



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN
TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**TESIS DE GRADO
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE: INGENIERO EN ELÉCTRICO
MECÁNICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

TEMA:
ESTUDIO DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS EN EL ECUADOR Y CONSTRUCCIÓN DE UN
GENERADOR SOLAR A ESCALA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 200
W

ALUMNO:
CERIZ VELÉZ ANDRÉS EDUARDO

DIRECTOR:
MSC. PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN, ING.

2010



TESIS DE GRADO

**“ESTUDIO DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN
EL ECUADOR Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR SOLAR A ESCALA
DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 200 W”**

Presentado a la Facultad Técnica, Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la
Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por:

CERIZ VELÉZ ANDRÉS EDUARDO

Para dar cumplimiento con uno de los requisitos para optar con el título de:

INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICA

Mención: En Gestión Empresarial Industrial Bilingüe

Tribunal de Sustentación

MsC. Edwin F. Palacios Meléndez, Ing.

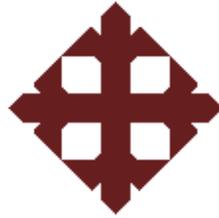
Director de Tesis

MsC. Héctor Cedeño Abad, Ing.
Decano de la Facultad Técnica

Ing. Pedro Tutivén López
Director de Carrera

Ing. Víctor del Valle Ramos
Coordinador Académico

Profesor Revisor



CERTIFICACIÓN

Certifico que el proyecto de grado titulado “**Estudio de la confiabilidad de Sistemas Fotovoltaicos en el Ecuador y construcción de un generador solar a escala de energía eléctrica a 200 W**”, desarrollado por el estudiante Ceriz Vélez Andrés Eduardo fue realizado, corregido y terminado, razón por la cual está apto para su presentación y sustentación.

MsC. Palacios Meléndez Edwin, Ing.
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme dado la oportunidad de culminar mis estudios de Ingeniería y así cumplir con mis objetivos que me propuse cumplir en el momento que ingrese a la prestigiosa Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

A mis padres mis agradecimientos eternos por haberme brindado todo su apoyo incondicional, por promover los buenos valores y principios que son el eje de mi vida, gracias también a mis hermanos.

Un cordial agradecimiento a las autoridades de la Facultad Técnica Para el Desarrollo; Ing. Héctor Cedeño Abad, Decano; Ing. Pedro Tutivén López, Director de Carrera; Ing. Víctor Del Valle, Coordinador Académico; Dr. Kleber López, Coordinador Administrativo que gracias al apoyo brindado por ustedes la presente tesis de investigación se pudo realizar con éxito.

Asimismo agradezco a todo los docentes por compartir sus conocimientos académicos que me brindaron en el transcurso de estos años, también quiero agradecer de manera especial al MsC. Ing. Edwin Palacios Meléndez, Director de Tesis que brindo toda su ayuda posible durante todo el proceso de la presente investigación.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL	
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	9
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivos Específicos	10
1.4. Hipótesis o Idea a Defender	11
1.5. METODOLOGÍA	11
CAPÍTULO 2. Estado del Arte de la Energía Solar.	12
2.1. La Energía solar	12
2.1.1. La energía proveniente del Sol	12
2.1.2. Espectro Solar	16
2.1.3. La radiación solar en la Tierra	19
2.1.3.1. Radiación solar en el tope de la atmósfera terrestre	20
2.1.3.2. Radiación solar en la superficie del planeta Tierra	21
2.1.4. La Radiación Solar e influencias de los factores atmosféricos.	23
2.1.4.1. Estructura atmosférica	23
2.1.5. La Radiación Solar e influencias de Factores geométricos.	26
CAPÍTULO 3. Estado del Arte de Sistemas de Tecnología Solar Fotovoltaica	32
3.1. Antecedentes de la Energía fotovoltaica	32
3.2. Aplicaciones de celdas fotovoltaicas.	42
3.3. Según el tipo de celda solar fotovoltaica	45
3.3.1. Celdas fotovoltaicas solares de Primera Generación	46
3.3.2. Celdas fotovoltaicas solares de Segunda Generación	48
3.3.3. Celdas fotovoltaicas solares de Tercera Generación	52
3.3.4. Celdas fotovoltaicas solares de Cuarta Generación	57

