a) *Panel Solar***

Los paneles solares o llamados módulos fotovoltaicos, son elementos principales sin



estos simplemente no funcionaría ningún sistema fotovoltaico.

Están compuestos de células solares formadas por la unión p-n de silicio en forma monocristalina, policristalina y/o amorfa, recubiertas de una película anti reflectante para evitar pérdidas por reflexión, seguidas de una lámina metálica para acumular la electricidad producida [1].

La eficiencia de conversión dependerá del producto de fabricación y no es más que el cociente entre la potencia máxima entregada a la carga y la potencia generada por la celda, se representa (1.14):

$$\eta = P_{m\acute{a}x} / G \quad (1.14)$$

Dónde:

$\eta$  = Eficiencia de conversión.

$P_{m\acute{a}x}$  = Potencia máxima de entrada.

$G$  = Potencia generada de salida.

Generalmente la eficiencia se encuentra entre el 13 por ciento y 17 por ciento aproximadamente sobre la base de los costos de producción [17]. En la Tabla 1.1, se muestra los tipos de materiales de células solares y su eficiencia de transformación de energía:

Tabla 1.1: Tipos de materiales de células solares

Fuente: C.-L. Lin, Y.-C. Hwang and H.-C. Lin, "Study of the Efficiency Improvement in Power Generation from Photovoltaic," Proceedings of the 2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), pp. 510, 2013.

<b>Tipos de cédas Solares</b>	<b>Materiales de Semiconductor</b>		<b>Transformación de la eficiencia</b>
Silicio	Cristalino	Solo Cristalino	12 ~ 20%
		Poli cristalino	10 ~ 18%
	Amorfo	Si, SiC, SiGe, SiH, SiO	6 ~ 9%
Compuesto	Solo Cristalino	GaAs, InP	18 ~ 30%
	Poli cristalino	CdS, CdTe, CuIns, CuInGaSe	10 ~ 12%
Nano y orgánico	TiO2/Dye		1% y bajo

**b) Sistema de acumulación (Baterías)**

Sirven para almacenar la energía, son más utilizados en los sistemas aislados para que proporcionen energía en la noche en ausencia de la luz solar. Las baterías están compuestas de dos electrodos sumergidos en un electrolito. Donde se provocan las reacciones químicas en los procesos de carga y descarga.

Las baterías comúnmente utilizadas son las de plomo-ácido y las de níquel-cadmio, las primeras tienen bajo costo, las otras son más fiables y resistentes y no requieren de un regulador, por lo cual suministran un valor de voltaje suficientemente estable así como también disminuyen su mantenimiento.

La temperatura ambiente afecta directamente con la carga y descarga de un acumulador o batería, siendo así que a baja temperatura, la caída de voltaje es mucho mayor que para una temperatura de 25°C, esto se debe a que se retarda la reacción química aumentando la pérdidas de voltaje por el aumento de la resistencia interna de la batería.

En la tabla 1.2, se puede apreciar la variación de la capacidad ante valores distintos de temperatura [18].

*Tabla 1.2: Capacidad en función de la temperatura*

*Fuente: A. A. Bayod Rujula, Energías Renovables - Sistemas Fotovoltaicos, Primera. España, 2009, p. 336.*

Temperatura (°C)	Capacidad (%)
30	105
25	100
16	90
4	77
-7	63
-18	49
-29	35
-40	21
-51	9

A temperaturas demasiado altas, la vida útil de la batería se reduce y si se tiene muy bajas temperatura se alarga la vida útil pero en cambio se corre el riesgo la congelación de la batería. Lo mejor es mantener a temperaturas indicadas por los fabricantes para evitar daños a los acumuladores.

Las pérdidas de energía en las baterías se dan a causa de diferencias en voltajes durante la carga y descarga, calentamientos, gasificación y por pérdidas de carga en un periodo de

tiempo. Su eficiencia depende del estado de carga, la carga propiamente dicha y de la corriente de descarga. En (1.15) se aprecia el estado de carga con sus siglas en inglés (SOC) es la relación entre la capacidad actual de la batería y la capacidad nominal. Es decir la relación de la carga extraída durante la descarga dividido para la cantidad de carga necesaria para restaurar el estado inicial de carga [19], [2].

$$SOC = q/q_{m\acute{a}x} \quad (1.15)$$

Dónde:

SOC = Estado de carga (State Of Charge).

q = Capacidad de la batería en descarga.

q<sub>máx</sub> = Capacidad Nominal de la batería.

Si SOC = 1, quiere decir que la batería está totalmente cargada y si SOC = 0, entonces la batería está descargada a su mínimo.

### **c) Regulador**

Son equipos encargados de controlar las operaciones de carga y descarga de las baterías y así alargar su vida útil. La función del regulador es mantener correctamente el nivel de carga dentro de los límites admisibles y desconectarse cuando el nivel de carga haya llegado al 100 por ciento. Cuando está por llegar al valor máximo de la carga nominal (según tipo de batería) el voltaje aumenta repentinamente y si no se interrumpe la corriente, se produce el fenómeno de la desgasificación o escape de gases (sobrecarga con electrolisis del electrolito) y cuando el valor de la carga nominal baja de un cierto nivel, el voltaje disminuye rápidamente y si no se interrumpe la corriente se produce la sulfatación afectando la capacidad de recarga [1].

Existen reguladores lineales tipo serie, paralelo y MPPT. El primero es el más utilizado en sistemas aislados porque son para potencias muy bajas, funciona como unos interruptores conectados en serie entre el módulo fotovoltaico y la batería y otro entre la carga. Mientras que los de tipo paralelo tienen una eficiencia mayor en la carga de la batería, pero su desventaja es que necesitan grandes disipadores de calor para eliminar las elevadas corrientes del generador fotovoltaico, se conectan en paralelo al módulo y por su configuración presentan caídas de tensión al momento de cargar la batería. Los reguladores

seguidores del punto de máxima potencia MTTP tiene un elemento que transforma el voltaje de salida del módulo al valor que requiere la batería para cargar [18], [19].

#### ***d) Inversor***

Los inversores son circuitos electrónicos de potencia hechos con transistores o tiristores que permite transformar la corriente continua generada por los paneles y almacenada en las baterías, en corriente alterna para ser utilizada en aparatos eléctricos convencionales que funcionan con voltaje alterno 120Vac y frecuencia de 60 Hz.

Según su utilización los inversores se pueden clasificar en inversores de conmutación forzada y de conmutación natural. Los primeros llamados también autoconmutados generalmente son utilizados en sistemas fotovoltaicos aislados, su funcionamiento (apertura y cierre) es forzado por el sistema de control, mientras que los inversores de conmutación natural o conmutados por la red, que por medio de una conmutación controlan el flujo de energía si va hacia la red o hacia la carga [16].

Su eficiencia depende de la potencia y de la temperatura de trabajo. También depende de la calidad de la forma de onda. El autoconsumo del mismo inversor sin carga producen pérdidas que no deben superar el 2 por ciento de la potencia nominal de salida [18].

#### ***e) Contadores de energía***

Son equipos electrónicos que sirven para medir la energía eléctrica entregada a la red por el usuario con el fin de facturación a las empresas distribuidoras. Se puede instalar un contador bidireccional o dos contadores unidireccionales, uno para medir el consumo del cliente cuando utiliza energía de la red eléctrica y el otro contador para medir la energía producida e inyectada a la red eléctrica local. En ambos casos los contadores miden en kilovatios-hora para que las empresas eléctricas distribuidoras puedan facturar a los precios autorizados. En General es la empresa eléctrica distribuidora quién determina el tipo de contador a instalarse [20].

#### ***f) Cables y protecciones***

Los cables deben tener la longitud más corta posible, para así reducir pérdidas en el cobre por caídas de voltaje. La sección del conductor debe ser el más apropiado, para evitar pérdidas por el calentamiento del cable debido al efecto Joule. En ambos casos los valores de pérdidas deben ser inferiores a 1,5 por ciento del valor de voltaje nominal, tanto para la

parte CA como para la parte CC. En cuanto a las protecciones los conductores deben poseer un aislamiento superior a los 1.000 voltios y todas sus estructuras metálicas tiene que estar aterrizadas a tierra [18]. Así como también deberán cumplir con todas las normas establecidas en el artículo 690 del Código eléctrico Nacional (NEC) [21].

#### 1.4.2 Sistema fotovoltaico aislado (stand alone)

El sistema aislado como su nombre lo indica, no tiene una conexión a una red eléctrica de distribución. Consta de un panel solar, un banco de baterías y regulador (dependiendo si tiene o no sistema de acumulación), circuito para corriente continua y/o para corriente alterna mediante un inversor como se ve en la figura 1.11 [1].

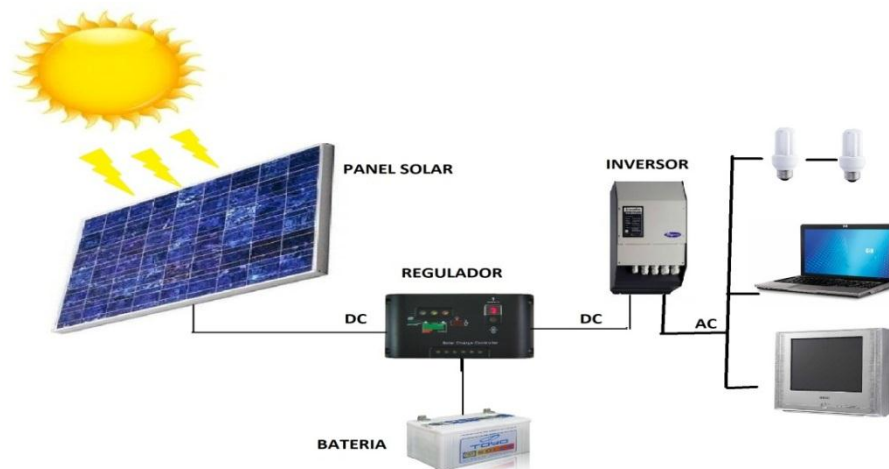


Figura 1.11. Esquema de un sistema fotovoltaico aislado con sus componentes  
Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316.

Son comúnmente utilizadas a nivel residencial en zonas rurales en Dónde no existe una red pública debido a los costos, en iluminación pública como parques y carreteras, en sistemas para bombeo de agua, sistemas de telecomunicaciones para repetidoras de señal, boyas, vehículos espaciales, en equipos electrónicos como calculadoras.

Este tipo de sistemas se los puede distinguir entre sistemas con acumulación y sin acumulación. El sistema fotovoltaico con acumulación es el que tiene un grupo de baterías que permite almacenar la energía para ser consumida cuando no exista radiación solar. Mientras que el sistema fotovoltaico sin acumulación no dispone de baterías y solo funciona en el día cuando se tiene irradiación solar. Ambos sistemas pueden suministrar en corriente continua, corriente alterna o en los dos tipos de corriente y/o al mismo tiempo [16].

### 1.4.3 Sistema fotovoltaico conectado a la red (grid connected)

A diferencia de los sistemas aislados que su objetivo es producir energía para consumo propio. En los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, su intención es generar energía que a más de ser consumo propio, también sirva para inyectar a las redes eléctricas distribuidoras con fines lucrativos [16].

Están conformados por un panel, un inversor, sistemas de protección y medidores (contadores de energía unidireccional o bidireccional), ver la figura 1.12.

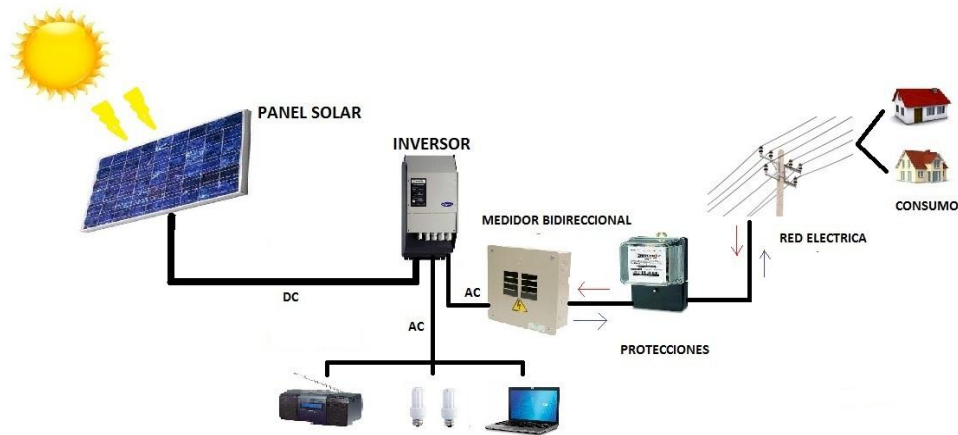


Figura 1.12. Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red con sus principales componentes  
Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316.

No disponen de regulador, ni baterías y el inversor cumple una función muy importante como es el adecuar la energía a iguales características (voltaje y frecuencia) de la red a la que se está suministrando. Es decir la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos pasa directamente al inversor donde transforma y entrega en corriente alterna para luego pasar por medio de elementos de protección y equipos de medición hasta llegar a la red de distribución. Este tipo de sistemas también son utilizados para centrales fotovoltaicas, donde toda la energía generada es inyectada a la red [22].

## **CAPÍTULO II**

### **TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA**

Fue en el siglo XIX Dónde se llegó a descubrir diferentes efectos entre la luz y la electricidad. El efecto fotovoltaico que es generar una fuerza electromotriz en el metal descrito por Becquerel (1839), promovió a más científicos a desarrollar las células solares capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica. Los semiconductores es el material utilizado para su construcción entre ellos tenemos el silicio cristalino y el policristalino con una vida útil de 20 años y nuevas tecnologías de capa fina como es el Telurio de Cadmio, Sulfuro de Cadmio y el Arseniuro de Galio con los cuales, se mejora considerablemente su rendimiento, pero el costo de fabricación es muy alto debido a su poca abundancia en la corteza terrestre, motivo por el cual, dejan de ser una alternativa viable en la construcción de paneles fotovoltaicos.

#### **2.1 Celdas fotovoltaicas**

Las celdas solares o fotovoltaicas son los dispositivos más importantes en la conversión de la luz del sol en energía eléctrica en forma directa, sin la necesidad de piezas móviles o algún tipo de combustión. El funcionamiento se basa en la interacción de fotones y electrones, dentro de un material semiconductor cuya propiedad principal es que bajo ciertas condiciones son capaces de conducir electricidad y en otras no, llamado efecto fotovoltaico. Dicho material sensible a la radiación solar y el más utilizado en la actualidad por ser un elemento abundante en todo el mundo, es el silicio [23].

El proceso de fabricación, clasificación, principio de funcionamiento y características eléctricas de las celdas fotovoltaicas, se describen con detalles más adelante.

##### **2.1.1 Estructura de la celda fotovoltaica**

La teoría cuántica nos habla de los niveles de energía que tienen los electrones de un átomo mediante diagramas de bandas de energía, ver figura 2.1. El semiconductor es el elemento más importante dentro de la celda fotovoltaica y según su estructura atómica se clasifican en tres grandes grupos de cristales (mono, poli y amorfo) que se mencionarán más adelante. De esta estructura cristalina dependerá la eficiencia en la conversión de energía solar en eléctrica. La mayoría de las celdas fotovoltaicas de aplicación comercial son fabricados con semiconductores intrínsecos de silicio puro mono o policristalino. El

silicio es un elemento químico con 14 electrones y en su última capa tiene 4 electrones denominados electrones de valencia, quienes permiten unirse (enlaces covalentes) con electrones de valencia de otros átomos y formar así cristales puros de silicio. Dónde no existen electrones libres [24], [16].

Para liberar este enlace covalente es necesario que un fotón impacte con los electrones de la estructura de cristal de silicio, transmitiendo así su energía a la banda de conducción pasando por la banda prohibida (Gap), que para el silicio tiene un valor de 1.124 eV [25] (un 1eV es igual a la energía que adquiere un electrón sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio, en el vacío). En este estado de energía el electrón se mueve libremente dentro del cristal (electrón libre), mientras que en la banda de valencia se ha creado un hueco que corresponde al nivel de energía que ha dejado el electrón libre, con lo que se tiene un campo eléctrico gracias al semiconductor. A mayor cantidad de fotones que golpee la superficie de la celda, mayor serán las parejas de electrón-hueco que se generen y con esto mayor cantidad de corriente se producirá [26], [22].

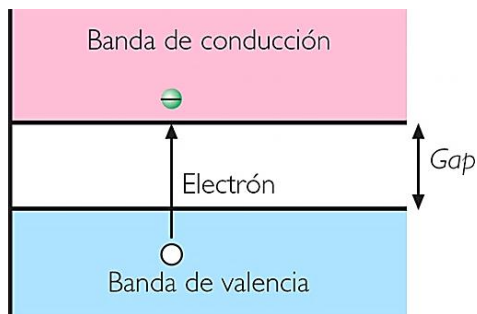


Figura 2.1. Estructura de bandas en un semiconductor y creación de un par electrón-hueco  
 Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, Tecnología solar, Mundi-Pren. Madrid-Barcelona-México, 2005, p. 544.

Para lograr un campo eléctrico constante, en la parte superior del semiconductor se introducen impurezas (átomos de Fósforo que tienen 5 electrones de valencia) y en la parte inferior en cambio (átomos de Boro tienen 3 electrones de valencia), ver figura 2.2, con lo que se crea un exceso de electrones en la banda de conducción denominado semiconductor de *tipo n*, mientras que en la banda de valencia se tiene un exceso de huecos llamado semiconductor de *tipo p*. A este proceso se lo denomina *dopaje* formando los semiconductores extrínsecos y que al unir estos dos tipos de semiconductores obtenemos el *diodo* ó enlace *p-n*. En esta unión se tiene una zona denominada *neutra*, Dónde los electrones del semiconductor *tipo n*, se combinan con los huecos del semiconductor *tipo p*



en igual cantidad. Así en los extremos del semiconductor se tiene una diferencia de potencial llamada *potencial de contacto* que al conectar una carga se produce una corriente continua, debido al movimiento de electrones del lado negativo al positivo [27], [24].

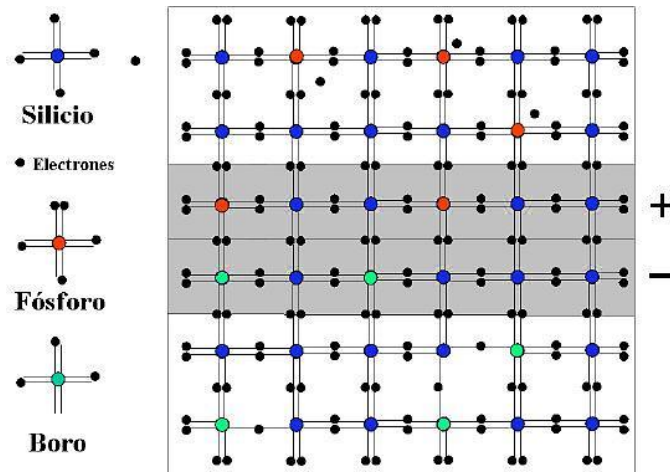


Figura 2.2. Representación del Potencial eléctrico

Fuente: J. M. Fernández Salgado, *Tecnología de las energías renovables, Primera. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2009, p. 390.*

Con el fin de aumentar el rendimiento de la celda fotovoltaica, en la superficie frontal se la texturiza (formación de micro pirámides) para minimizar la reflexión del silicio pulido. Las células solares para poder suministrar energía al exterior, van provistas de unos dedos o mallas metálicas, por donde circulará al exterior la corriente eléctrica generada, ver figura 2.3 [28].