CAPÍTULO 4. Componentes que forman un Sistema Fotovoltaico	58
4.1. Generalidades	58
4.2. Tipos de Instalaciones Fotovoltaicas	58
4.2.1. Sistemas Fotovoltaicos independientes	59
4.2.2. Sistemas mixtos de generación de energía	62
4.2.3. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución de energía eléctrica.	63
4.3. Componentes de un Sistemas Fotovoltaico	64
4.3.1. Subsistema de captación de energía	65
4.3.1.1. Módulo fotovoltaico	65
4.3.1.2. Características de tensión – corriente de los módulos fotovoltaicos comerciales	69
4.3.1.3. Panel Solar	72
4.3.1.4. Orientación y ángulo del Panel Solar	74
4.4. Subsistema de almacenamiento de energía	75
4.4.1. Baterías de ácido – plomo	77
4.4.1.1. Funcionamiento de las Baterías de ácido – plomo	78
4.4.2. Características de las baterías ácido – plomo	79
4.4.3. Controlador de carga de baterías	91
4.5. Subsistema de conversión CC/CC y conversión CC/CA	94
4.5.1. Convertidor CC/CC	94
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	97
5.1. Conclusiones	97
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	

RESUMEN

En la actualidad los países desarrollados y en vías de desarrollo están optando en adoptar formas alternativas de energía eléctrica, ya que la preocupación a nivel mundial es hasta cuando los recursos no renovables como lo son los derivados del petróleo, el carbón, etc., utilizados para generación eléctrica se agotarán, dando como resultados que los costos aumenten.

Para esto ya existen proyectos para solucionar este problema mundial, es la aplicación y desarrollo de recursos renovables, una de las alternativas es la generación de energía solar a través de los paneles solares conocidos como Sistemas Fotovoltaicos quienes captan la energía proveniente del sol, para después procesarla con convertidores multinivel para la conversión de corriente directa a corriente alterna, que es la más utilizada en los hogares e industrias.

El presente trabajo incluye una pequeña implementación a escala para comprobar el funcionamiento del sistema fotovoltaico para generar energía, el mismo que será dotado a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la región de América Central, la aplicación de tecnologías de energía renovable a pequeña escala, son consideradas como una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a zonas o comunidades rurales remotas y para futura expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. América Central cuenta con recursos suficientes para desarrollar e implementar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente [Van, 00].

También es importante añadir que estas tecnologías ayudan al medio ambiente disminuyendo así la contaminación del medio, originada por emisiones de gases de los sistemas convencionales, que utilizan combustibles fósiles, como el carbón y productos derivados del petróleo. Dichos gases mencionados contribuyen al efecto invernadero y calentamiento global de nuestro planeta. Sin embargo, una de las barreras existentes que dificultan un mejor desarrollo y despliegue de este tipo de energía, caudado por la falta de conocimiento de las tecnologías y las capacidades institucionales y técnicas aún incipientes.

En la actualidad la energía eléctrica a nivel mundial se encuentra en una situación complicada. Esta energía ha sido fundamental en el progreso de la civilización humana. El consumo de la energía eléctrica se ha incrementado de manera rápida, esto con la finalidad de mejorar la calidad de vida, particularmente en los países industrializados. La energía renovable es aquella que posibilita una explotación ilimitada del recurso, en virtud de que su cantidad no se reduce a medida que ésta se aprovecha.

Por lo tanto, debe promoverse una mayor diversificación en la generación de la electricidad, impulsando y desarrollando tecnologías que aprovechan energía renovable, de tal forma que contribuyan al desarrollo sustentable del país. La energía solar fotovoltaica se puede encuadrar en el conjunto de tecnologías que apoyan esta otra sociedad posible [Rie05]: “La entrada de pequeños sistemas fotovoltaicos en la red eléctrica convencional representa hoy una posibilidad de cambio en la organización social, en el sentido de hacerla más igualitaria. Así pues, cada kilovatio-hora de origen fotovoltaico que se inyecta en la red desde un sistema individual incorpora un valor añadido en términos de adaptación social frente a un futuro incierto.” [Lorenzo, 06b]

Una característica distintiva de la energía solar fotovoltaica es que la eficiencia de los sistemas no depende de su tamaño. Este carácter modular la hace accesible a personas y colectivos que no pueden participar en otros tipos de generación (autogestión y descentralización) [Lor06b]. Esta misma característica junto con las propiedades estructurales de los generadores fotovoltaicos hace que pueda integrarse en edificios y estructuras de ciudades, acercando la generación a los lugares de consumo (generación distribuida).

Es más, dado que la rentabilidad energética es independiente del tamaño del generador, no es necesario construir grandes infraestructuras. Es, por tanto, una tecnología humanamente abarcable, y que no implica una “colonización del tiempo” pasado y futuro: “Como se trata de un flujo energético constante, que ha de aprovecharse en tiempo real, ninguna generación puede apropiarse de la energía solar que pertenece a las generaciones futuras. Por el contrario, el actual sistema energético —basado en los combustibles fósiles— ejerce dominación sobre el tiempo pasado, apropiándose de la energía solar que alcanzó el planeta hace muchos millones de años; y sobre el futuro, apropiándose rápidamente de recursos

limitados, dilapidándolos, y dañando las capacidades regenerativas de la biosfera.” [Rie04].

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo tecnológico para la generación de energía eléctrica se está orientando hacia las fuentes seguras y renovables, como la eólica, la fotovoltaica y las celdas de combustible. En Ecuador, la generación de electricidad no emplea la energía renovable, esto a pesar de que existe un gran potencial, con calidad excepcional y una diversa localización geográfica de las fuentes.

A través de la docencia se debe apostar por adaptar la enseñanza de sistemas de generación eléctrica renovable, aumentando la importancia de la fase de construcción de prototipos a escala para la generación solar a una potencia determinada en la presente investigación dotándola de una metodología eficaz. Múltiples centros de investigación en el mundo realizan estudios, organizan grupos de trabajo e inician la construcción y operación de prototipos de equipos y sistemas operados con energéticos renovables.

Asimismo, se han establecido diversas empresas para aprovechar las oportunidades que se ofrecían para el desarrollo de estas tecnologías, dados los altos precios de las energías convencionales. Muchos países, particularmente los más desarrollados, establecen compromisos para limitar y reducir emisiones de gases de efecto de invernadero o renovando así su interés en aplicar políticas de promoción de las energías renovables, países como Estados Unidos, Alemania, España e Israel presentan un crecimiento muy acelerado en el número de instalaciones que aprovechan las energías alternativas.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad el Ecuador ha desarrollado muy poca actividad en el estudio, investigación y desarrollo de proyectos que involucren la generación de energía eléctrica con recursos renovables. Existe entonces la necesidad de transitar hacia economías que incorporen en su base fuentes energéticas diferentes de las convencionales, tales como la energía nuclear, la energía solar, la eólica, la biomasa, etc. Los elevados costos que han sufrido los hidrocarburos en la década de los setentas han despertado nuevas conciencias sobre el problema energético. Las economías actuales se basan en recursos energéticos no renovables, cuyas reservas se irán agotando independientemente de posibles nuevos descubrimientos de yacimientos de hidrocarburos que se estima no serán espectaculares.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos y aplicación de un generador solar de 200 W para generar energía eléctrica por medio de la luz solar, con la finalidad de poder iluminar un lugar donde no se cuenta con energía eléctrica directa (CONECEL)

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado actual del arte o marco teórico en los sistemas fotovoltaicos, eólicos, etc.
- Diseñar el prototipo de generación solar para generar 120 V_{rms} a 60 Hz con una señal sinusoidal para una carga de 200 W.
- Implementar el prototipo en un sistema en la iluminación.

1.4. Hipótesis o Idea a Defender

La operatividad y confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos como fuentes de energía eléctrica renovables en el Ecuador permitirá comprobar a través de un generador solar construido a escala para generar 200 W de energía eléctrica y así brindar una herramienta de ayuda a la enseñanza de la materia Distribución Eléctrica, considerado también como aplicación en las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICS) que se están incorporando a la enseñanza de la ingeniería a nivel mundial.

1.5. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se seleccionaron los siguientes métodos de investigación:

1. Método de análisis y síntesis.
2. Método de la inducción y la deducción.
3. Métodos de medición y de observación

CAPÍTULO 2. Estado del Arte de la Energía Solar.