El voltaje de la celda no depende de su tamaño. La corriente es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz [16].

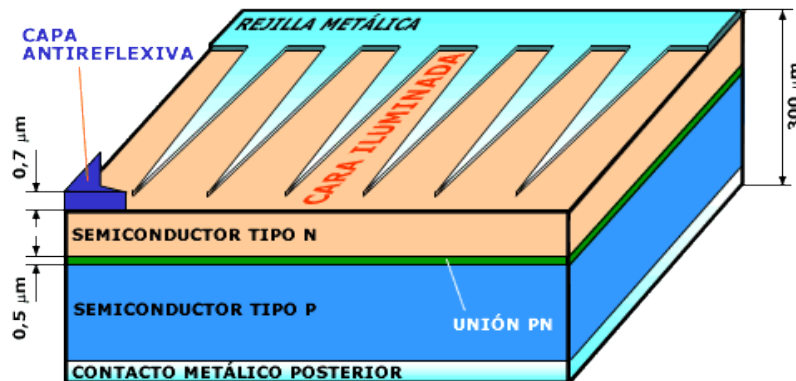


Figura 2.3. Estructura de la celda fotovoltaica

Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica. México: Limusa, 2011, p. 316.*

### 2.1.2 Efecto fotovoltaico

En 1839, el físico francés llamado Edmund Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico mientras trabajaba con dos electrodos de metal en una solución conductora de electricidad, el señaló que el aparato generaba voltaje cuando se lo exponía a la luz [29].

Años más tarde Albert Einstein en 1905 supo explicar de mejor manera este fenómeno ganando así el Premio Nobel como se describió en el capítulo anterior.

La palabra “fotovoltaico proviene de dos palabras griegas: *foto* que significa luz y el término *voltios*, que es una medida de la electricidad llamado así por Alessandro Volta (1745-1827), creador de la pila eléctrica en 1800 [30].

La radiación solar incidente puede ser considerado como unidades de energía discretas llamadas fotones y el producto de la frecuencia y la longitud de onda es igual a la velocidad de la luz, mediante (2.1):

$$C = \lambda * \nu \quad (2.1)$$

Dónde:

$C$  = Velocidad de la luz que es igual a 3000.000km/s.

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ ).

$\nu$  = Frecuencia.

Combinando (1.3) con (1.6), se obtiene energía del fotón, así (2.2) [2]:

$$\varepsilon = hc / \lambda \quad (2.2)$$

Dónde:

$\varepsilon$  = El valor de energía de un fotón.

$h$  = Constante de Planck equivalente a  $6.63 \times 10^{-34}$  J.s.

El efecto fotovoltaico es la base de la conversión de luz solar en electricidad, mediante las celdas o células solares (elementos semiconductores).

La luz solar está compuesta por fotones de diferentes niveles de energía, que corresponden a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones chocan sobre la superficie de la celda fotovoltaica, algunos de estos son reflejados

(absorbidos) y otros pasan a su través. Únicamente los fotones absorbidos son quienes generan la electricidad, los cuales reparten suficiente energía que se transfiere a un electrón de un átomo de la célula (partícula atómica de carga negativa), con esta nueva energía el electrón es capaz de moverse o liberarse de su posición normal asociada con un átomo para producir un voltaje llamada fotovoltaaje que se puede utilizar para conducir una corriente a través de un circuito eléctrico, ver figura 2.4 [31].

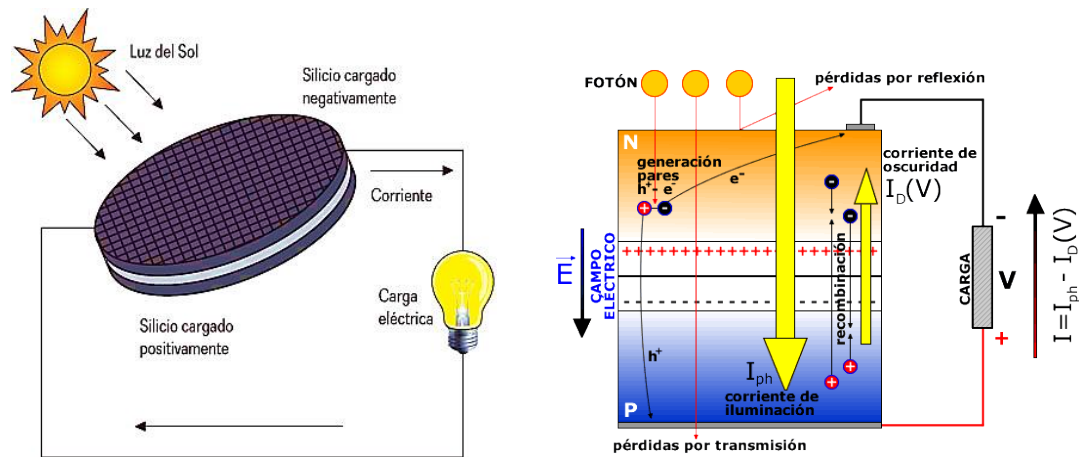


Figura 2.4. Principio básico de trabajo de la tecnología fotovoltaica  
Fuente: A. ; G. Harper Enríquez, *Tecnologías de Generación Eléctrica, Primera*. México: Limusa S.A., 2011, p. 368.

### 2.1.3 Características eléctricas de la celda fotovoltaica

Las características eléctricas de una celda fotovoltaica se las obtiene mediante un circuito eléctrico equivalente de una celda ideal, ver figura 2.5, donde la corriente y el voltaje dan como resultado una curva I-V que representa pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la celda.

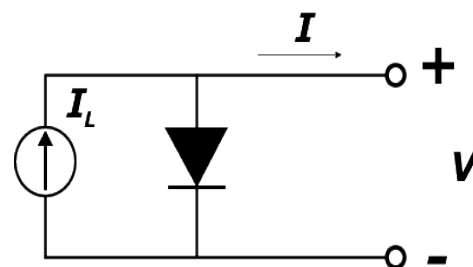


Figura 2.5. Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar  
Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, *Tecnología solar, Mundi-Pren*. Madrid-Barcelona-México, 2005, p. 544.

**a) Características V-I de iluminación**

La celda fotovoltaica o célula fotoeléctrica en ausencia de luz, la intensidad de corriente de salida es igual a la de un diodo semiconductor, mediante (2.3), esto es, por la recombinación inducida a causa del voltaje.

$$I = I_D = I_O(T) \left[ \exp\left(\frac{q_E V}{\sigma_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Donde:

$I_D$  = Intensidad de corriente del diodo (A).

$I_O$  = Intensidad de corriente de oscuridad o inversa de saturación del diodo (A).

$T$  = Temperatura (K).

$\sigma_B$  = Constante de Boltzmann equivalente a  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K.

$q_E$  = Carga del electrón equivale a  $1.602 \times 10^{-19}$  C.

La intensidad de corriente de salida en presencia de luz es igual a la diferencia entre la corriente generada y la del diodo, (2.4).

$$I = I_L - I_O \left[ \exp\left(\frac{q_E V}{\sigma_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

La célula solar con mayor uso es la de unión tipo p-n, cuya curva de funcionamiento en la oscuridad se comporta como un diodo, mientras que cuando está iluminada el diodo se convierte como generador y su curva de funcionamiento es diferente, ver figura 2.6 [32] :

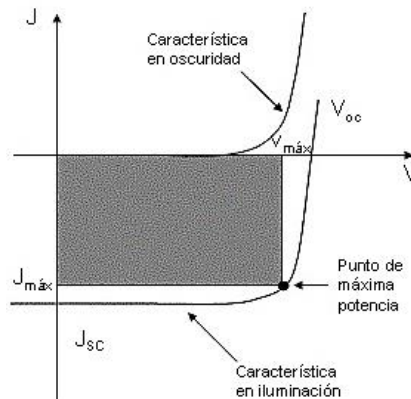


Figura2. 6. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

Fuente: F. J. Gimeno Sales, S. C. Salvador, and O. G. Salvador, *Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*, Primera. Barcelona: Universidad Politecnica de Valencia, 2011, p. 337.

Si se le acopla una resistencia en serie y en paralelo, un amperímetro para medir la intensidad de corriente producida y un voltímetro para cuantificar la diferencia de potencial entre los terminales de la celda fotovoltaica, figura 2.7, se obtiene las características eléctricas que definen el comportamiento de la celda fotovoltaica más cercana a la realidad, matemáticamente se expresa mediante (2.5). Los parámetros y características de los paneles fotovoltaico generalmente vienen especificados en las hojas técnicas de los fabricantes [33], [34].

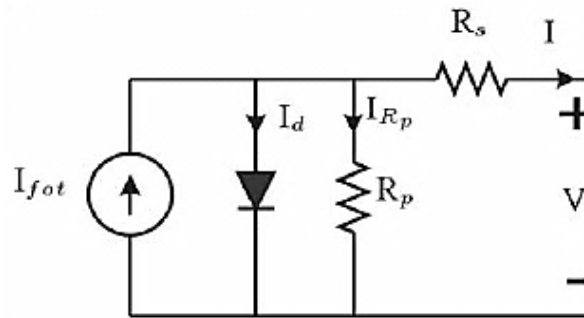


Figura 2.7. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico

Fuente: A. ; M. M. Vallina, *Instalaciones solares fotovoltaicas, Primera. España, Madrid, 2010, p. 216.*

$$I = I_L - I_o \left[ \exp \left( \frac{q_E (V + R_S I)}{m \sigma_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (2.5)$$

Donde:

$I_L$  = Intensidad de corriente fotogenerada (A).

$R_s$  = Resistencia serie ( $\Omega$ ).

$R_p$  = Resistencia paralelo ( $\Omega$ ).

$m$  = Parámetro adimensional que vale entre 0 y 1.

$V$  = Voltaje del panel (V).

Para lograr una eficiencia alta en la conversión de energía solar en energía eléctrica, la corriente de generación en la celda debe alcanzar el valor máximo, para lo cual, las pérdidas de fotones deben ser mínimas, así como también, debe tener una baja reflectancia superficial, una absorción de luz en las proximidades de la capa de empobrecimiento, una área mínima de contacto entre la superficie del semiconductor y el contacto óhmico y altas concentraciones de dopante.

La resistencia paralelo  $R_p$ , es una resistencia debido a imperfecciones en la calidad de la

unión p-n, la cual produce fugas de corriente, este valor deber ser elevado. La resistencia serie  $R_s$ , es una resistencia interna propia del semiconductor y tiene que ser un valor bajo [18], [35].

**b) Intensidad de cortocircuito ( $I_{CC}$  o  $I_{SC}$ )**

Cuando dicha resistencia es nula, se tiene un circuito por Dónde circulará la máxima corriente a través de la celda, el voltaje equivale a cero ( $V=0$ ), así (2.6) [18]. El valor varía de forma proporcional en función de la radiación solar a la cual la célula está expuesta [16].

$$I_{cc} = I(V = 0) = I_L \quad (2.6)$$

**c) Tensión a circuito abierto ( $V_{CA}$  o  $V_{OC}$ )**

Si la resistencia es infinita, se tiene un circuito abierto ( $I=0$ ), en Dónde se mide el voltaje máximo en los extremos de la celda, esto es, cuando no está conectado ningún receptor. El valor medido puede ser mayor que el voltaje nominal de la celda, mediante (2.7) [16].

$$V_{CA} = m \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.7)$$

**d) Punto máximo de potencia ( $P_{cel}$  o  $P_{máx}$ )**

La potencia de una celda fotovoltaica viene dado por el producto de la corriente y el voltaje, (2.8).

Tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia de la celda es cero. Sin embargo existe un punto de operación en el cual la potencia es la máxima disipada en la carga. La potencia máxima o pico es el valor máximo en potencia que puede generar una celda bajo condiciones de radiación incidente, ver figura 2.8 [24].

$$P_{Cel} = I_{MP} * V_{MP} \quad (2.8)$$

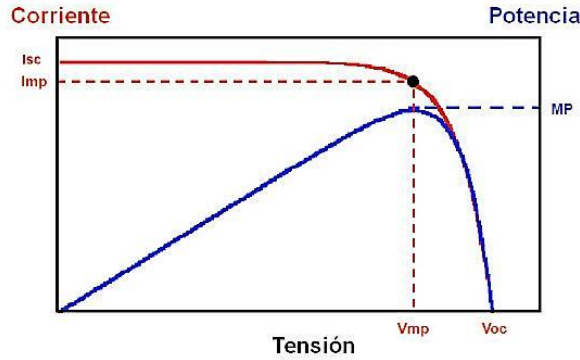


Figura 2.8. Curva característica V-I curva de potencia de una celda fotovoltaica  
Fuente: J. M. Fernandez Salgado, *Tecnología de las energías renovables, Primera. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2009, p. 390.*

e) **Factor de forma (FF)**

Denominado también factor de llenado, es el cociente entre la potencia máxima entregada por la celda y la potencia total incidente de la misma. Este valor siempre es más pequeño que la unidad y es un indicador que mide la calidad de la celda fotovoltaica, muy utilizado de forma práctica que varía de un dispositivo a otros alrededor de 0.7-0.8 para celdas de tipo cristalinas, (2.9) [24]:

$$FF = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{I_{CC} * V_{CA}} \quad (2.9)$$

Aplicando esta definición, la potencia máxima de una celda se puede calcular mediante (2.10) [24]:

$$P_{MÁX} = FF * I_{CC} * V_{CA} \quad (2.10)$$

En la figura 2.9, se puede apreciar que el área del rectángulo que forma la potencia máxima (color azul) es menor que la del rectángulo que forma la potencia total (color verde), sin embargo ambas potencias pueden ser iguales cuando más pronunciado sea el codo de la curva característica (color rojo) [18].

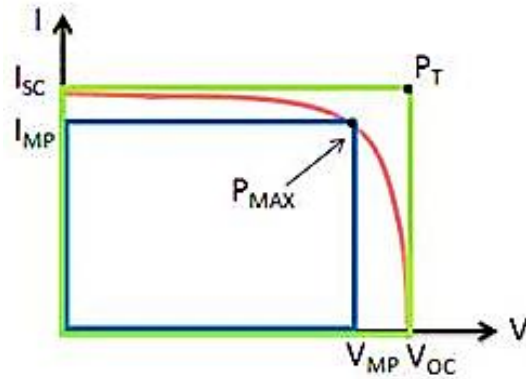


Figura 2.9. Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar  
Fuente: A. A. Bayod Rujula, *Energías Renovables - Sistemas Fotovoltaicos*, Primera. España, 2009, p. 336.

### f) Eficiencia ( $\eta$ )

La eficiencia de una celda fotovoltaica se define como la máxima potencia de salida eléctrica dividida para la potencia de la radiación solar incidente que sobre la célula es el producto de la irradiación incidente por el área de la célula. La potencia pico solo sirve para seleccionar el panel más adecuado en una instalación determinada, más no para estimar la energía que podría generar dicho panel [2], por medio de (2.11) [24]:

$$\eta = \frac{FF * I_{CC} * V_{CA}}{I_S * A} \quad (2.11)$$

Donde:

$I_S$  = Irradiación solar (KW/m<sup>2</sup>).

$A$  = Área de la célula fotovoltaica (m<sup>2</sup>).

Existen otros elementos que provoca pérdidas de energía y con ello una baja eficiencia en las celdas fotovoltaicas como por ejemplo:

- Pérdidas por reflejo debido a la reflexión Dónde se pierde parte de la luz incidente en la superficie de la celda.
- Pérdidas por transmisión cuando el semiconductor no absorbe toda la radiación solar.
- Pérdidas por el uso parcial de la energía incidente, esto es la energía absorbida en el semiconductor posee mayor magnitud comparada al ancho de banda, la diferencia de energía es absorbida por la red cristalina y se pierde en forma de calor.
- Pérdidas por recombinación Dónde algunas cargas se recombinan antes de ser recolectados y pierden la energía en forma de calor.



- Pérdidas por el parámetro del voltaje en los casos de dispositivos con uniones n-p, el potencial interior n-p tendrá una pequeña corriente de fuga y no será posible alcanzar resistencia paralela de valores infinitos, por tanto el Factor de Forma (FF) siempre será menor a la unidad [36].

**g) Influencia de la temperatura**

Los cristales de los semiconductores utilizados para fabricar células fotovoltaicas, son sensibles ante el aumento de calor. El efecto de la temperatura sobre una curva I-V. En la figura 2.10, se indica que el voltaje generado varía inversamente proporcional a la temperatura de la celda, mientras que la corriente de salida incrementa ligeramente, esto es debido al aumento de las longitudes de difusión de los minoritarios y al estrechamiento de la banda prohibida que traslada el umbral de absorción hacia los fotones de menor o poca energía [16]. Tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura ambiente de trabajo, el tipo de variación y la magnitud porcentual son distintas entre sí [24].

El factor de forma disminuye al aumentar la temperatura así como también la eficiencia que se reduce entre el 0,4 por ciento y 0,5 por ciento por °C en las celdas de silicio y un 0,3 por ciento por °C en celdas de GaAs. Las celdas solares a nivel terrestre pueden llegar a calentarse hasta los 70°C, con pérdidas de voltaje por cada grado centígrado que aumenta la temperatura de 2,3 mV/°C para el Silicio y entre 2 a 2,2 mV/°C para el Arsénico [22], con lo que se recomienda que entre los módulos tengan espacios de 10 cm para circulación de aire [16].

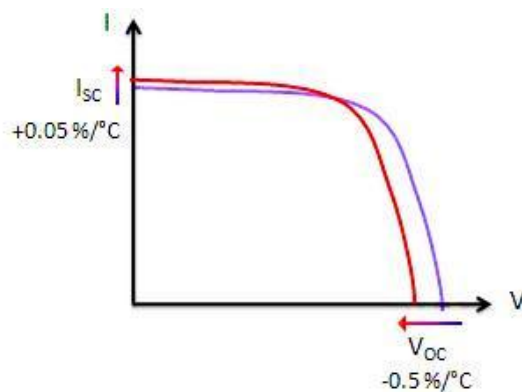


Figura 2.10. Curva I-V de una celda solar con la temperatura

Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, *Tecnología solar, Mundi-Pren. Madrid-Barcelona-México, 2005, p. 544.*

### 2.1.4 Módulos fotovoltaicos

El modulo fotovoltaico es el elemento resultado de la unión de varias celdas fotovoltaicas conectadas eléctricamente en diferentes combinaciones (arreglos) cubiertas en una cápsula laminada para su protección y soporte mecánico. A su vez estos módulos se conectan en serie para aumentar el voltaje y/o en paralelo para aumentar la corriente, formando el panel fotovoltaico, ver figura 2.11. Generalmente tienen un voltaje nominal de 6, 12 o 24 voltios de corriente continua CC.

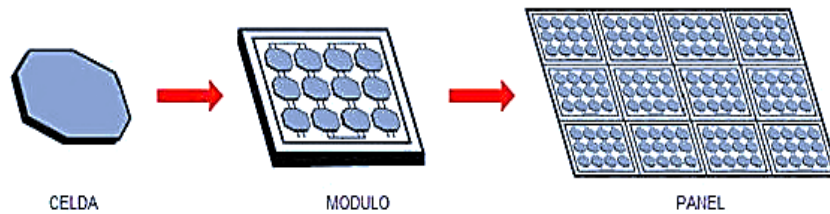


Figura 2.11. Jerarquía fotovoltaica

Fuente: A. ; F. Zobia and R. Bansal, *Handbook of renewable energy technology*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011, p. 851.