2.1 La Energía solar

El sol es un reactor de fusión que funciona por sí mismo y sin fallos (es una fuente inagotable de energía) ha servido a la humanidad para satisfacer las necesidades básica de energía, además, es de importancia esencial para la supervivencia del hombre sobre la tierra, y parece que la seguirá manteniendo durante un período, para nuestros efectos, indefinido. Únicamente las plantas son capaces de convertir la energía solar en combustible y comida adecuada a las necesidades animales, pero las cantidades producidas de esta manera, aunque grandes, no podrán cubrir las demandas actuales cuando los combustibles almacenados (petróleo y gas), se hayan agotado por completo.

Parte de la energía que llega puede ser aprovechada por el hombre de manera útil. Dicha parte, depende de una gran variedad de factores que determina la radiación que finalmente incide sobre la superficie terrestre. Uno de los principales factores que repercute en la cantidad de energía recibida es la atmósfera del planeta ya que ella actúa como un filtro al flujo energético incidente [Robinson, 96]

2.1.1 La energía proveniente del Sol

El Sol es una estrella más entre las millones que hay en el universo, el diámetro del sol es 1.392.000 km (109 veces de la Tierra) y su masa equivale a unos 300.000 planetas iguales a la masa de la Tierra. Se formó hace cinco billones de años y todavía durará otros cinco. El Sol está a una

distancia media de tan sólo 149,5 millones de kilómetros (1 UA¹), por lo que los rayos de luz tardan 8 minutos y 17 segundos en viajar a la Tierra desde que lo abandonan.

El Sol tiene forma esférica de naturaleza gaseosa que genera energía debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su zona central. En su núcleo se concentra el 40% de la masa a una temperatura de $1,36 \cdot 10^7$ K y una densidad de 1.411 kg/m^3 . Saliendo del núcleo, que es donde se producen las reacciones nucleares, se atraviesa una zona intermedia y disminuye la densidad y la temperatura. La capa exterior, con una densidad muy baja, se llama zona convectiva² (ver figura 2.1) ya que el calor se transmite por convección hasta la superficie.

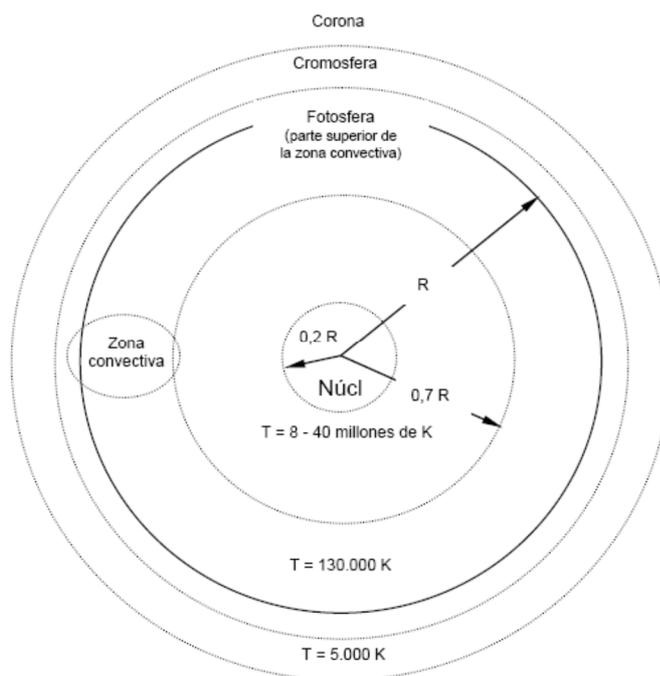


Figura 2.1: Representación esquemática del Sol de radio R. Fuente: Del autor.

¹ **UA** (unidad astronómica) unidad de distancia que es aproximadamente igual a la distancia media entre la Tierra y el Sol y cuyo valor, determinado experimentalmente, es alrededor de 149.597.870 km, valor dado en el Sistema Internacional de Unidades es $1,49597870 \times 10^{11}$ m). Aunque es una excelente aproximación, no corresponde con toda precisión a la órbita real de la Tierra.

² **CONVECTIVA**, es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La *convección* se produce únicamente por medio de materiales fluidos.

Una representación más real del sol, ilustrada por la figura 2.2, donde la superficie es conocida como fotosfera y es visible desde la Tierra. Su estructura es irregular, granulosa y cambiante. Es allí donde se producen las fulguraciones solares y las manchas. Su temperatura se estima en unos $5,8 \cdot 10^3$ K. La parte más externa de la atmósfera solar es conocida como corona. Las reacciones nucleares que se producen en el Sol, consisten en la transformación de hidrógeno en helio. Cuatro átomos de hidrógeno se convierten en uno de helio. En esta transformación se produce una pérdida de masa y una liberación de energía.

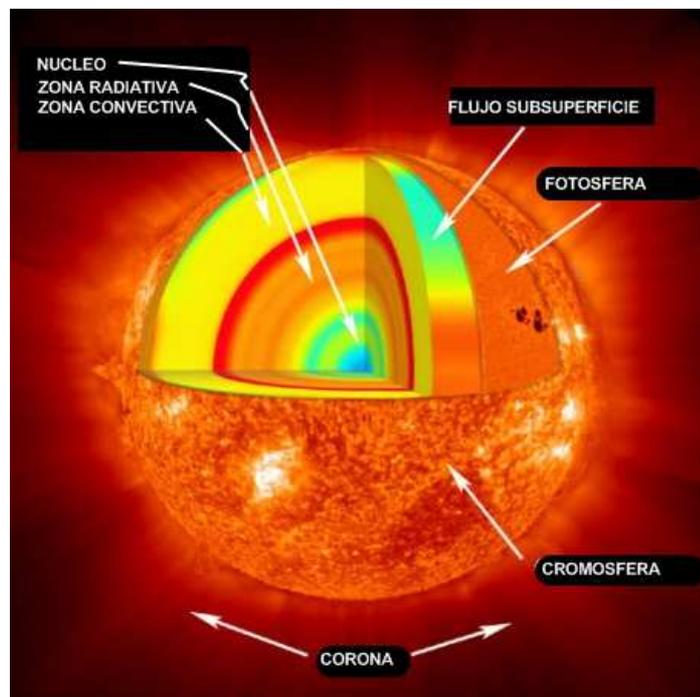


Figura 2.2: Representación del Sol [Carvajal, 09]

Viendo el Sol como un cuerpo negro de acuerdo a la **Ley de Stefan Boltzmann**, se tiene que éste irradia un flujo energético por unidad de tiempo y de área (potencia por unidad de área) dado por la ecuación (2.1):

$$E = \sigma \cdot T^4 \approx 63,3 \left[\frac{MW}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$E =$ flujo energético por unidad de tiempo y de área.

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] = \text{constante de Stefan Boltzmann.}$$

$T =$ temperatura del sol en Kelvin [K].

La energía del sol es gratuita, renovable y no perjudica al medio ambiente (no contamina), también se podría denominar como una fuente ideal de energía. La actual tecnología permite realizar distintas aplicaciones específicas que son necesarias potenciar al máximo, teniendo como ventaja de que en el Ecuador reúne excelentes condiciones para el aprovechar este tipo de energía.

Esta energía, por tanto, nos ofrece muchas posibilidades en el presente y en el futuro que es imprescindible aprovechar de forma racional, sacando el máximo rendimiento posible a este suministro limpio y gratuito. Definiendo como **luminosidad** solar a la energía emitida por unidad de tiempo, e integrando sobre toda la superficie del sol, se tiene que ella está dada por la ecuación 2.2:

$$L_s = E \cdot A_{sol} = \sigma \cdot T^4 \cdot (4\pi r_{sol}^2) \cong 3,65 \times 10^{23} [kW] \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$L_s =$ luminosidad solar.

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] = \text{constante de Stefan Boltzmann.}$$

$T =$ temperatura del sol en Kelvin [K].

$r_{sol} =$ radio del sol ($r_{sol} = 0,7 \times 10^6 [km]$)

A manera de ejemplo, suponiendo un observador en la Tierra, viendo al Sol desde la parte superior de la atmósfera de manera normal al plano

donde se encuentra, ubicada a una distancia $d_{T-S} = 1 AU$ del sol, siendo la distancia media Tierra-Sol, como se observa en la figura 2.3.