El panel solar está formado por una cubierta frontal de vidrio templado entre 3 y 4 mm de espesor y una hoja de soporte generalmente de vidrio o de plástico duro, que sirve para proteger a las celdas de rupturas y de la intemperie. Un marco de aluminio para ajustar alrededor del módulo y permitir una fácil colocación en la estructura de soporte. El encapsulante hecho de etil-vinil-acetato (EVA) que protege las conexiones de las celdas y forma una especie de sándwich entre una lámina delantera y posterior. Las conexiones con bornes de conexión positivo, negativo y los diodos de paso se encuentran en la caja de conexiones ubicada en la parte posterior del panel, figura 2.12 [30].

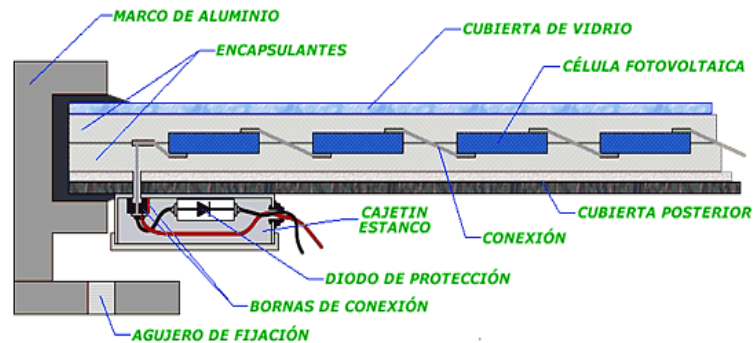


Figura 2.12. Estructura del panel fotovoltaico

Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316.

Existen tres tipos de conexiones de los módulos fotovoltaicos, ver figura 2.13 que son:

- Conexión Serie.- Tiene por objetivo aumentar el voltaje y mantener la intensidad de corriente del panel fotovoltaico.
- Conexión Paralelo.- Tiene por objetivo aumentar la intensidad de corriente y mantener el voltaje del panel fotovoltaico.
- Conexión Mixta.- Es la combinación de las dos conexiones anteriores serie-paralelo, con la finalidad de aumentar tanto el voltaje como la intensidad de corriente del panel fotovoltaico.

Para ello todos los módulos a conectarse deben tener las mismas características eléctricas (potencia, voltaje, corriente) [37].

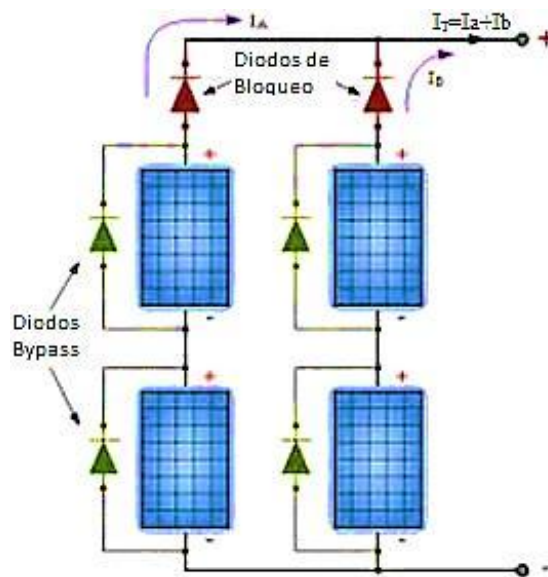


Figura 2.13. Conexiones de los módulos con sus diodos de protección  
Fuente: J. R. VILORIA, Instalaciones solares fotovoltaicas, Primera. Madrid, España, 2010, p. 408.

## 2.2 Clasificación de las celdas fotovoltaicas

Una celda solar en términos simples es un diodo con una superficie que puede alcanzar las decenas de  $\text{cm}^2$ . En la actualidad la mayoría de las celdas son fabricadas de Silicio, el que se encuentra en la naturaleza como un componente mineral de la arena (dióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ) [16], pero para su utilización debe pasar por muchos procesos ver figura 2.14 y así obtener una alta pureza, con lo que encarece el costo en la fabricación de los paneles fotovoltaicos [38].

Así, las rocas de cuarzo mediante el proceso de reducción con carbono, se obtiene el

Silicio con una pureza aproximada del 99 por ciento, denominado Silicio de grado metalúrgico. Luego por procedimientos químicos se obtiene el Silicio grado semiconductor con concentración de impurezas menor al 0.2 partes por millón, pero para usos solares debe tener concentraciones de impurezas del orden de una parte por millón denominado Silicio grado solar. Como siguiente paso se tiene la cristalización de Dónde se puede obtener las estructuras monocristalina y policristalina (el grado de pureza del silicio durante el crecimiento/recristalización). El corte del lingote permite obtener las obleas del orden de 2-4 mm, pero con una gran cantidad de desperdicio de material. Una vez decapado (limpieza de la oblea) se procede al dopado, que es introducir cantidades controladas de átomos de impureza específicos con el propósito de aumentar la concentración de electrones a la de huecos usados muy comúnmente en el proceso de fabricación de dispositivos semiconductores. Finalmente, se añade las láminas de contactos y una capa anti-reflejante sobre la célula, con el fin de mejorar las posibilidades de absorción de la radiación solar [34].

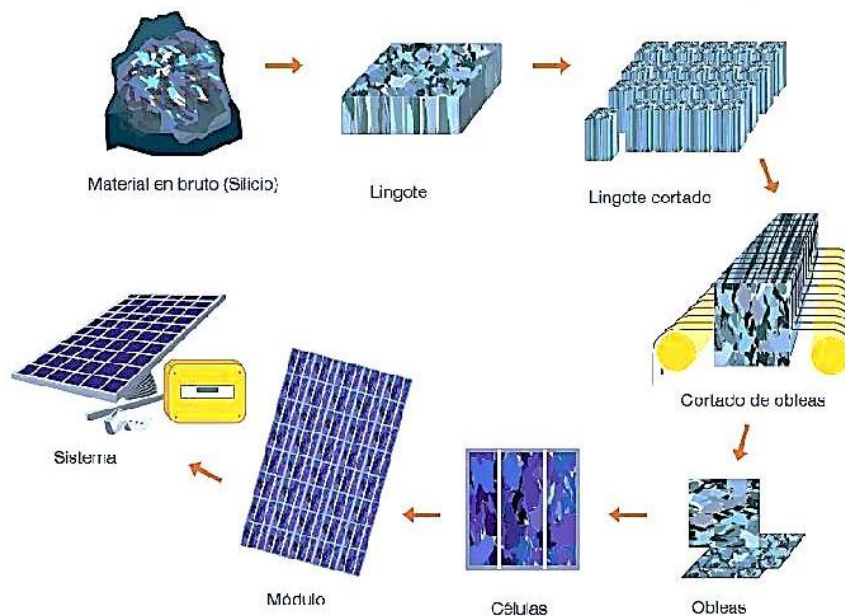


Figura 2.14. Construcción de las Células Solares

Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316.

Según la pureza del material empleado para su fabricación, en el mercado se los puede encontrar de tipo: monocristalino, multicristalino o policristalino, amorfos y células solares de película delgada.

### 2.2.1 Celda de silicio monocristalino

Proviene de un corte muy delgado de un gran cristal único de Silicio puro con lo que se desperdicia más de la mitad del material, son de color negro azulado uniforme. Tienen la mejor eficiencia en la que la mayoría de autores señalan entre el 13 por ciento y 17 por ciento con una larga vida útil comprobada. Requiere un elaborado proceso de manufactura con lo cual consume grandes cantidades de energía eléctrica, por lo que su costo es ligeramente mayor en comparación de otros tipos. Actualmente son las más utilizadas en el mercado fotovoltaico y para la obtención de las celdas monocristalinas se emplea el método denominado Czochralski, que consiste en hacer girar una semilla de cristal sumergida en una masa fundida de cristal de Silicio, con esto los átomos se adaptan a la estructura cristalina del patrón determinado por la semilla, a la vez que se saca lentamente va creciendo el cristal solido de Silicio obteniendo así un lingote monocristalino, ver figura 2.15 [24], [29].

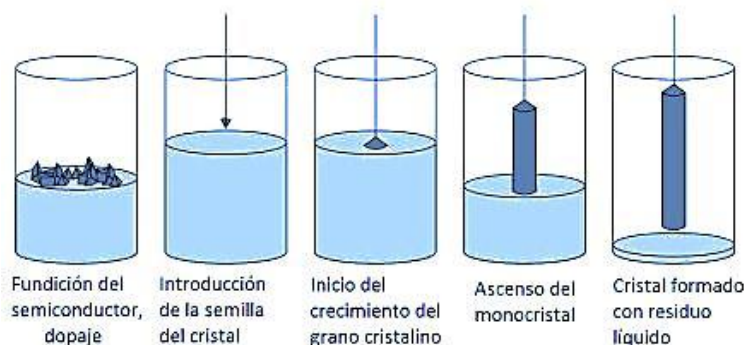
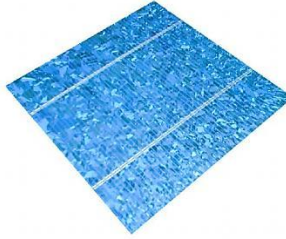


Figura 2.15. Método de Czochralski  
Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso\\_Czochralski](http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Czochralski)

### 2.2.2 Celda de silicio policristalino

Este tipo de celdas se las obtiene fundiendo múltiples cristales pequeños de Silicio hasta formar una pasta el cual, se coloca en moldes rectangulares y se lo deja reposar; como resultado se tiene un sólido formado por muchos y diminutos cristales que de ahí su nombre y su color no uniforme presentando diferentes tonalidades de azul, ver figura 2.16. Estas planchas policristalinas son más económicas, pero su eficiencia también es menor entre 11 por ciento y 14 por ciento de rendimiento energético y una vida útil de entre 20 y 25 años.

El corte de las planchas también produce un desperdicio en forma de polvo en casi la mitad del silicio [16], [24].



*Figura 2.16. Celda policristalina*

*Fuente: J. M. Fernandez Salgado, Tecnología de las energías renovables, Primera. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2009, p. 390.*

### **2.2.3 Celda de silicio amorfo**

También llamadas de tecnología de lámina delgada, el Silicio tiene forma no cristalina con defectos en sus enlaces atómicos. Las células de silicio amorfo se obtienen depositando una capa delgada o película sobre una variedad de superficies, tales como vidrio. Tienen un color mate oscuro con un buen rendimiento en condiciones de poca luz. Sin embargo, su eficiencia es del 5 por ciento y 8 por ciento. Es una tecnología de bajo costo muy utilizada cuando se requiere muy poca electricidad como en relojes, calculadoras y con una vida útil de 10 años, ver figura 2.17 [29].



*Figura 2.17. Celda Silicio amorfo*

*Fuente: M. Á. Sánchez Maza, Energía solar fotovoltaica. México: Limusa, 2011, p. 316.*

### **2.1 Tipos de conexiones de las celdas fotovoltaicas**

Como se ha descrito anteriormente la celda solar es el componente básico de un panel fotovoltaico que en forma individual tienen un valor de voltaje de 0,5 voltios y una corriente de 2 amperios aproximadamente.

Para que una placa fotovoltaica tenga una potencia suficiente para ser utilizable, dichas celdas se las conecta en serie y en circuitos paralelos entre sí, para formar unidades más grandes llamadas módulos. Así se aumenta la corriente y el voltaje. Un módulo solar contiene aproximadamente entre 20 y 40 células solares para voltajes de trabajo típicas de 6, 12 y 24 voltios.

Se debe tomar ciertas precauciones eléctricas en la construcción como por ejemplo: que si alguna celda deja de funcionar, esta no provoque un fallo de todo un montaje o que si la temperatura de un módulo es alta no afecte totalmente al panel solar [16], [39].

### 2.3.1 Conexión en serie

La conexión serie consiste en conectar el terminal positivo de una celda con el terminal negativo del siguiente y así sucesivamente.

Al estar en serie, todas las celdas tienen la misma intensidad de corriente, pero el voltaje en los terminales del conjunto es la suma de todas las células, ver figura 2.18. Si existe una falla en una celda el grupo deja de funcionar.

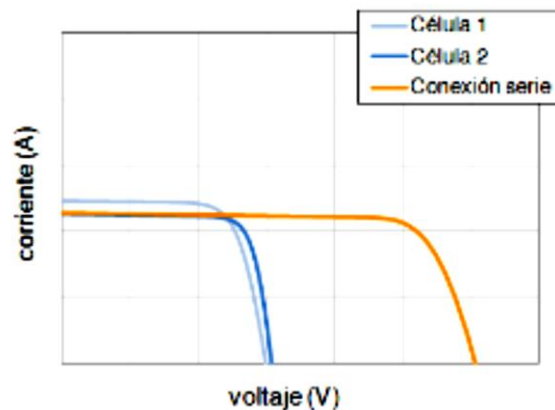


Figura 2.18. Conexión serie de Células Solares

Fuente: J. L. Angulano Pantoja, "Impacto de la temperatura de los módulos en la eficiencia de un sistema fotovoltaico conectado a la red.," Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, 2012.

### 2.3.2 Conexión en paralelo

La conexión en paralelo consiste en conectar tanto los terminales positivos y los terminales negativos entre sí de las celdas agrupadas. El voltaje es la misma para todas las celdas y la corriente del conjunto es la suma de las corrientes individuales de cada celda solar, ver figura 2.19. Si existe una falla en una celda el grupo sigue funcionando, pero se reduce la potencia del módulo.

Las conexiones se lo realizan mediante las cintas conductoras que tienen cada una de las celdas. En el caso de una conexión serie o paralelo con el mismo número de celdas, la potencia es la misma, lo que varía es el valor de voltaje y corriente del módulo [18].

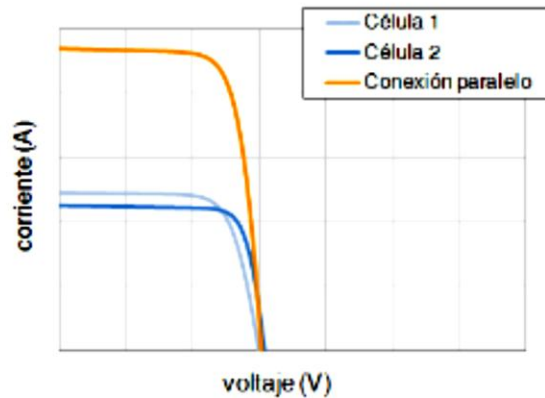


Figura 2.19. Conexión paralelo de Células Solares

Fuente: M.J.L. Angulano Pantoja, "Impacto de la temperatura de los módulos en la eficiencia de un sistema fotovoltaico conectado a la red.," Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, 2012.

### 2.2.3 Celda de telurio de cadmio/sulfuro de cadmio

La primera celda de telurio de cadmio fue desarrollada por Kodak en 1982 con una eficiencia mayor al 10 por ciento, en la actualidad se ha alcanzado eficiencias del 15.8 por ciento por la Universidad del Sur de Florida, lo que indica que este tipo de celdas monocristalinas se las considera de alta eficiencia [18].

Estas celdas se fabrican utilizando diversas técnicas de deposición de materiales, iguales a las de silicio amorfo con lo que su costo es muy económico. Su gran desventaja es que el cadmio no es correctamente manipulado es tóxico, con lo que puede causar problemas medioambientales [16].

### 2.2.4 Celda de Arseniuro de Galio

Tienen una configuración y una elevada movilidad de los electrones igual al cristal de silicio con un espesor de entre 1 a 10 $\mu$ m. Las células de multiunión de arseniuro trabajan mejor a altas temperaturas, son utilizadas en aplicaciones espaciales como satélites, vehículos espaciales, por su alto rendimiento del 30 por ciento, son muy costosas de fabricar por la escases de estos elementos e igual que la anterior el arseniuro de galio es toxico para el medioambiente [16], [24].

## 2.2 Factores de planta en sistemas fotovoltaicos

El factor de planta llamado también de capacidad o de carga, es un valor adimensional que ayuda a medir la producción de la planta de generación eléctrica. Dicho valor no alcanza el 100 por ciento y de hecho es muy bajo en sistemas de generación no



convencionales como son los paneles fotovoltaicos, debido a la irregularidad que tienen en la producción de energía discontinua (un sistema de generación fotovoltaico no genera energía en las noches) los cuales tienen un factor de planta de entre 10 por ciento - 15 por ciento – 20 por ciento, a diferencia de las fuentes de energía convencionales (plantas de generación nuclear o de carbón) las cuales producen energía de forma permanente (factor de planta en central nuclear 60 por ciento – 98 por ciento). El factor de planta compara su producción real, durante un período dado con la cantidad que se habría producido si hubiese funcionado a plena capacidad en el mismo tiempo, mediante (2.12) [38], [40], [41]:

$$\text{Factor de capacidad} = \frac{\text{produccion real}}{\text{produccion teorica}} * 100\% \quad (2.12)$$

Por ejemplo, un sistema fotovoltaico de 5kw teóricamente podría generar en un año 43.800 KWh. Si la producción real de dicho sistema en un año es de 30.000 KWh. Entonces se divide la salida real con la salida teórica máxima (30.000 KWh/43800 KWh), el factor de capacidad para ese período sería de 0.685 (el 68,5 por ciento) [38]. La potencia de salida continua generada por un sistema fotovoltaico depende linealmente de la irradiación solar, excepto cuando el rango irradiación es bajo. Sin embargo, la eficiencia de conversión del generador fotovoltaico no depende en gran medida de la irradiación, sino de la temperatura de superficie de los módulos y paneles fotovoltaicos [42].

Las causas que afectan el factor de planta son debido a lo siguiente [41]:

- Operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo.
- La ausencia de demanda de electricidad que obliga a los administradores de red a disminuir o parar la producción en sus unidades.
- La discontinuidad del recurso solar en el caso de una planta fotovoltaica a la duración del día y a las condiciones climatológicas del lugar.
- El costo del kwh generado, en especial en sistemas de generación basados en los precios ofertados en el mercado mayorista.

## CAPÍTULO III

### EFICIENCIA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

El recurso solar, se lo encuentra en todo el planeta por lo que la conversión fotovoltaica es la forma más acertada en aprovechamiento solar, cuya consigna se centra en permitir la máxima transferencia de energía desde el generador hacia la carga. La eficiencia no solo se centra en el tipo de tecnología que está construido el panel fotovoltaico (monocristalino y/o policristalino) o en el diseño de un sistema de rastreo solar para alcanzar el punto de máximo de potencia, sino también en las características técnicas en cada uno de los componentes que conforman un sistema de generación fotovoltaica, sea este aislado o conectado a una red de distribución eléctrica, y para esto se ha utilizado sus modelos matemáticos como herramientas de cálculo para cada caso.

#### 3.1 Eficiencia en los componentes de un sistema fotovoltaico

La eficiencia ha sido tema de estudio en países quienes utilizan los recursos renovables como fuentes de generación de energía, con el fin de reducir las pérdidas eléctricas del sistema, mejorar el rendimiento de los equipos y el incrementar la potencia de generación entregada a la carga. Para ello se analiza la corriente y voltaje en cada componente del sistema fotovoltaico. El termino eficiencia abarca varias interpretaciones, en general es la relación entre el producto o resultado generado y la cantidad de un determinado insumo utilizado en su generación.