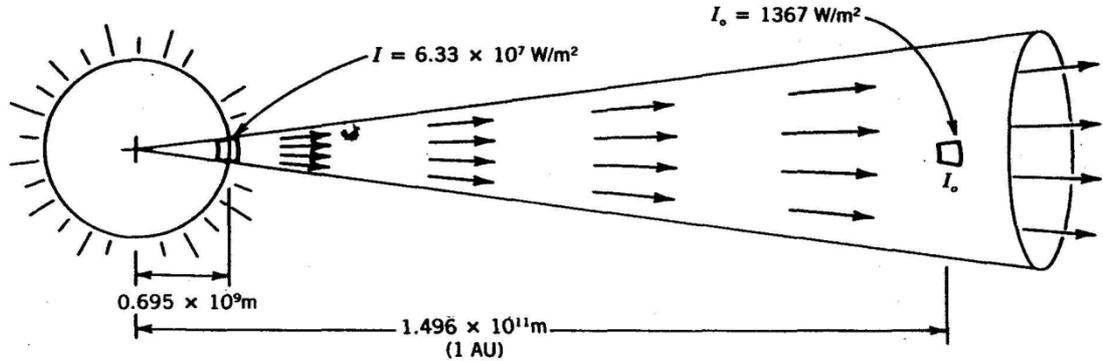


Figura 2.3: Representación gráfica del Sol visto de la parte superior de la atmósfera de la tierra [Stine, 10]

De acuerdo a la ley del cuadrado inverso, la potencia disminuye con el cuadrado de la distancia de acuerdo a la ecuación 2.3:

$$I = \frac{L_S}{4\pi(d_{T-S})^2} = 1,353 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$$I = 1,353 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

I = energía por unidad de tiempo y área de distancia d_{T-S} del sol.

L_S = luminosidad solar.

d_{T-S} = distancia Sol – observador en la Tierra ($1 AU = 149,6 \times 10^6 [km]$).

2.1.2 Espectro Solar

La energía solar que recibe la Tierra es proveniente de una capa relativamente delgada igual a 1000 km de espesor del Sol, llamada *fotosfera* o *corteza*, con temperatura muy elevada entre 4000K – 6000 K. El tipo radiación emitida por el Sol es electromagnético dentro de un gran rango de

frecuencia del espectro electromagnético de frecuencias. La radiación viaja con una velocidad de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (llamada velocidad de la luz, c). El rango de frecuencias del espectro electromagnético se muestra en la Figura 2.4, en la cual podemos observar las distintas longitudes de onda (λ) correspondientes a los distintos tipos de radiaciones. Podemos distinguir que la zona del espectro visible, se encuentra localizada entre $0,4 \mu\text{m}$ y $0,7 \mu\text{m}$, los mismo que son permisible para el ojo humano.

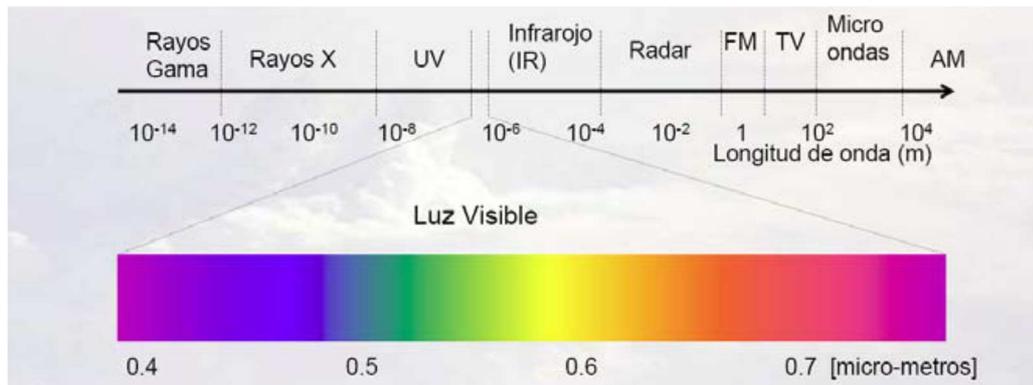


Figura 2.4: Rango de frecuencias del espectro electromagnético [Garreaud, 07]

La distribución del espectro recibido del Sol en la Tierra (ver figura 2.5), así como el emitido por el planeta Tierra. Se aprecia que la mayoría de la energía se localiza en la región del espectro visible (producido por el filtrado en la atmósfera). Antes de la acción de la atmósfera se tiene que entre la región Visible y la región IR se encuentra casi toda la energía del espectro.