##### 3.1.1 Eficiencia en el panel fotovoltaico

La eficiencia de un panel fotovoltaico depende de factores externos como es la temperatura, el tipo de tecnología fabricado entre otros, descritos en el capítulo anterior. Quienes generan pérdidas eléctricas modificando las características eléctricas de las celdas fotovoltaicas. La eficiencia aumenta linealmente con el nivel de radiación solar y el tamaño de la celda o panel, sin embargo, disminuye linealmente con la temperatura de la celda [36].

La radiación solar que recae sobre la superficie terrestre tiene una energía aproximadamente de  $100 \text{ MWh/cm}^2$ . En la tabla 3.1 se aprecia un valor típico de la eficiencia de la conversión que es del 15 por ciento, Por lo tanto, una celda solar puede proporcionar unos  $15 \text{ MWh/cm}^2$  de energía eléctrica [43].

La eficiencia de las celdas solares es determinante para reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos, ya que su construcción es la más costosa de todo el sistema.

*Tabla 3.1: Tecnologías importantes de celdas solares*

*Fuente: M. S. Ing, C. Orbezo, and I. R. Arivilca, "Energía Solar Fotovoltaica," Green Energy Consult. y Serv. SRL, p. 49, 2010.*

<b>Tecnología</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Característica</b>	<b>Eficiencia de celdas en laboratorio (%)</b>	<b>Eficiencia típica en módulos comerciales (%)</b>
Silicio monocristalino	sc-Si	Tipo oblea	24	13 – 15
Silicio policristalino	mc-Si	Tipo oblea	19	12 – 14
Películas de silicio cristalino sobre cerámica	f-Si	Tipo oblea	17	(8 – 11)
Silicio amorfo (incluye tandernms silicio-germanio)	a-Si	Película delgada	13	6 – 9
Diseleniuro de cobre-indio / galio	CIGS	Película delgada	18	(8 – 11)
Telurio de cadmio	CdTe	Película delgada	18	(7 – 10)

### **3.1.2 Eficiencia en el sistema de acumulación**

Existen varios tipos de baterías en el mercado, pero la de mayor utilización son las de plomo-ácido, las cuales se acoplan muy bien a los sistema fotovoltaicos para almacenar la energía eléctrica generada durante las horas de radiación para posteriormente utilizarla en los períodos de baja o nula radiación solar.

El ciclado se refiere a la carga-descarga de la batería en el día y en la noche respectivamente. El ciclo estacional está asociado a periodos de baja incidencia de radiación. Ambos ciclos junto con otros parámetros de operación como es la temperatura ambiente, la corriente, inciden sobre la vida útil y el rendimiento de la batería. También la temperatura del electrolito influye en la capacidad de almacenamiento y la eficiencia del proceso de carga y descarga de la batería, ver tabla 3.2, Donde a baja temperatura retrasa la reacción química, produciendo un aumento brusco de la resistencia interna de la batería y como consecuencia una caída del voltaje elevado [44].

La multiplicación de la eficiencia de carga y el de descarga nos da la eficiencia total de la batería. Ambos valores varían con la temperatura del electrolito y el estado de carga de la batería, debido a la resistencia interna que genera estas pérdidas [45].

Tabla 3.2: Variación de la capacidad con la temperatura

Fuente: H. Díaz Narváez and F. Díez Cardona, "Análisis, modelado, simulación y validación de un sistema de Generación de energía solar autónomo," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, 2007.

Temperatura (°C)	Capacidad (%)	Eficiencia
25	100	1
16	90	0.9
4	77	0.77
-7	63	0.63
-18	49	0.49

### 3.1.3 Eficiencia en el regulador

Como se dijo anteriormente la función principal del regulador de carga en un sistema fotovoltaico es el de realizar un proceso óptimo de carga de la batería, evitando así la sobrecarga y la sobre descarga, aumentando el tiempo de vida útil de la batería. En términos generales, las características eléctricas que definen un regulador son la tensión nominal, la intensidad máxima de trabajo, sobrecarga admisible y el autoconsumo. Los cuales deben ser configurados específicamente en función del tipo de batería, aplicación y de las condiciones climáticas. Existen dos tipos de reguladores de carga: los reguladores PWM y los reguladores MPPT. La diferencia es la pérdida de rendimiento, es decir un regulador PWM va a extraer menos energía de un campo fotovoltaico que un regulador MPPT, por lo cual se necesitan más módulos fotovoltaicos para sacar la misma energía [46].

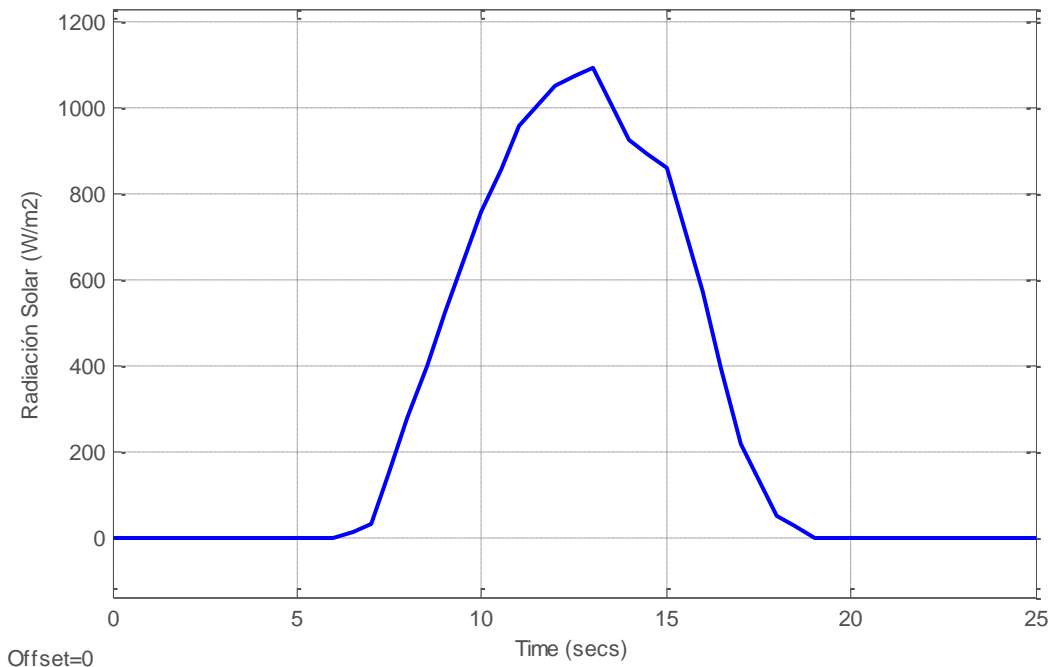
### 3.1.4 Eficiencia en el inversor

La eficiencia en el inversor es un valor que nos indica cuánta energía continua (potencia de entrada) se convierte en alterna (potencia de salida) las características eléctricas depende del fabricante. En general se consideran dos tipos de pérdidas eléctricas en estos equipos, las dependientes de la potencia de entrada, causadas por la conmutación de los interruptores de potencia, pérdidas en las líneas y las de tipo independientes, producidas por el mismo inversor que siempre consumirá por el funcionamiento de sus circuitos. Ambos tipos de pérdidas conforman la curva característica de la eficiencia de un inversor Donde se comprueba que la eficiencia del inversor es directamente proporcional a la potencia del sistema, es decir, a mayor potencia que se consuma en AC, mayor será la eficiencia del inversor y esta varía con la potencia de entrada con un rendimiento energético actual de los inversores del 93 por ciento y 95 por ciento [47].

### 3.2 Análisis matemático de cada componente del sistema

La representación de los componentes de un sistema fotovoltaico mediante modelos matemáticos, permite predecir el comportamiento del sistema modelado ante distintas situaciones de operación y mejorar de esta manera resultados que hubieran llevado mucho tiempo de experimentación junto con elevados costos.

Para simular dichos modelos nos hemos valido de los datos proporcionados por la Secretaria del Ambiente en su página web [48] ver anexo 1, donde se puede encontrar los valores de la radiación solar de un día y en un sector determinado de la ciudad de Quito, como se aprecia en la figura 3.1.



*Figura 3.1 Curva característica de la Radiación Solar del día 16/07/2014 Sector Cotocollao.  
Fuente: Autor*

En la figura 3.1 se aprecia como varía la cantidad de radiación solar en el día, siendo los valores altos aproximadamente desde las 10h00 am de la mañana hasta las 15h00 pm y el resto del día una variación con tendencia a cero (puesta del sol).

#### 3.2.1 Modelo matemático del panel fotovoltaico

Para simulación y comprobación del modelo matemático se ha tomado como datos de referencia los valores de las características técnicas del panel fotovoltaico, ver tabla 3.3, existente en la Universidad Politécnica Salesiana, anexo 2 [45].

Tabla 3.3: Características Eléctricas del fabricante Kyocera Solar.

Fuente: J. A. ESPAÑA SALAZAR and E. F. VILLARRUEL JÁCOME, "Diseño de un sistema de energía Fotovoltaica de emergencia para La iluminación en laboratorios," Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2011.

Características Eléctricas	
Potencia máxima ( $\pm 10\%$ )	87.0 W.
Corriente en el punto de máx. pote.	5.02 A.
Tensión en el punto de máx. poten.	17.4 V.
Corriente de Cortocircuito	5.34 A.
Tensión de circuito abierto	21.7 V.
Numero de celdas	72 de 5"
Temperatura de célula	25 °C.
Espectro AM	1.5

El modelo matemático del panel fotovoltaico (3.1), parte de la ecuación que define el comportamiento de una célula solar y sus parámetros eléctricos (2.5), básicamente en función de la corriente de corto circuito (2.6) y del voltaje de circuito abierto (2.7) [49].

$$I = Np \left\{ I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{m \sigma_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right\} \quad (3.1)$$

Dónde:

$I$  = Intensidad de corriente de salida (A).

$I_L$  = Intensidad de corriente fotogenerada (A).

$I_0$  = Intensidad de corriente de oscuridad o inversa de saturación del diodo (A).

$T$  = Temperatura (K).

$A$  = Factor de idealidad, equivale a 1,6.

$\sigma_B$  = Constante de Boltzmann equivalente a  $1.381 \times 10^{-23}$  (J/K).

$q$  = Carga del electrón equivale a  $1.602 \times 10^{-19}$  (C).

$R_s$  = Resistencia serie ( $\Omega$ ).

$R_p$  = Resistencia paralelo ( $\Omega$ ).

$m$  = Parámetro adimensional que vale entre 0 y 1.

$V$  = Voltaje de salida (V).

$N_s$  = número de celdas en serie.

$N_p$  = número de celdas en paralelo.

El valor de la resistencia en paralelo puede ser debido a fugas de corriente por la superficie de los bordes de la celda, por caminos de difusión a lo largo de dislocaciones. Mientras que el valor de la resistencia en serie puede ser a causa de la resistencia de los contactos metálicos con el semiconductor, por la resistencia ofrecida por las capas semiconductoras de la celda, la resistencia de la rejilla o de la metalización frontal. Considerando que el valor de la exponencial es notablemente superior a 1 en todas las condiciones de operación, que la contribución de la resistencia paralelo es despreciable y que la corriente de cortocircuito es equivalente a la corriente fotogenerada, obtenemos la siguiente expresión simplificada (3.2) [50].

$$I = Np \left\{ I_L - I_O \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{N_S A \sigma_B T} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.2)$$

Para la corriente de saturación inversa del diodo se calcula a través de una razón entre la temperatura actual y la temperatura de referencia mediante (3.3) [51].

$$I_O = I_{Oref} \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \left( \frac{q \mathcal{E}_g}{\sigma_B B} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.3)$$

Dónde:

$I_O$  = Corriente inversa de saturación (A).

$I_{Oref}$  = Corriente inversa de saturación en condiciones de referencia (A).

$B$  = Coeficiente de calidad del diodo, equivalente a 2 para el silicio cristalino y menor de 2 para el silicio amorfo.

$E_g$  = Energía salto de banda GAP (eV), equivalente a 1.12 V para el silicio cristalino y 1.35 V para el silicio amorfo.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia o nominal equivale a 298 (K).

Para encontrar la intensidad de corriente fotogenerada se aplica (3.4) la que depende de la irradiación y la temperatura [52].

$$I_L = [I_{SC} + K_i(T - 298)] \frac{\Phi}{1000} \quad (3.4)$$

Dónde:

$I_L$  = Intensidad de corriente fotogenerada (A).

$I_{SC}$  = Intensidad de corriente corto circuito (A).

$K_i$  = Constante equivale a 0,0017 (A/°C).

$\Phi$  = Irradiación incidente actual (W/m<sup>2</sup>).

$T$  = Temperatura de la celda (K).

Ingresadas las ecuaciones en el programa Matlab en la plataforma de Simulink obtenemos el bloque con subsistemas conformando el modelo ver figura 3.2.

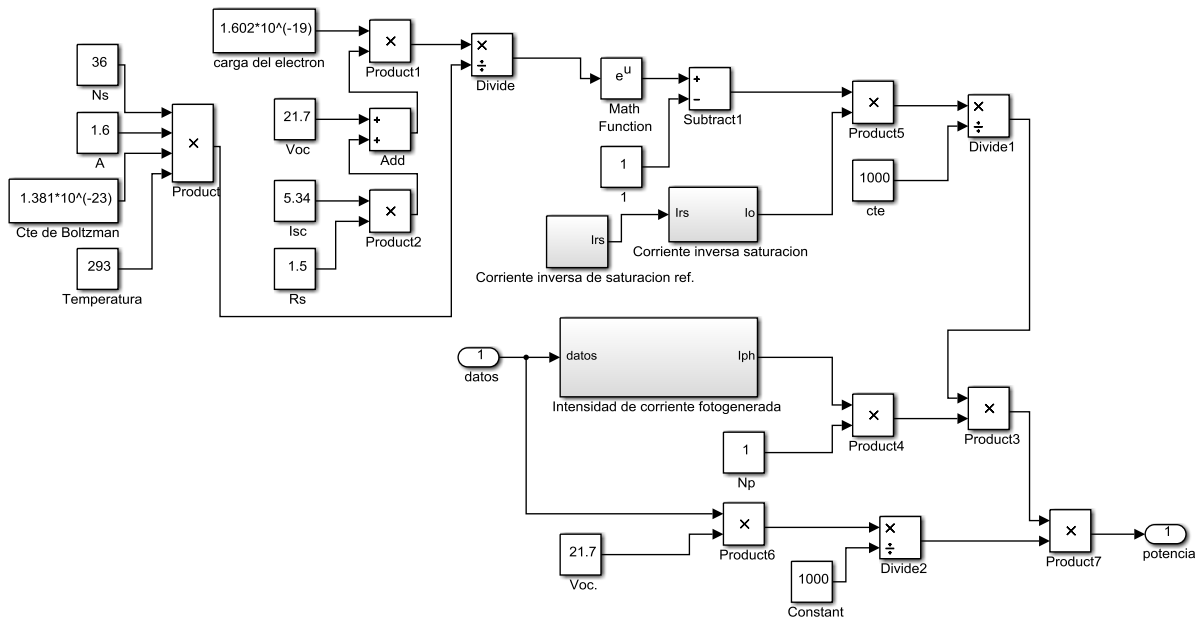


Figura 3.2 Representación esquemática del panel fotovoltaico  
Fuente: Autor

En la figura 3.3 se observa la curva obtenida de la potencia del panel fotovoltaico vs tiempo en el día, donde el valor de la potencia que entrega depende directamente de la cantidad de radiación solar que emite el Sol en el día, siendo los valores altos entre las horas 10h00 am y las 15h00 pm, es decir, en las horas pico es donde mayor potencia genera el panel fotovoltaico.



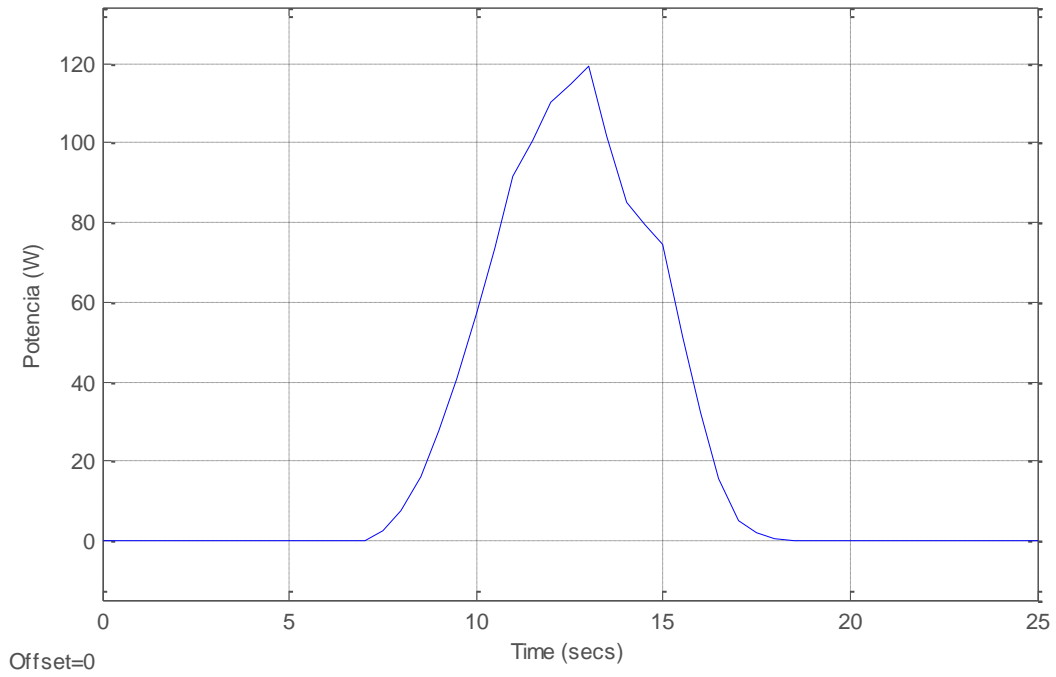


Figura 3.3 Curva de la Potencia de salida del panel fotovoltaico  
Fuente: Autor

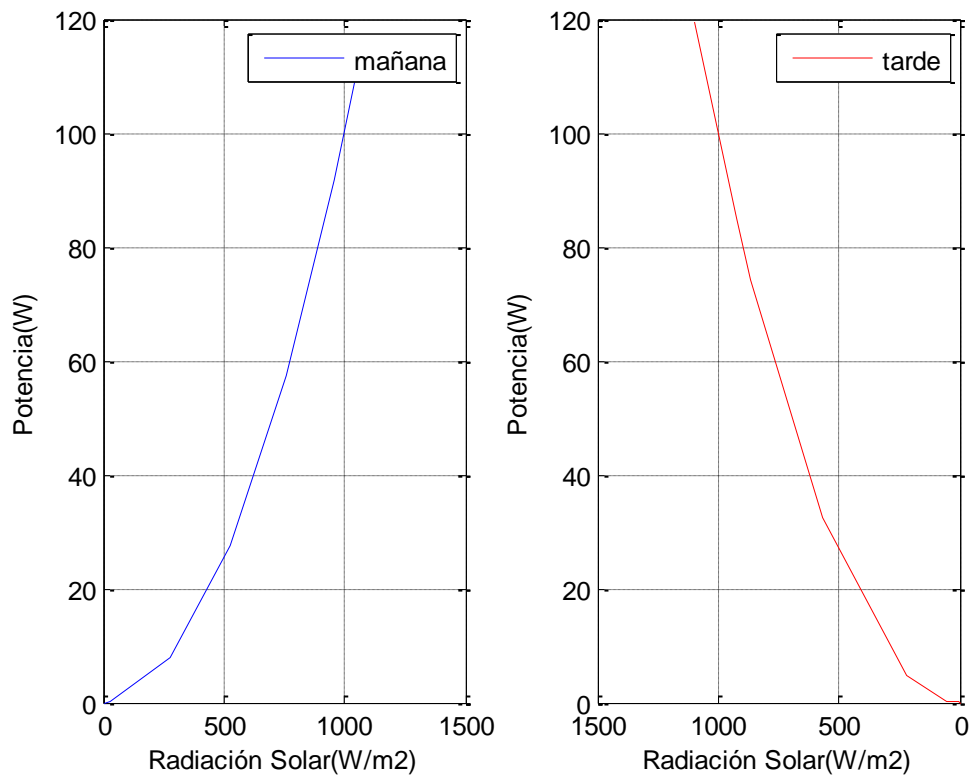


Figura 3.4 Curva característica Potencia vs Radiación Solar del panel fotovoltaico  
Fuente: Autor

En la figura 3.4 se observa la curva obtenida de la potencia de salida del panel fotovoltaico vs la radiación solar, donde la potencia del panel fotovoltaico crece (color azul) al mismo tiempo como aumenta la Radiación Solar que es en la mañana y decrece la potencia (color rojo) si la Radiación Solar también disminuye como es en horas de la tarde.

### 3.2.4 Modelo matemático del sistema de acumulación

La complejidad que tiene los acumuladores electroquímicos hace difícil desarrollar un modelo general. Sin embargo el diagrama eléctrico ver figura 3.5, el cual la batería se describe por sólo dos elementos una fuente de tensión y la resistencia interna, cuyas características dependerá de un conjunto de parámetros como el estado de carga (SOC), temperatura, intensidad de corriente, . que varía según la potencia de la batería [53].

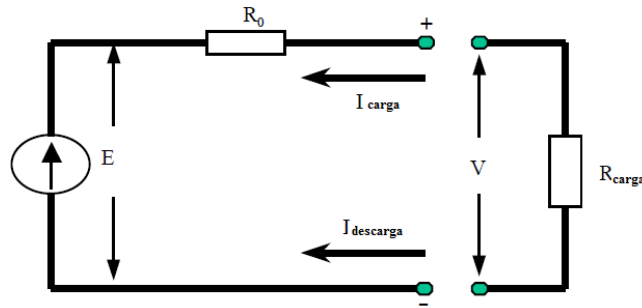


Figura 3.5. Circuito eléctrico equivalente de la batería

Fuente: A. D. Hansen, P. Sørensen, and L. H. Hansen, *Models for a Stand-Alone PV System*, vol. 1219, no. December. 2000, p. 80..

Las baterías de plomo-ácido son las más utilizadas en los sistemas fotovoltaicos por su ciclo profundo de descarga. Aunque se puede tomar en cuenta todos los modos de funcionamiento, aquí, solo consideraremos el funcionamiento de carga y descarga de la batería. Para el modo de carga se tiene (3.5) [49].

$$V_{carga} = (2 + 0.0148\beta) * \eta_s \quad (3.5)$$

$$R_o = R_{carga} = \frac{0.758 + \frac{0.1390}{(1.06 - \beta)}}{SOC_m} \quad (3.6)$$

$$V_{bat} = V_{carga} + i_{bat}R_{carga} \quad (3.7)$$

Para el modo descarga se tiene (3.8):

$$V_{descarga} = (1.926 + 0.124\beta) * \eta_S \quad (3.8)$$

$$R_o = R_{descarga} = \frac{0.19 + \frac{0.1037}{(\beta - 0,14)}}{SOC_m} \quad (3.9)$$

$$V_{bat} = V_{descarga} + i_{bat}R_{descarga} \quad (3.10)$$

En ambos casos:

$$\beta = \frac{SOC}{SOC_m} \quad (3.11)$$

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{C}\right) \quad (3.12)$$

$$\eta_{Bat} = \eta_{carga} * \eta_{descarga} \quad (3.13)$$

Dónde:

$SOC_m$  = Energía máxima de la batería (Wh).

$\eta_S$  = Numero de celdas en serie de 2V.

$R_o$  = Resistencia interna de la batería, pérdidas ( $\Omega$ ).

$Q$  = Capacidad o carga real de la batería (Ah).

$i$  = Intensidad de corriente de la batería (A).

$\eta_{Bat}$  = Eficiencia de la batería.

$\eta_{carga}$  = Valor de la eficiencia de carga de la batería.

$\eta_{descarga}$  = Valor de la eficiencia de descarga de la batería.

En la figura 3.6 se aprecia el modelo matemático de la batería desarrollada en la plataforma Simulink de Matlab, en forma de subsistemas o bloques, que para interés de estudio se ha valorado la potencia de entrada y de salida del componente fotovoltaico.

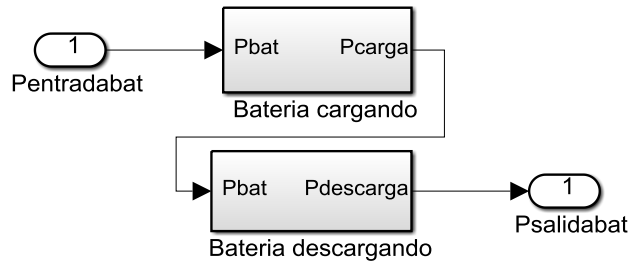


Figura 3.6. Representación esquemática de la batería  
Fuente: Autor

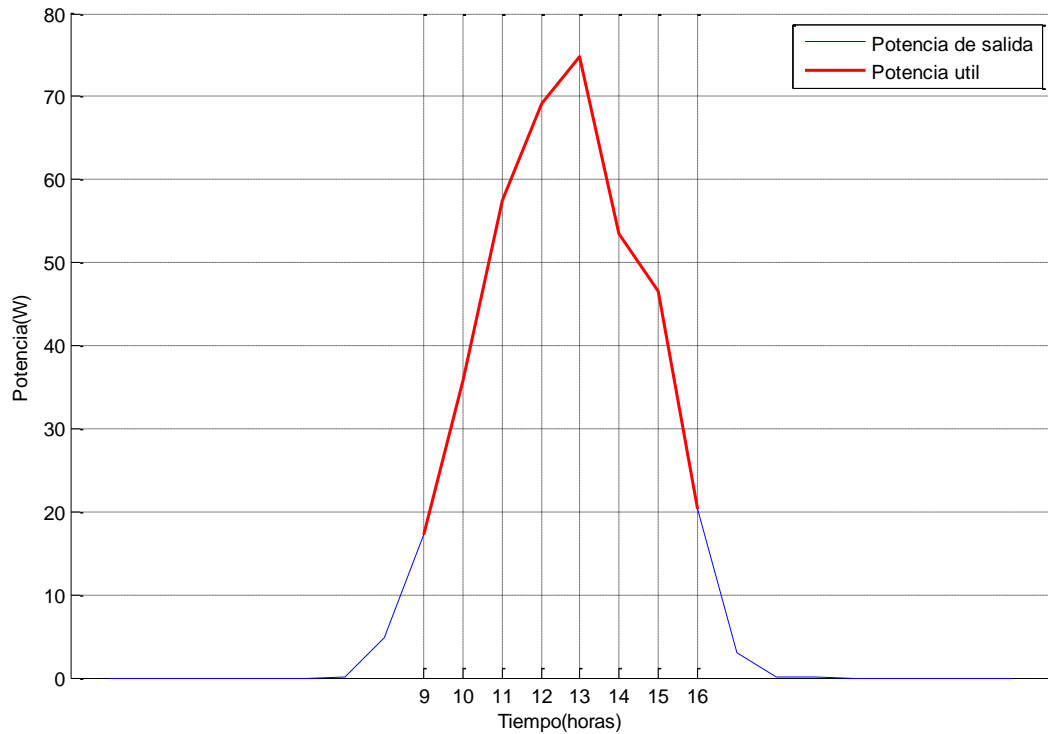


Figura 3.7. Curva de la Potencia de salida de la Batería  
Fuente: Autor

En la figura 3.7 se observa la curva obtenida de la potencia de salida de la batería vs el tiempo de un día completo. Dicha curva tiene la misma trayectoria de la Radiación Solar color azul, pero con diferentes valores, obviamente menores a los del panel fotovoltaico. El segmento de la curva de color rojo nos indica el área en que la batería se encuentra en estado óptimo de carga y descarga.

En la figura 3.8 se observa la curva obtenida de la potencia útil que entrega la batería vs la Radiación Solar de un día. En ambas gráficas se puede apreciar que la curva no inicia ni termina en cero, porque la batería tiene un rango de funcionamiento determinado por el regulador de carga, precisamente para evitar el desgaste de esta.

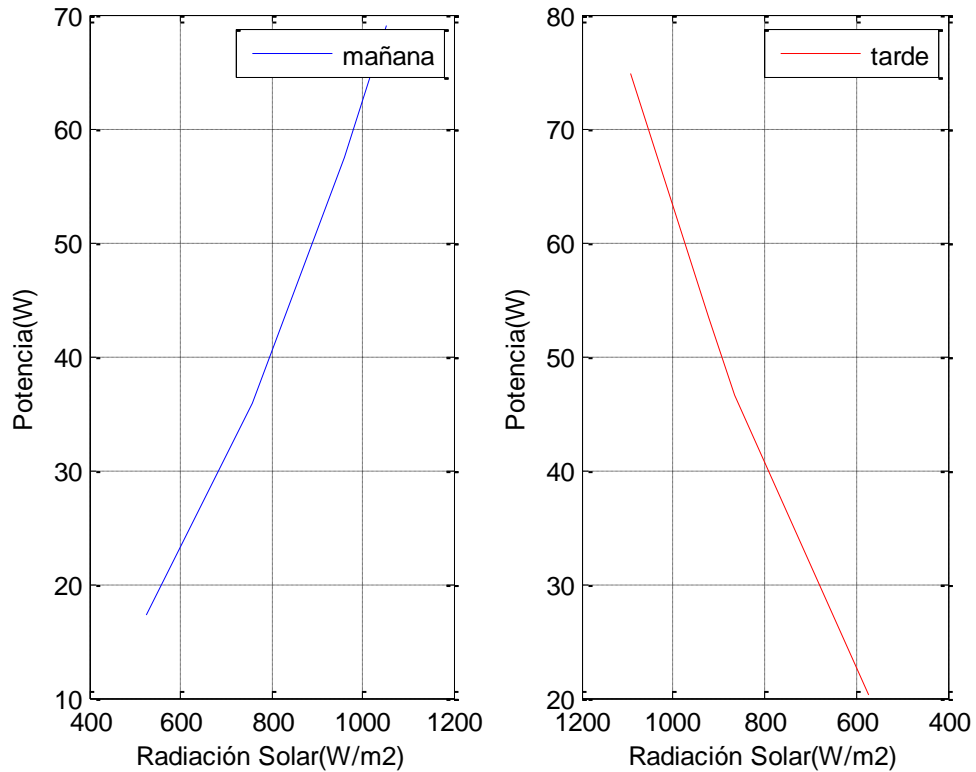


Figura 3.8 Curva característica de la Potencia útil de la batería vs Radiación Solar diaria  
Fuente: Autor

### 3.2.2 Modelo matemático del regulador

Los reguladores de carga son equipos electrónicos, los cuales cumplen dos funciones: una es evitar que la batería se descargue a su mínimo por la carga y la otra es evitar que se recarguen más de lo necesario por medio del panel fotovoltaico, ver figura 3.9 [54].

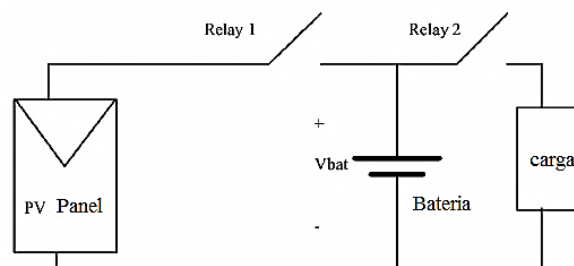


Figura 3.9. Circuito eléctrico equivalente del regulador de carga en serie  
Fuente: S. S. Castanet Luis, *Modeling Photovoltaic Systems Using PSipice*. Barcelona: John Wiley & Sons, Inc., 2002, p. 358.

El regulador se modeló como dos interruptores gobernados por una lógica de desconexión de tal forma, que supone la desconexión del panel cuando la batería supere la tensión  $V_{m\acute{a}x}$  y la desconexión de la carga cuando el voltaje de la batería descienda por

debajo de  $V_{mín}$ .

$$relay_1 \left\{ \begin{array}{l} desconexión.....V_{bateria} \geq V_{panel} \\ conexión.....V_{bateria} \leq V_{panel} \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

$$relay_2 \left\{ \begin{array}{l} desconexión.....V_{bateria} \leq V_{c\ min} \\ conexión.....V_{bateria} \geq V_{c\ seg} \end{array} \right\} \quad (3.14)$$

Existen dos tipos de conexiones básicas: reguladores en paralelo o shunt y los reguladores en serie; este último es el más utilizado en los sistemas fotovoltaicos por sus características que permiten menores pérdidas en el circuito regulador en comparación con las pérdidas en la resistencia y transistor utilizado en la regulación paralela [49].

En la figura 3.10 se puede ilustrar el modelo de la batería desarrollado en Matlab. Cuando se trata de dimensionamiento, se recomienda que la corriente máxima de operación del regulador, sea como mínimo un 20 por ciento superior a la máxima corriente nominal del sistema [55].



Figura 3.10. Representación esquemática del regulador de carga  
Fuente: Autor

En la figura 3.11 se observa la curva obtenida de la potencia del regulador de carga vs el tiempo de un día completo. Dicha curva tiene la misma trayectoria de la Radiación Solar (color azul), pero con diferentes valores, obviamente con valores mayores al de la batería. Dicho valor que entrega el regulador de carga de la batería depende del valor del rendimiento de sí misma y de sus características propias del componente. El segmento de la curva de color rojo nos indica el tiempo de trabajo que el regulador permite hacia la batería se encuentre en estado de carga-descarga.

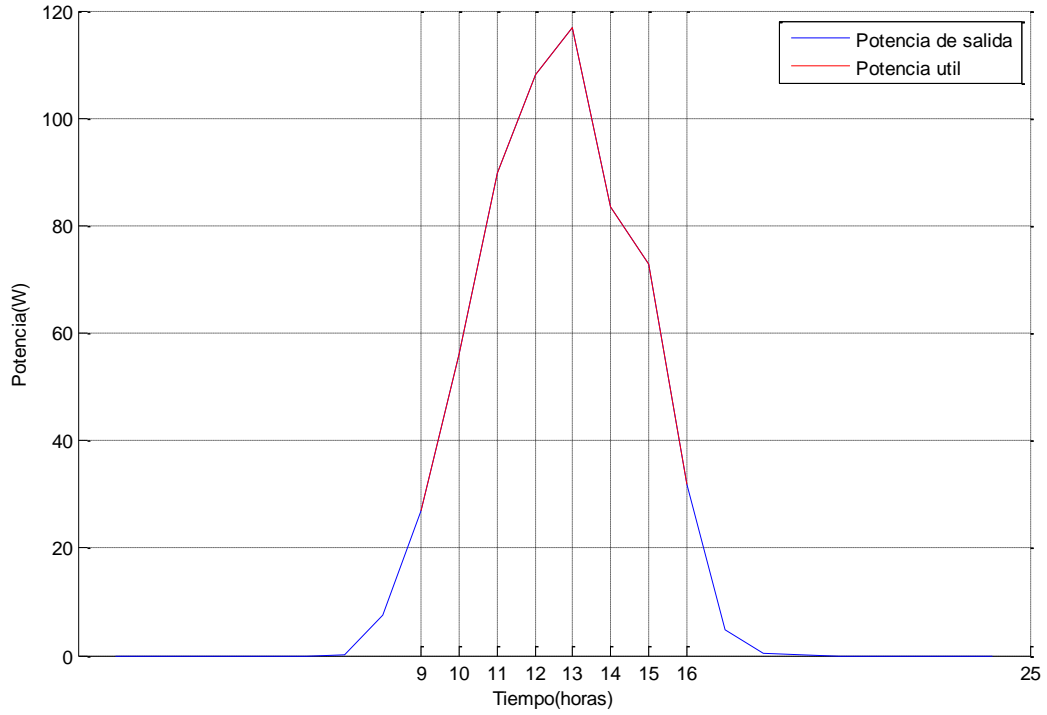


Figura 3.11. Curva de la Potencia de salida del regulador de carga en serie  
Fuente: Autor

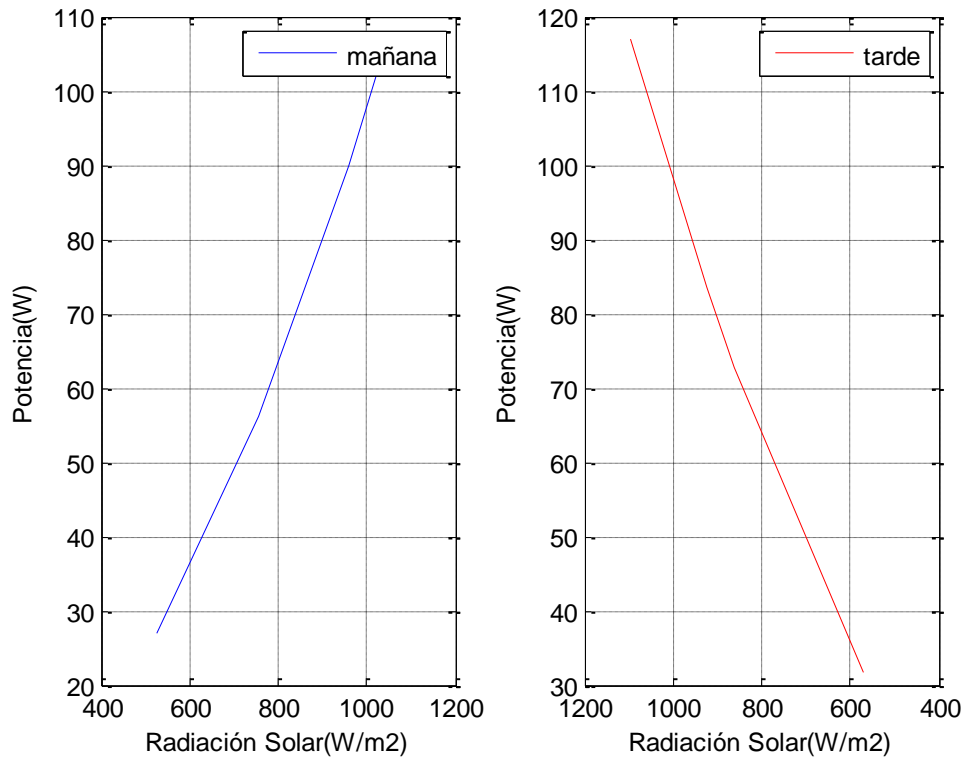


Figura 3.12. Curva característica de la Potencia del regulador de carga vs Radiación Solar  
Fuente: Autor

En la figura 3.12 se observa la curva obtenida de la Potencia útil que entrega el regulador de carga hacia la batería vs la Radiación Solar de un día determinado. En ambas gráficas se puede apreciar que la curva no inicia ni termina en cero, porque el regulador tiene un rango de operación para evitar que la batería trabaje en sobre carga y/o descarga.