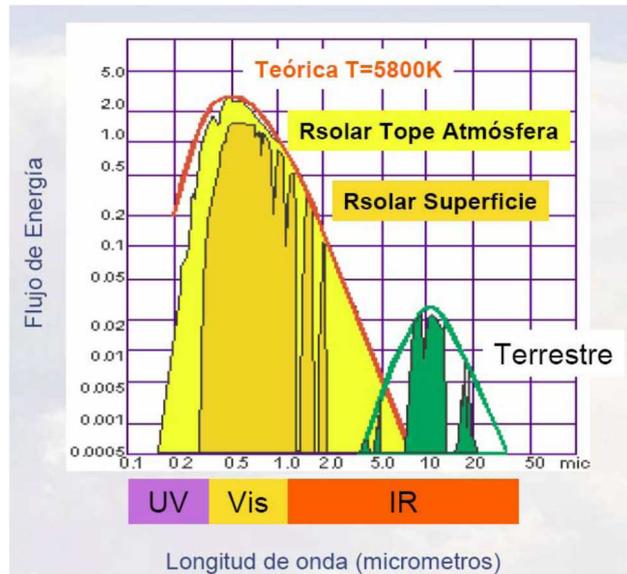


Figura 2.5: El espectro electromagnético distribuido sobre la Tierra [Garreaud, 07].

En la figura 2.5 sólo una parte pequeña viene en la zona UV del espectro electromagnético, de la misma se observa que la radiación emitida por la Tierra en relación con λ (longitud de onda) es mayor la del Sol. La radiación electromagnética (REM) proveniente del Sol se conoce también como **Radiación de Onda Corta**, mientras que la proveniente de la Tierra se llama **Radiación de Onda Larga**.

La Radiación electromagnética transmite energía la cual se forman por los haces de luz, denominados también como **fotones**. De ahí que es importante considerar que la energía está asociada con la ecuación 2.4 y 2.5:

$$E_F = h \cdot f \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$f = \frac{v_c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

$E_F =$ energía asociada a cada fotón.

$h = 6,626 \times 10^{-19} [J \cdot m] =$ constante de Planck .

$f = \text{frecuencia de cada fotón.}$

$v_c = c = \text{velocidad de la luz.}$

$\lambda = \text{longitud de onda de cada fotón.}$

2.1.3 La radiación solar en la Tierra

La radiación del sol llega a la Tierra, la cual se ve afectada por un conjunto de factores, como lo son: geométricos (astronómicos y geográficos), y atmosféricos. Los dos primeros (geométricos) inciden sólo en la radiación que se tiene en el tope de la atmósfera, mientras que los segundos (atmosféricos) afectan a los rayos incidentes que la traspasan y llegan a la superficie terrestre.

La Tierra gira alrededor del Sol, demarcando el plano eclíptico, a una distancia media de $150 \times 10^6 \text{ km}$, conocida también como unidad astronómica (UA). Su órbita es elíptica (ligeramente, con una variación de un 1,7%) dejando el Sol situado en uno de sus focos y que provoca que esta distancia varíe desde las 1,017 UA (máximo denominado afelio) hasta las 0,983 UA (mínimo denominado perihelio) a lo largo del año. Aún así, la Tierra tiene otros movimientos de períodos mucho más largos (ver figura 2.6).



Figura 2.6: Movimientos de precesión, variación de la declinación y variación de la excentricidad de la órbita terrestre [Castillo, 09].

El eje de rotación terrestre rota, a su vez, describiendo una circunferencia como lo haría un trompo cuando está a punto de pararse, es el movimiento de precesión, con un período de 22.000 años. Así mismo varía su ángulo de declinación, con un período de 41.000 años. Y por último, la excentricidad de la órbita también varía, como si la órbita fuera elástica, con un período de 100.000 años.