En la tabla 3.4 se ilustra un ejemplo para la batería con una tensión nominal de 12 V, que muestra los voltajes de la batería deseados para relés de conmutación 1 y 2; en este caso la operación de ventana de voltaje de la batería está limitada por  $V_{max} = 13,9$  V y  $V_{min} = 11$  V. Ambos límites se determinan con valores proporcionados por el fabricante [49].

*Tabla 3.4: Estado de los interruptores*  
*Fuente: S. S. Castaner Luis, Modeling Photovoltaic Systems Using PSipice. Barcelona: John Wiley & Sons, Inc., 2002, p. 358.*

Relay 1 Bateria-PV panel		Relay 2 Bateria-carga	
Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado
$V_{bat} = 12.8V$	$V_{m\acute{a}x} = 13.9V$	$V_{min} = 11V$	$V_{bat} = 12V$

### 3.2.3 Modelo matemático del inversor

Los modelos matemáticos de los inversores, por lo general determinar la eficiencia de conversión utilizando diferentes parámetros asociados con las pérdidas térmicas y eléctricas resultantes del proceso de conversión. La eficiencia del punto de máxima potencia se define como la relación entre la potencia de entrada del inversor y la potencia que el inversor podría convertir si se opera idealmente en el punto máximo de potencia [56].

La eficiencia del inversor varía en función del nivel de carga. Así el valor es mayor si el nivel de carga que se conecta se encuentra cerca del valor nominal para el que fue diseñado, y disminuye cuando opera con poca carga o sobrecarga [45].

En general la función de eficiencia de conversión del inversor depende de la relación entre potencia de salida del inversor y su potencia nominal (3.15). Para desarrollar esta función existen constantes involucradas en dicha ecuación que depende de las características propias del inversor a utilizar y que pueden ser extraídas mediante ajuste de la curva de eficiencia del inversor que provee el fabricante [57], [58].

$$\eta_{MPPT} = \frac{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}} + \left( M_0 + M_1 \frac{P_{CC}}{P_{NOM}} \right)} \quad (3.15)$$



Dónde:

$\eta_{MPPT}$  = Eficiencia del seguidor del punto Máximo Potencia.

$P_{CC}$  = Potencia de entrada del inversor en corriente continua (W).

$P_{NOM}$  = Potencia nominal del inversor (W).

$M_0$  = Coeficiente equivale a 0,0039

$M_1$  = Coeficiente equivale a 0,0023

El rendimiento se evalúa como la relación entre la energía eléctrica en la entrada del inversor y la energía eléctrica que el inversor debería convertir si el mismo operase idealmente en el punto de máxima potencia, en la figura 3.13 se aprecia el modelamiento del inversor.

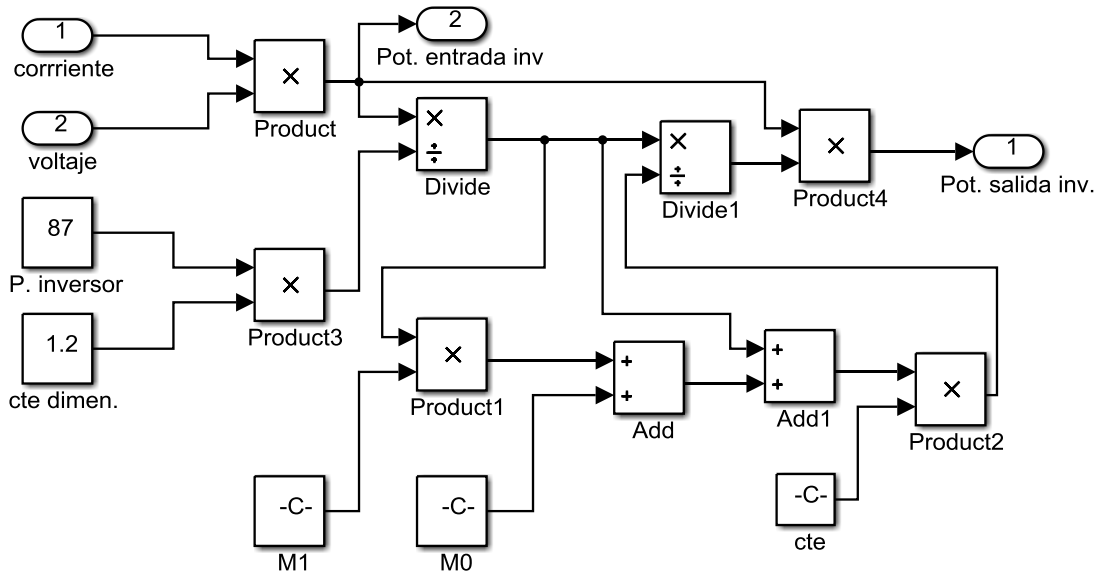


Figura 3.13. Representación esquemática del inversor  
Fuente: Autor

En la figura 3.14 se observa la curva obtenida de la potencia de salida del inversor vs el tiempo de un día. Dicha curva tiene la misma trayectoria de la Radiación Solar color azul, pero con diferentes valores, obviamente valores cercanos a la potencia de salida del panel fotovoltaico. El valor que entrega el inversor depende del valor del rendimiento de sí mismo y de sus características propias del componente. El segmento de la curva de color rojo nos indica que el inversor está operando a la potencia nominal del panel fotovoltaico.

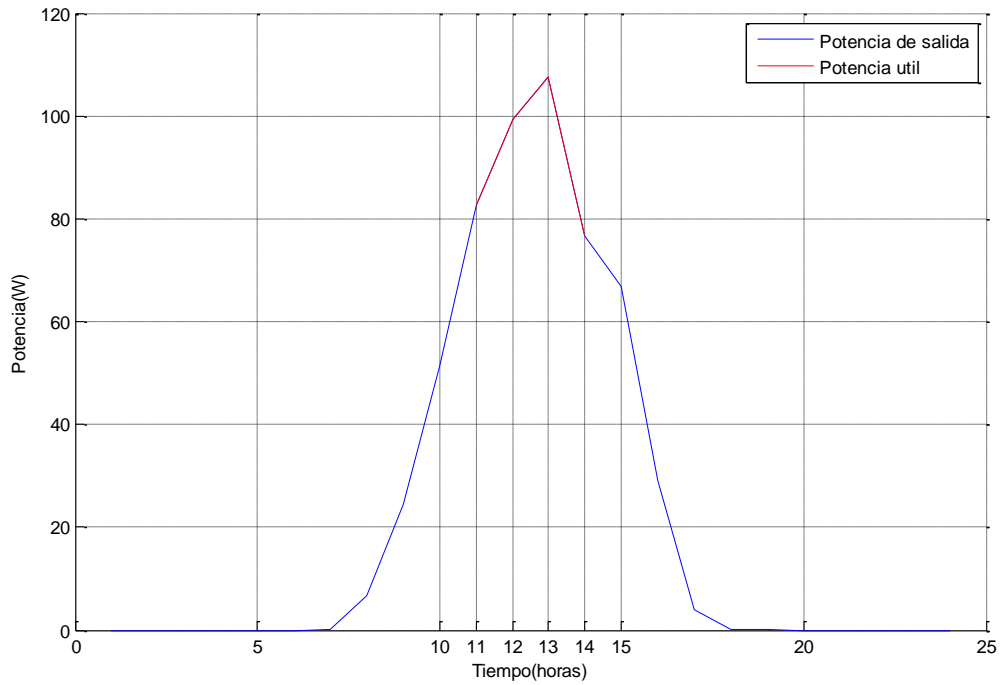


Figura 3.14 Curva característica de la Potencia de salida del inversor.  
Fuente: Autor

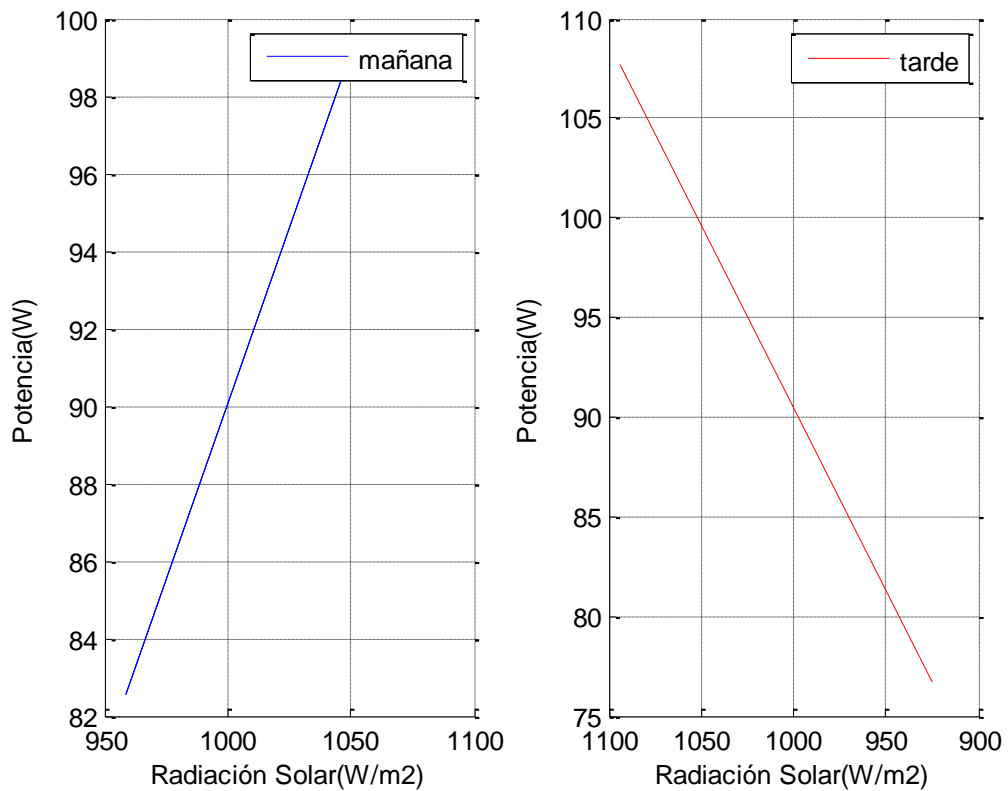


Figura 3.15 Curva característica de la Potencia de salida del inversor vs la Radiación Solar.  
Fuente: Autor

En la figura 3.15 se observan las curvas obtenidas de la potencia del inversor vs la radiación solar, Dónde el valor de la potencia que entrega el inversor es el valor de la potencia nominal del panel fotovoltaico. La eficiencia de conversión depende principalmente del nivel de carga del inversor. Sin embargo la tensión de entrada de CC también afecta a la eficiencia de la conversión de inversor.

### 3.3 Eficiencia en sistemas aislados

Para obtener la eficiencia del sistema aislado se ha simulado el panel fotovoltaico, el regulador de carga y el sistema de almacenamiento todos estos elementos acoplados en un solo bloque ver figura 3.16 con lo cual, obtenemos la potencia total de salida del sistema aislado.

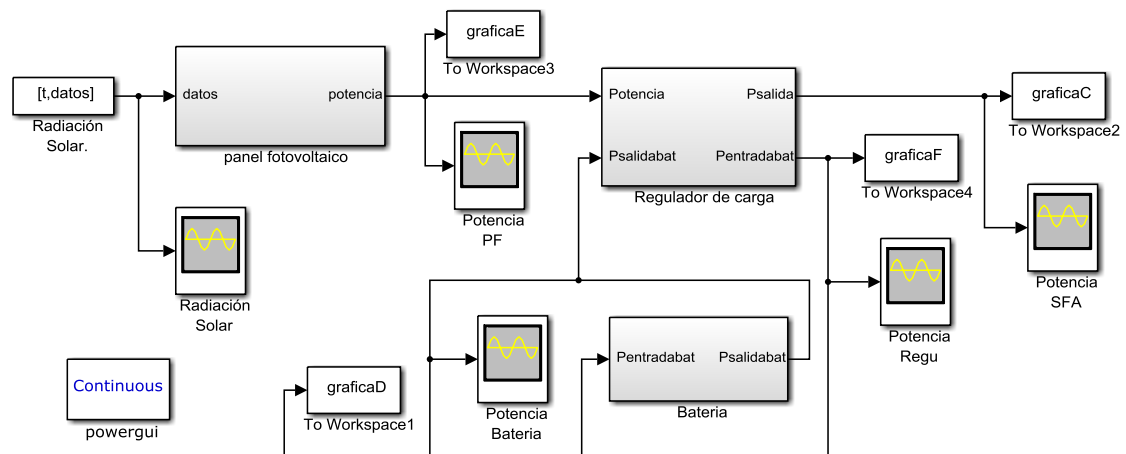


Figura 3.16. Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico Aislado  
Fuente: Autor

En la figura 3.17 se observan las tres curvas obtenidas que son la potencia vs tiempo y vs la radiación solar, donde el valor de la potencia de salida del sistema fotovoltaico aislado es menor al valor pico de la radiación solar debido a los distintos valores de rendimientos de cada componente en el sistema. La respuesta o cantidad de energía entregada por el panel dependerá directamente de la eficiencia del mismo, lo cual a su vez depende de la tecnología con que fue construido y de las condiciones climáticas propias de la zona.

Los colores oscuros de la grafica indican baja radiacion solar, mientras que los colores claros demuestran media y alta radiacion solar.

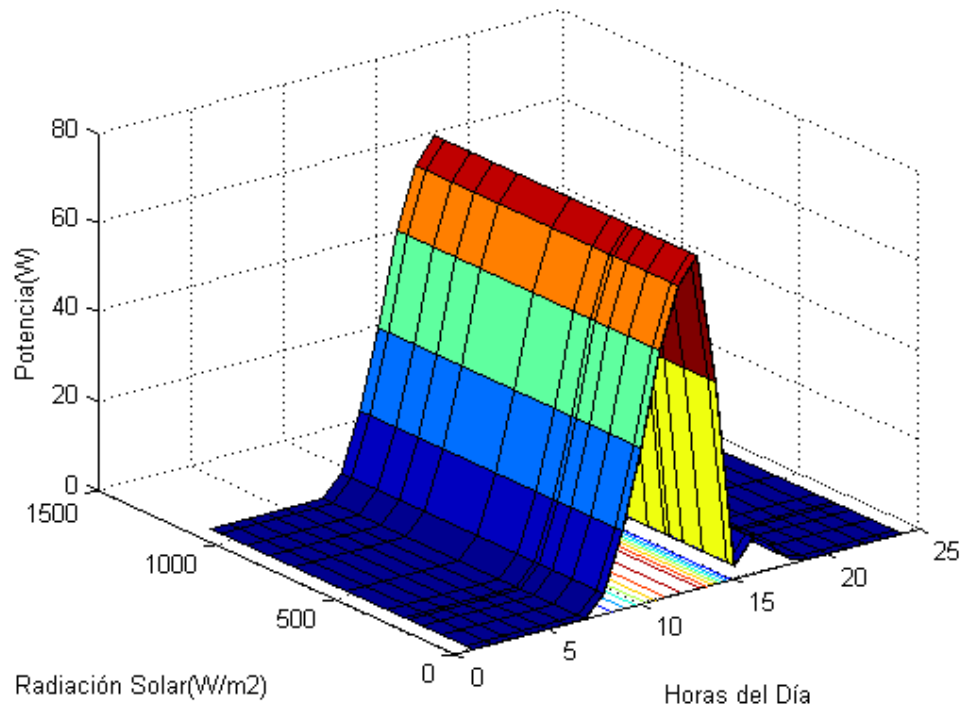


Figura 3.17. Curva de la Potencia de salida del Sistema Fotovoltaico Aislado vs la Radiación Solar en el día.

Fuente: Autor

### 3.4 Eficiencia en sistemas conectados a la red

En este caso se ha simulado en un solo bloque el panel fotovoltaico junto con el inversor para simular la forma del sistema conectado a la red, ver figura 3.18.

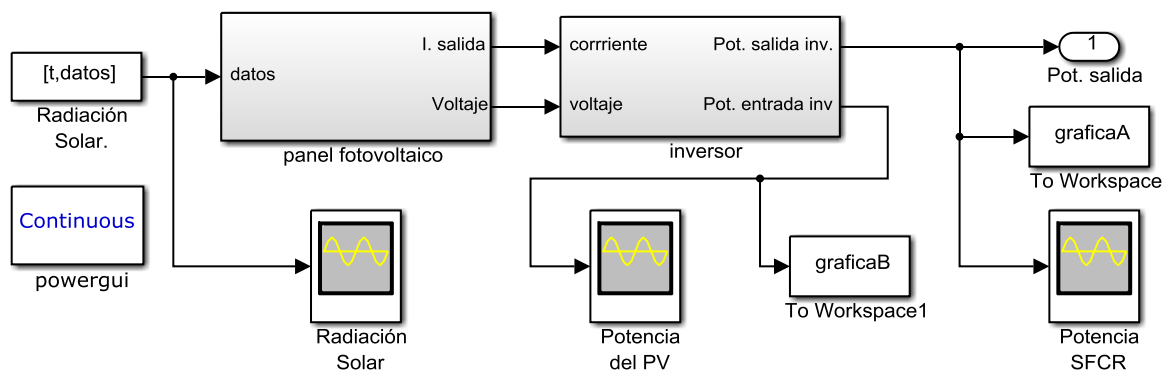
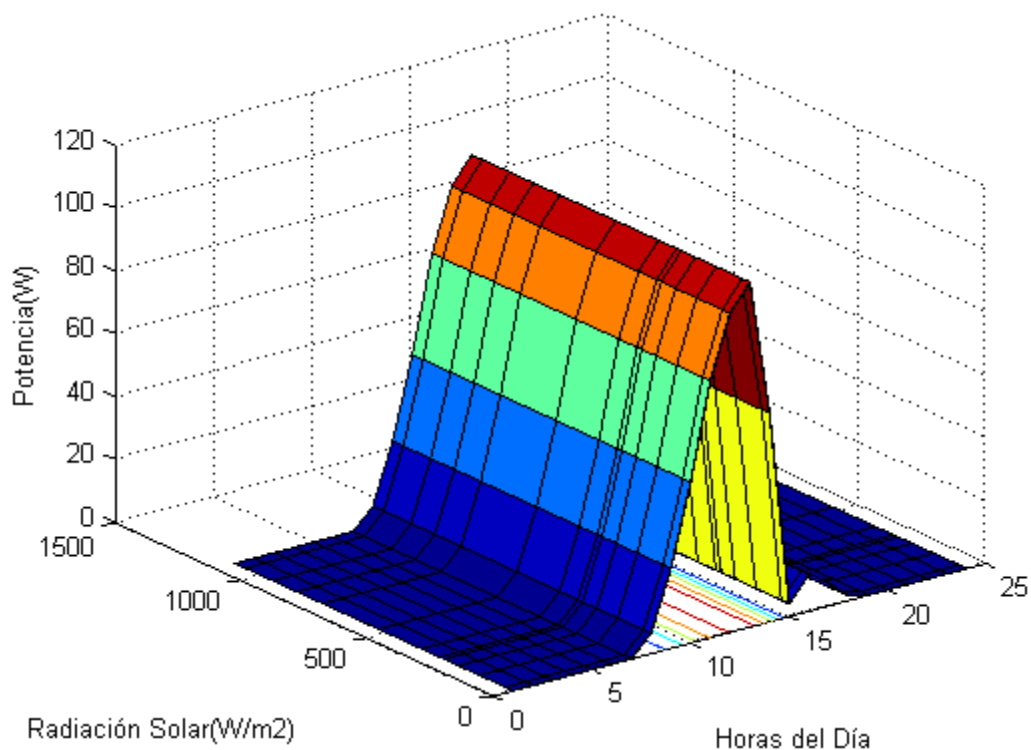


Figura 3.18. Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red

Fuente: Autor

En la figura 3.19 se observan las tres curvas obtenidas que son la potencia vs tiempo y vs la radiación solar de un día completo, donde el valor de la potencia de salida que entrega el sistema fotovoltaico conectado a la red, varía directamente con el valor de rendimiento de conversión del panel fotovoltaico ante la cantidad de radiación solar expuesto y del

rendimiento de conversión del inversor. Este valor de potencia de salida, es más alto que el del sistema asilado.



*Figura 3.19. Curva de la Potencia de salida del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red vs la radiación Solar en el día.  
Fuente: Autor*

Los colores oscuros de la grafica indican una baja radiacion solar, mientras que los colores claros demuestran media y alta radiacion solar.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO

Para el análisis financiero, hemos partido de un ejemplo realizado para un proyecto fotovoltaico residencial de 4,2 KW [59], a los cuales se ha actualizado los costos de inversión, tasas de interés actuales.

#### **4.1 Análisis de las pérdidas en una instalación fotovoltaica aislada y conectada a la red**

Como en otros tipos de generación de energía eléctrica, las pérdidas en sus procesos son factores determinantes para poder evaluar los rendimientos de los sistemas. Son varias las causas que producen las pérdidas eléctricas en los sistemas fotovoltaicos, siendo factores externos como propios de cada componente instalados, como son las pérdidas de energía de la batería, pérdidas por efecto joule, pérdidas del inversor CC/CA y en el transporte de energía hacia las cargas.

##### **4.1.1 Pérdidas en instalación fotovoltaica aislada**

La potencia de generación en el panel fotovoltaico se ve afectada directamente por la cantidad de energía solar que incide sobre la celda, dicha variación de la radiación solar es debido a condiciones de cielo nublado o soleado en el día [33].

Los factores espectrales como la orientación y la inclinación de los módulos solares afectan al rendimiento de conversión, ya que no siempre se puede obtener una radiación perpendicular sobre los paneles fotovoltaicos. Las pérdidas angulares se incrementan con el grado de suciedad en la superficie de los módulos fotovoltaicos [60].

La temperatura es un factor que afecta a la mayoría de los componentes del sistema fotovoltaico en mayor parte a los paneles solares y baterías, este último, requiere necesariamente ventilación adecuada para reducir las pérdidas. La potencia de los módulos está calculada para condiciones de temperatura de 20°C, pero en la realidad ésta es muy superior. Aproximadamente se pierde un 0,5 a 0,8 por ciento de potencia por cada grado por encima de los 20°C [34], [41].

Las caídas de voltaje en el cableado pueden ser muy importantes cuando son tramos largos con voltaje pequeños en CC. Las pérdidas por cableado en porcentaje suelen ser inferiores en plantas de gran potencia que en plantas de pequeña potencia. De acuerdo con

las especificaciones, el valor máximo admisible para la parte CC es 1,5 por ciento, siendo recomendable no superar el 0,5 por ciento [40].

#### 4.1.2 Pérdidas en instalación fotovoltaica conectada a la red

La conversión de la energía generada por un sistema fotovoltaico en CA conlleva factores de pérdida significativos, con toda seguridad en el orden de 10 por ciento en el mejor de los casos, llegando incluso a valores del orden del 30 por ciento. El auto consumo del inversor es la principal causa ya que este, está conectado continuamente (24 horas) al sistema fotovoltaico a más de toda la parte electrónica que requiere para dicha conversión de onda.

Las pérdidas por conducción son bajas por lo que pueden abarcar grandes distancias, debido a la forma de onda que tiene la corriente alterna (sinusoidal), permite una transmisión más eficiente de la energía no obstante no debe de pasar el 1 por ciento [40].

#### 4.2 Comparación de la eficiencia en los componentes

Los valores de potencia de salida de cada componente del sistema fotovoltaico presentan una disminución o pérdida de potencia en relación a la potencia que esta ingresa. En la tabla 4.1 se aprecia los valores de eficiencia calculados y otros obtenidos por las hojas técnicas del fabricante.

*Tabla 4.1: Eficiencia de los componentes del sistema fotovoltaico  
Fuente: Autor*

Componente	Eficiencia (%)
Panel Monocristalino	14
Panel Policristalino	11
Batería ácido-plomo	66
batería alcalina-níquel-cadmio	70
Batería de Gel	80
Regulador de Carga	95
Inversor	90
Conductores	95

Así el panel fotovoltaico luego de convertir la radiación solar en corriente y voltaje continuo por medio del efecto fotoeléctrico, presenta una eficiencia muy baja de conversión dependiendo del tipo de material fabricado, seguido se encuentra el sistema de

acumulación, el cual por las reacciones químicas convierte la energía química en energía eléctrica con una eficiencia baja. Por otra parte los conductores, el regulador y el inversor, presentan valores altos de eficiencia, es decir pocas pérdidas de potencia en su salida, con lo que no afecta en gran parte al sistema en general, ver figura 4.1.

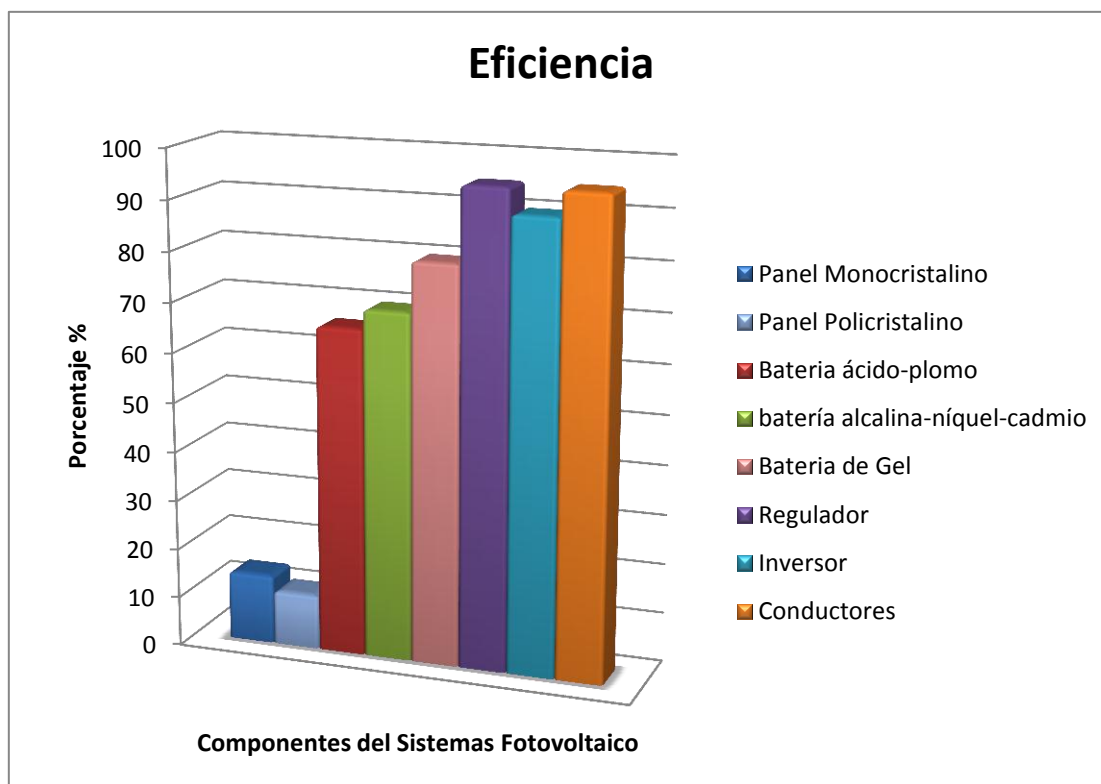


Figura 4.1. Eficiencia en los componentes del Sistema Fotovoltaico.  
Fuente: Autor

Obtenidas las eficiencias parciales en cada componente del sistema fotovoltaico, se puede obtener la eficiencia del sistema fotovoltaico aislado y conectado a la red mediante (4.1) y (4.2) respectivamente

$$\eta_{SFA} = \eta_{PANELFOTOVOLTAICO} * \eta_{REGULADOR} * \eta_{BATERIA} \quad (4.1)$$

$$\eta_{SFCR} = \eta_{PANELFOTOVOLTAICO} * \eta_{INVERSOR} \quad (4.2)$$

Dónde:

$\eta_{SFA}$  = Eficiencia del sistema fotovoltaico aislado.

$\eta_{SFCR}$  = Eficiencia del sistema fotovoltaico conectado a la red.

En la ver figura 4.2 se aprecia los valores obtenidos con una eficiencia valorada en las horas pico del día del 7 por ciento para el sistema fotovoltaico aislado y del 10 por ciento



para el sistema conectado a la red, con una diferencia significativa aproximadamente del 3 por ciento.

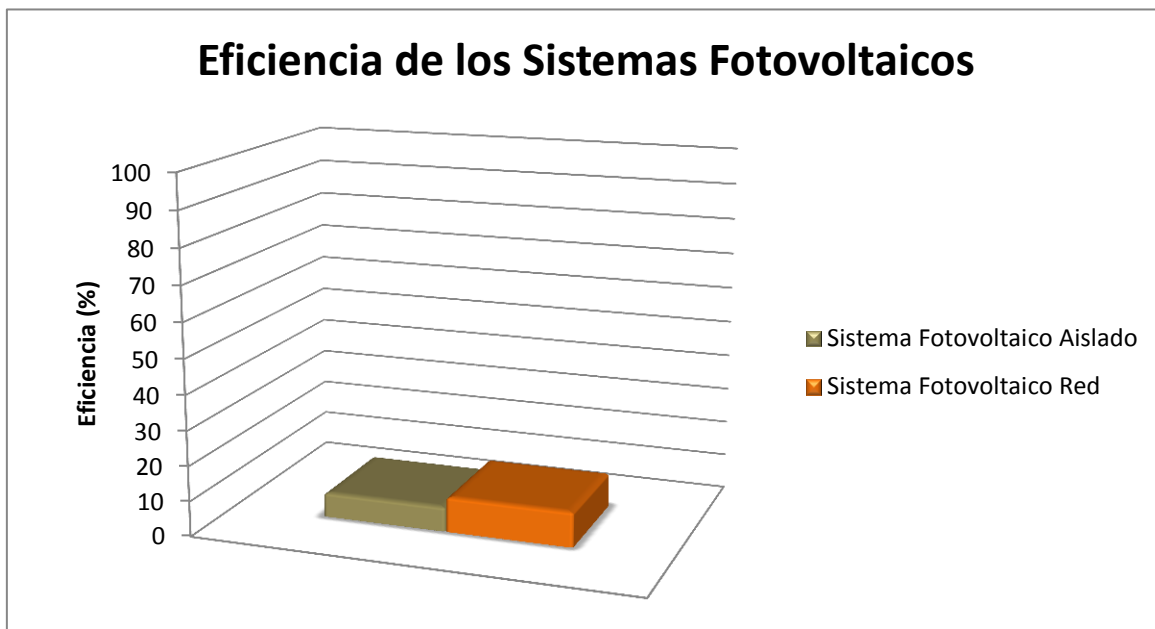


Figura 4.2. Comparación de la Eficiencia entre los Sistemas Fotovoltaicos.  
Fuente: Autor

En la figura 4.3. se aprecia el grado de utilización de la capacidad que es de 13 por ciento para el Sistema aislado y de 19 por ciento para el Sistema conectado a la red.

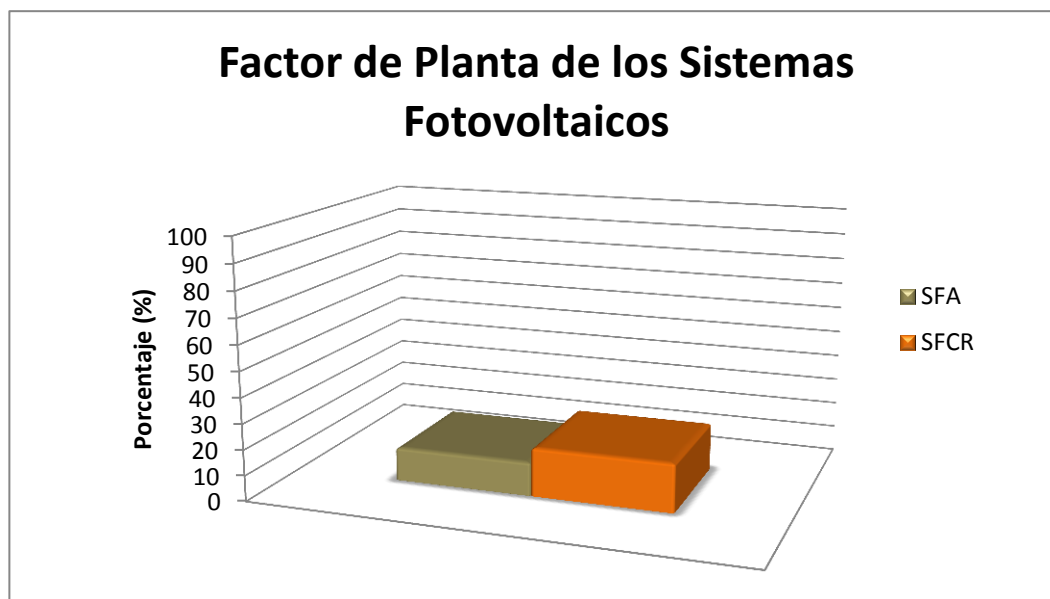


Figura 4.3. Comparación del Factor de Planta entre los Sistemas Fotovoltaicos.  
Fuente: Autor

### 4.3 Análisis de la vida útil en los componentes

La vida útil del sistema fotovoltaico depende directamente de cada uno de sus componentes y estos dependen de sus características técnicas, datos del fabricante, si estos están diseñados correctamente y si se realizan los mantenimientos necesarios son algunos de los parámetros que influyen al momento de medir el tiempo de vida. En la figura 4.3 se aprecia los años promedio en que los componentes del sistema fotovoltaico pueden funcionar en óptimas condiciones.

Las células fotovoltaicas se degradan muy lentamente y de forma progresiva. De hecho, todas las marcas de calidad ofrecen una garantía de potencia del 90 por ciento durante los primeros 12 años, y del 80 por ciento hasta los 25 años, siendo el componente con mayor tiempo de vida útil de hasta los 30 años [61].

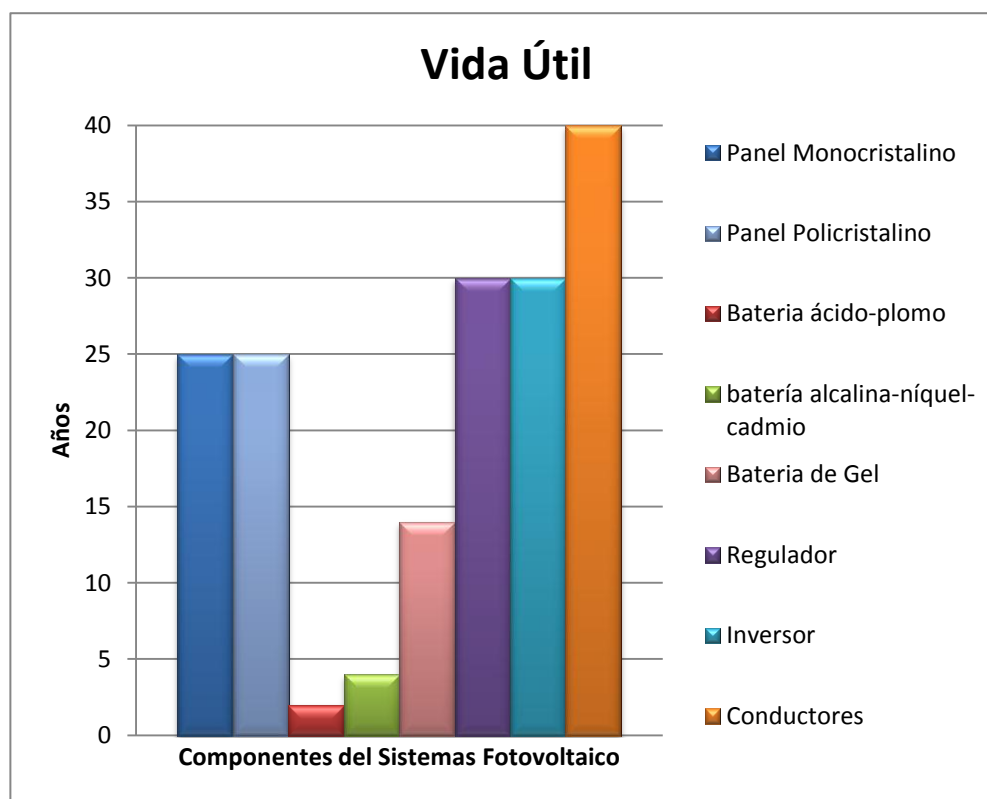


Figura 4.4. Vida útil promedio de los componentes de los Sistemas Fotovoltaicos.

Fuente: Autor

Los sistemas de almacenamiento conformado por baterías, es el componente más débil del sistema aislado, dado que su tiempo de vida es bastante menor que los demás equipos del sistema fotovoltaico, con un tiempo aproximado de 2 a 14 años según el tipo de batería

(ácido-plomo/gel), pero esta vida útil puede extenderse dependiendo del funcionamiento del regulador quien es el que lo protege [62], [63].

En el mercado existen diversas marcas y tipos de reguladores de carga e inversores con una vida útil entre 15 a 30 años, donde el primero permite la desconexión automática de la batería cuando el nivel de carga de ésta ha descendido a valores peligrosos. Generalmente, el regulador de carga es uno de los elementos más confiables de todo sistema fotovoltaico, siempre y cuando se dimensione e instale correctamente. Los inversores pueden combinarse con una amplia gama de los más variados componentes para la monitorización de las instalaciones fotovoltaicas y generación de una forma de onda sinusoidal pura [64].

#### 4.4 Análisis Costo-Beneficio

Dentro del presente estudio, la evaluación económica es una parte importante, el cual nos permite evaluar de manera financiera el proyecto [65], para esto se ha empleado herramientas de análisis financiero para cada sistema fotovoltaico. En la tabla 4.2 se observa los índices de evaluación para el sistema fotovoltaico aislado.

Tabla 4.2: Índices de evaluación para el sistema fotovoltaico aislado  
Fuente: Autor

ÍNDICES DE EVALUACIÓN							
CONCEPTO	FLUJOS DE FONDOS NOMINALES	TASA DE DESCUENTO O APLICABLE :Ke	FACTOR DE VALOR ACTUAL: $1/(1+Ke)^i$	FLUJOS DE CAJA ACTUALIZADOS	FNCi ACTUALIZADOS Y ACUMULADOS	SUMA DE LOS FNCi ACTUALIZADOS	MONTO DE LA INVERSION INICIAL
<b>Inversión Inicial</b>	15.280,00						
<b>Final Año 1</b>	1.200,57	7%	0,93	1.122,02	1.122,02	15.282,69	-15.280,00
<b>Año 2</b>	1.200,57	6%	0,89	1.068,50	2.190,53		
<b>Año 3</b>	1.200,57	6%	0,84	1.008,02	3.198,54		
<b>Año 4</b>	1.200,57	5%	0,82	987,71	4.186,25		
<b>Año 5</b>	1.200,57	7%	0,71	855,99	5.042,24		
<b>Año 6</b>	1.200,57	6%	0,94	1.132,61	6.174,85	5.042,62	1.200,57
<b>Año 7</b>	1.200,57	5%	0,91	1.088,95	7.263,80		

<b>Año 8</b>	1.200,57	6%	0,84	1.008,02	8.271,82		
<b>Año 9</b>	1.200,57	7%	0,76	915,91	-9.187,73		
<b>Año 10</b>	1.200,57	6%	0,75	897,13	10.084,86		
<b>Año 11</b>	1.200,57	5%	0,95	1.143,40	-11.228,26	5.197,83	1.200,57
<b>Año 12</b>	1.200,57	5%	0,91	1.088,95	12.317,21		
<b>Año 13</b>	1.200,57	5%	0,86	1.037,09	13.354,30		
<b>Año 14</b>	1.200,57	5%	0,82	987,71	14.342,01		
<b>Año 15</b>	1.200,57	5%	0,78	940,68	15.282,69		

En la tabla 4.3 se observa los índices de evaluación para el sistema fotovoltaico conectado a la red.

*Tabla 4.3: índices de evaluación para el sistema fotovoltaico conectado a la red  
Fuente: Autor*

<b>ÍNDICES DE EVALUACIÓN</b>							
<b>CONCEPTO</b>	<b>FLUJOS DE FONDOS NOMINALES</b>	<b>TASA DE DESCUENTO O APLICABLE :Ke</b>	<b>FACTOR DE VALOR ACTUAL: <math>1/(1+Ke)^i</math></b>	<b>FLUJOS DE CAJA ACTUALIZADOS</b>	<b>FNCi ACTUALIZADOS Y ACUMULADOS</b>	<b>SUMA DE LOS FNCi ACTUALIZADOS</b>	<b>MONTO DE LA INVERSION INICIAL</b>
<b>Inversión Inicial</b>	12.840,00						
<b>Final Año 1</b>	1.313,42	7%	0,93	1.227,49	1.227,49	16.719,21	-12.840,00
<b>Año 2</b>	1.313,42	6%	0,89	1.168,94	2.396,43		
<b>Año 3</b>	1.313,42	6%	0,84	1.102,77	3.499,20		
<b>Año 4</b>	1.313,42	5%	0,82	1.080,55	4.579,75		
<b>Año 5</b>	1.313,42	7%	0,71	936,45	5.516,19		
<b>Año 6</b>	1.313,42	6%	0,94	1.239,07	6.755,27	5.516,61	1.313,42
<b>Año 7</b>	1.313,42	5%	0,91	1.191,31	7.946,57		
<b>Año 8</b>	1.313,42	6%	0,84	1.102,77	9.049,34		
<b>Año 9</b>	1.313,42	7%	0,76	1.002,00	-10.051,34		
<b>Año 10</b>	1.313,42	6%	0,75	981,46	11.032,80		

<b>Año 11</b>	1.313,42	5%	0,95	1.250,87	-12.283,67	5.686,40	1.313,42
<b>Año 12</b>	1.313,42	5%	0,91	1.191,31	13.474,98		
<b>Año 13</b>	1.313,42	5%	0,86	1.134,58	14.609,56		
<b>Año 14</b>	1.313,42	5%	0,82	1.080,55	15.690,11		
<b>Año 15</b>	1.313,42	5%	0,78	1.029,10	16.719,21		

#### 4.4.1 VAN

El valor actual neto (VAN) es un indicador que permite conocer frente a la inversión efectuada, cual es el valor de utilidad a obtener después de la recuperación de esa inversión; matemáticamente es la resta de la inversión inicial versus la sumatoria de los flujos futuros del proyecto como tal; si el resultado es positivo se puede decir que se ha recuperado la inversión y se tiene una rentabilidad en el mismo.

	SFA	SFCR
<b>VALOR ACTUAL NETO</b>	<b>\$3</b>	<b>\$3.879</b>

Para nuestro caso ambos valores tanto para el sistema fotovoltaico aislado como el conectado a la red, se observa que el VAN es positivo, lo que significa que la inversión producirá ganancias. Sin embargo el valor de mayor cifra tiene el sistema fotovoltaico conectado a la red, siendo la alternativa como el mejor ocionado.

#### 4.4.2 TIR

La Tasa interna de Retorno (TIR) es dónde el valor actual neto es igual a cero, es decir que la sumatoria de los flujos prácticamente es igual a la inversión inicial, en pocas palabras mide la rentabilidad promedio del proyecto. Cuando la TIR es positiva significa que el proyecto tiene rentabilidad.

	SFA	SFCR
<b>TASA INTERNA DE RETORNO</b>	<b>2,13%</b>	<b>5,90%</b>

Se observa que para el sistema aislado se tiene una TIR menor en comparación al sistema conectado a la red, con lo que se confirma que el sistema de mayor eficiencia también tiene una mayor rentabilidad.

#### 4.4.3 COSTO/BENEFICIO

Cabe mencionar que este tipo de fuentes de energía sirven para reducir la emisión de CO2 causante del calentamiento global, el cual es respaldado en el protocolo de Kioto. Para lo cual existe el mercado de carbono donde las empresas privadas pagan una cierta cantidad de dinero por cada tonelada de CO2 que no se emita al ambiente. Esta retribución económica permite el ahorro en gastos de combustibles y lo más importante promueve a la conciencia social.

La relación beneficio/costo mide la absorción de los costos, simplemente es una relación matemática la cual, compara lo que se gasta contra la utilidad como es lo que se recibe por venta de energía y la venta de bonos de carbono, para ver cómo va evolucionando el proyecto.

	SFA	SFCR
<b>RELACION COSTO / BENEFICIO (C/B)</b>	<b>99,98%</b>	<b>76,80%</b>

Tomando en consideración estos indicadores, el promedio de vida útil, el valor de eficiencia, los pocos mantenimientos que presentan los sistemas fotovoltaicos, lo mejor es que este proyecto se realice para los conectados en red.

## CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron las eficiencias de cada componente de los sistemas fotovoltaicos tanto conectados a la red como los aislados, mediante modelamientos matemáticos, para su simulación utilizamos los datos de la radiación solar proporcionados por la Secretaria del Ambiente en su página web, como también datos de las características eléctricas de algunos componentes instalados en la universidad, los cuales nos permitieron cuantificar la cantidad de potencia de entrada y salida en cada uno de los componentes, para luego agruparlos y compararlos como sistemas fotovoltaicos.

La implementación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son los más eficientes, ya que estos presentan menores pérdidas al tener menores componentes en la conformación de su sistema, esto también se ve reflejado en los costos de inversión que son menores a diferencia de los sistemas aislados.

Al realizar la comparación de eficiencia entre los sistemas fotovoltaicos se observó algo notorio y evidente, y es que los sistemas conectados a la red presentan mayor potencia en su salida alrededor de un 30 por ciento más que los aislados.

Al obtener los valores de eficiencia en cada uno de los componentes del sistema fotovoltaico, se puede apreciar que el de mayor pérdidas tienen los sistemas de almacenamiento conformado por las baterías, esto es debido a las pérdidas por efecto Joule que se da en la conversión química-eléctrica, no obstante las nuevas tecnologías permiten mejorar estos valores de eficiencia aunque sus costos siguen siendo altos a pesar de que la explotación de la energía solar a diferencia de otras tecnologías tienen aspectos positivos como el medioambiental, de confiabilidad, de descentralización los cuales son de interés en el cambio en la matriz energética que el país se encuentra actualmente sumergido.

La transformación de la energía solar a eléctrica por medio de la interacción entre los fotones y el material semiconductor de las celdas empleadas en su construcción para conformar los paneles fotovoltaicos, a pesar de realizarse de manera limpia y directa, su rendimiento es muy bajo ya que voltaje de la célula FV es continuo y este depende del

material utilizado, mientras que la corriente de la célula FV depende del valor de la carga, la irradiación solar, la superficie de la celda y el valor de su resistencia interna.

La generación solar fotovoltaica es la mejor opción para la generación distribuida o autónoma a pequeñas escalas. Tiene muy bajo costo de mantenimiento y esta es la clave para la sustentabilidad y viabilidad financiera de un proyecto de generación de este tipo de energía.

Las mejores condiciones de funcionamiento para un sistema fotovoltaico estarán dadas en días despejados, con alto nivel de irradiación directa, con la superficie captadora perpendicular al sol, sin objetos que se interpongan en la trayectoria de la luz (sombras de árboles, edificios, suciedad del panel) y con amplios periodos de insolación.

La eficiencia de un sistema de energía solar fotovoltaica tiende a mejorar en el futuro, así como la disminución de sus costos, todo esto debido a los avances tecnológicos y a la economía de escala, que favorece los subsidios y beneficios fiscales; hay que tomar en cuenta que la vida útil de un sistema fotovoltaico es alrededor de los 20 a 25 años.



## RECOMENDACIONES

Los componentes fotovoltaicos se los puede caracterizar por la curva de rendimiento en función de la potencia de operación. Es importante seleccionar los componentes de alto rendimiento en condiciones nominales de operación para que el sistema opere en gran parte del tiempo en valores de rendimiento alto, evitando las consecuentes pérdidas de generación.

Un adecuado dimensionamiento del sistema fotovoltaico a instalar, junto con análisis de los valores de radiación solar del sector, permitirá reducir las pérdidas de cada componente, mejorando la eficiencia del sistema fotovoltaico.

Promover el estudio e implementación de las nuevas fuentes de energía alternativas como son los sistemas fotovoltaicos en la arquitectura de las nuevas edificaciones, permitirá reducir la contaminación al medio ambiente de gases de efecto invernadero .que producen las actuales fuentes no renovables.

Para una mayor precisión de resultados, es preferible trabajar con datos técnicos extraídos de cada componente a instalar, ya que un modelamiento matemático es solo una aproximación al valor real.

El valor actual neto es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, sin embargo la verdadera aportación que tienen las fuentes de energía no renovables es producir energía por medios limpios.

## REFERENCIAS

- [1] Lluís Jutglar, *Energía Solar (ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y MEDIOAMBIENTE)*. Barcelona, 2004, p. 272.
- [2] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Primera. United Stated of America, 2009, p. 760.
- [3] J. Duffie and W. Beckman, *Solar Engineering Of Thermal Processes*, Tercera. United Stated of America, 2006, p. 908.
- [4] D. Y. Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 2nd ed. United Stated of America: G. Francis, 2000, p. 681.
- [5] Sen Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. 2008, p. 273.
- [6] C. J. Chen, *Physics of Solar Energy*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [7] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *SOLAR ENERGY*. New York: Taylor and Francis Group, LLC, 2010, p. 352.
- [8] L. Salgado Conrado, “Diseño y construcción de un sistema de control para la orientación de un concentrador solar cilindro-parabolico este-oeste,” Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2010.
- [9] Biomass Users Network (BUN-CA), *Manuales sobre energía renovable: Solar Térmica*, Primera. San José, Costa Rica, 2002, p. 42.
- [10] S. J. Sánchez Miño, “ENERGAS RENOVABLES: Conceptos y Aplicaciones.” p. 146, 2003.
- [11] A. X. Cadena Añazco, “Guía para la preparación de anteproyectos de energía solar fotovoltaica,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2009.
- [12] D. Trebolle, “LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN ESPAÑA,” Universidad Pontificia Comillas, 2006.
- [13] T. Short, *Electric power distribution handbook*, no. C. New York, Washington, 2003.
- [14] D. A. Balaguera, A. F. Cortés, and M. A. Urueña, “Distributed Generation Scheme Analysis , as an Option for Bogota Electrical System,” 2012.
- [15] L. Tecnalía, “Guía Básica de la Generación Distribuida,” *Fund. la Energ. la Comunidad Madrid*, p. 64, 2007.

- [16] M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316.
- [17] C.-L. Lin, Y.-C. Hwang, and H.-C. Lin, “Study of the efficiency improvement in power generation from Photovoltaic,” *Proc. 2013 IEEE 17th Int. Conf. Comput. Support. Coop. Work Des.*, pp. 509–514, Jun. 2013.
- [18] A. A. Bayod Rùjula, *Energías Renovables - Sistemas Fotovoltaicos*, Primera. España, 2009, p. 336.
- [19] G. Harper Enríquez, *Tecnologías de Generación Eléctrica*, Primera. México: Limusa S.A., 2011, p. 368.
- [20] Ayuntamiento de Pamplona, “Energía solar Térmica y fotovoltaica en el marco del Código Técnico de la Edificación,” p. 71, 2007.
- [21] National Fire Protection Association, *National Electrical Code* ® 2011 Edition. 2011, p. 879.
- [22] J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, *Tecnología solar*, Mundi-Pren. Madrid-Barcelona-México, 2005, p. 544.
- [23] I. Elvis and P. Soto, “Celdas fotovoltaicas en generacion distribuida,” Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2005.
- [24] J. M. Fernandez Salgado, *Tecnología de las energías renovables*, Primera. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2009, p. 390.
- [25] U. Eicker, *Solar Technologies for Buildings*. Great Britain, 2001, p. 341.
- [26] X. E. Castells, *Energías Renovables*. Madrid, España, 2012, p. 649.
- [27] J. A. Domínguez Gómez, *Energías alternativas*, Segunda. Madrid, España, 2004, p. 121.
- [28] M. F. Martinetti, “Fuentes de energía en la Argentina,” in *Vasa*, p. 42.
- [29] A. ; F. Zobaa and R. Bansal, *Handbook of renewable energy technology*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011, p. 851.
- [30] National Energy Education Development Project, “Photovoltaics Guide Student,” *Natl. Energy Educ. Dev. Proy.*
- [31] P. Hersch and K. Zweibel, “Basic photovoltaic principles and methods,” p. 71, 1982.

- [32] F. J. Gimeno Sales, S. C. Salvador, and O. G. Salvador, *Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*, Primera. Barcelona: Universidad Politécnica de Valencia, 2011, p. 337.
- [33] M. M. Vallina, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Primera. España, Madrid, 2010, p. 216.
- [34] J. L. Angulano Pantoja, “Impacto de la temperatura de los módulos en la eficiencia de un sistema fotovoltaico conectado a la red.” Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, 2012.
- [35] J. G. Velasco, *Energías renovables*, Primera. España: Reterté S.A., 2009, p. 656.
- [36] Y. Matsumoto, “CELDA SOLARES DE SILICIO : FUNDAMENTO Y TENDENCIA,” *Div. Ciencias e Ing. Univ. Quintana Roo*, p. 44, 2011.
- [37] J. R. VILORIA, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Primera. Madrid, España, 2010, p. 408.
- [38] Biomass Users Network (BUN-CA), *Manuales sobre energía renovable: Solar fotovoltaica*, Primera. San José, Costa Rica, 2002, p. 42.
- [39] M. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, 2005.
- [40] Grupo Técnico FV, “Diseño y Dimensionamiento se Sistemas Solares Fotovoltaicos conectados a red,” *Corporación Desarro. Tecnológico*, vol. 37, p. 90.
- [41] F. H. Menjívar, “Estudio comparativo de los sistemas fotovoltaicos con inyección a la red monocristalino, policristalino y amorfo instalados en CEL,” Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Eléctrica, 2011.
- [42] J. So, Y. Jung, B. Yu, H. Hwang, G. Yu, and J. Choi, “Performance Results and Analysis of Large Scale PV System,” *2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conf.*, pp. 2375–2378, 2006.
- [43] M. S. Ing, C. Orbegozo, and I. R. Arivilca, “Energía Solar Fotovoltaica,” *Green Energy Consult. y Serv. SRL*, p. 49, 2010.
- [44] H. Diaz Narvaez and F. Diez Cardona, “Análisis, modelado, simulación y validación de un sistema de Generación de energía solar autónomo,” Universidad Autónoma de Occidente, 2007.
- [45] J. A. ESPAÑA SALAZAR and E. F. VILLARRUEL JÁCOME, “Diseño de un sistema de energía Fotovoltaica de emergencia para La iluminación en laboratorios,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2011.

- [46] M. A. Abella, “Master en Energías Renovables y Mercado Energético Energía Solar Fotovoltaica Escuela de Organización Industrial Sistemas Fotovoltaicos,” pp. 1–59.
- [47] L. Dávila Gómez, “Modelado para la simulación, el diseño y la Validación de inversores fotovoltaicos Conectados a la red eléctrica,” Escuela técnica superior de ingeniería industrial, 2011.
- [48] “Datos Horarios Solar.” [Online]. Available: <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>. [Accessed: 16-Jul-2014].
- [49] S. S. Castaner Luis, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSipice*. Barcelona: John Wiley & Sons, Inc., 2002, p. 358.
- [50] A. Peña, “Caracterización Del Voltaje VOC De Una Celda Fotovoltaica De Silicio Monocristalino Con Respecto a La Temperatura,” “*Energía Sol. Fotovoltaica*,” p. 6.
- [51] J. A. Beltrán, “Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2007.
- [52] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, and A. Masmoudi, “MATLAB / Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 213–218, 2012.
- [53] A. D. Hansen, P. Sørensen, and L. H. Hansen, *Models for a Stand-Alone PV System*, vol. 1219, no. December. 2000, p. 80.
- [54] G. Garrasco, P. Gabimberti, and J. Barral, “Desarrollo de componentes de sistemas fotovoltaicos para simulación bajo distintas condiciones climáticas,” *Univ. Nac. Río Cuarto*, no. 5800, p. 6.
- [55] M. A. Abella, “Master en Energías Renovables y Mercado Energético Energía Solar Fotovoltaica Escuela de Organización Industrial Sistemas Fotovoltaicos,” pp. 1–59.
- [56] G. a. Rampinelli, a. Krenzinger, and F. Chenlo Romero, “Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 578–587, Jun. 2014.
- [57] M. Cáceres and E. Pinto, “Modelo matemático para simular la interacción entre un sistema de generación Fotovoltaica y la red de baja tensión,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 14, pp. 25–32, 2010.
- [58] A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, “Determinacion de la eficiencia de conversión del inversor empleado en un Sistema de generación fotovoltaica conectado a red instalado en el nordeste Argentino.,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 15, pp. 17–24, 2011.

- [59] O. I. ORTEGA HIDALGO and A. G. BOADA CARABALÍ, “PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MICROCENTRALES ELÉCTRICAS UTILIZANDO PANELES FOTOVOLTAICOS,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, 2013.
- [60] J. F. Ferichola, “Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil,” Universidad Carlos III de Madrid.
- [61] D. Pilco and J. Jaramillo, “Sistemas fotovoltaicos para iluminación : paneles fotovoltaicos,” *Univ. Técnica Part. Loja*, pp. 1–4, 2008.
- [62] A. X. Cadena Añazco, “Guía para la preparación de anteproyectos de energía solar fotovoltaica,” Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [63] C. Roberto and P. Mora, “Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada,” Universidad de Costa Rica, 2008.
- [64] O. LAMIGUEIRO PERPIÑÁN, “GRANDES CENTRALES FOTOVOLTAICAS: PRODUCCIÓN, SEGUIMIENTO Y CICLO DE VIDA,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008.
- [65] G. F. Beltrán Romero, *PROYECTOS DE EMPRENDIMIENTO*, Primera. Cuenca-Ecuador, 2011, p. 121.