2.1.3.1 Radiación solar en el tope de la atmósfera terrestre

La energía generada por el astro rey (Sol) de 3×10^{23} [kW], sólo una parte de la energía del Sol $1,7 \times 10^{14}$ [kW] llegan a la Tierra efectivamente, esta pequeña fracción de energía (0,000000046%) equivale a unas 5.000 veces el total del consumo de energía eléctrica de la población de la Tierra. La radiación solar total que llega a una superficie expuesta perpendicularmente a los rayos de Sol, fuera de la atmósfera, y a la distancia media Tierra-Sol es una constante y recibe el nombre de **constante extraterrestre** o **constante solar** I_0 viene dado por:

$$I_0 = 1,353 \left[\frac{kW}{m^2} \right] = 135,3 \left[\frac{mW}{cm^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En cuanto a la **radiación extraterrestre** I_E que llega a Tierra durante todo el año por la excentricidad pequeña de su órbita (ecuación 2.7), es decir que irradia sobre un plano localizado en el tope de la atmósfera sobre el cual los rayos del sol inciden a diferencia de la constante solar, la radiación extraterrestre incluye la variación de la distancia Tierra – Sol durante el año, la cual está definida por:

$$I_E = I_0 \cdot \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360^\circ \cdot n}{365} \right) \right] \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

$n =$ es el día del año ($1 < n < 365$).

$I_E = \text{radiación extraterrestre.}$

$I_0 = \text{constante solar}$

2.1.3.2 Radiación solar en la superficie del planeta Tierra

Una vez que los rayos solares penetran la atmósfera, se distinguen los siguientes tipos de radiación:

- **Radiación Directa IB**, es aquella que llega directamente del Sol sin sufrir cambio en su dirección, se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan, como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7: Tipos de radiación directa y difusa³.

- **Radiación Difusa ID**, es aquella que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas, viajando en todas direcciones, no sólo de las nubes, sino que de las partículas de

³ Figura obtenida de la pagina web: http://www.enertglobal.com/technology_s.html

polvo atmosférico, árboles, edificios, montañas, el propio suelo, etc. Una característica importante de este tipo de radiación es que no produce sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos (ver figura 2.7).

- **Radiación Reflejada IR**, La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, conocido como albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben. Las superficies oblicuas reciben una cantidad intermedia entre los dos casos anteriores (ver figura 2.8)
- **Radiación Global IG**, correspondiente a la suma de las tres radiaciones anteriores, expresada por la ecuación 2.8:

$$I_G = I_B + I_D + I_R \quad \text{Ecuación 2.8}$$

En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado casi no existe radiación directa y casi la totalidad de la radiación que incide es difusa.

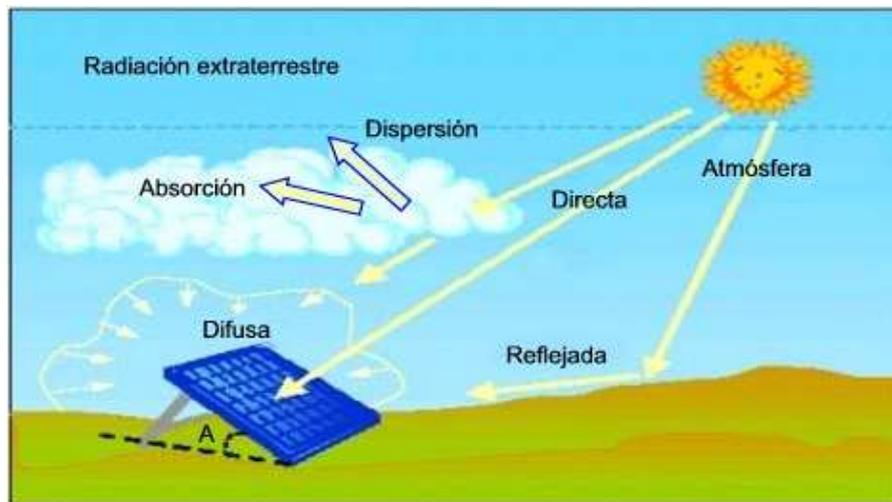


Figura 2.8: Radiación global: directa, difusa y reflejada⁴.

2.1.4 La Radiación Solar e influencias de los factores atmosféricos.

La radiación solar hacia la Tierra es afectada por la atmósfera. La presente sección se revisará las características atmosféricas y principales procesos que afectan la radiación solar, junto con el concepto de Masa de Aire.

2.1.4.1 Estructura atmosférica

La atmósfera terrestre está dividida en 5 capas (ver figura 2.9), las cuales son [Villegas, 06]:

⁴ Figura obtenida de la página web: <http://ampliadas2ciencia.blogspot.com/2010/09/que-es-la-radiacion-solar.html>

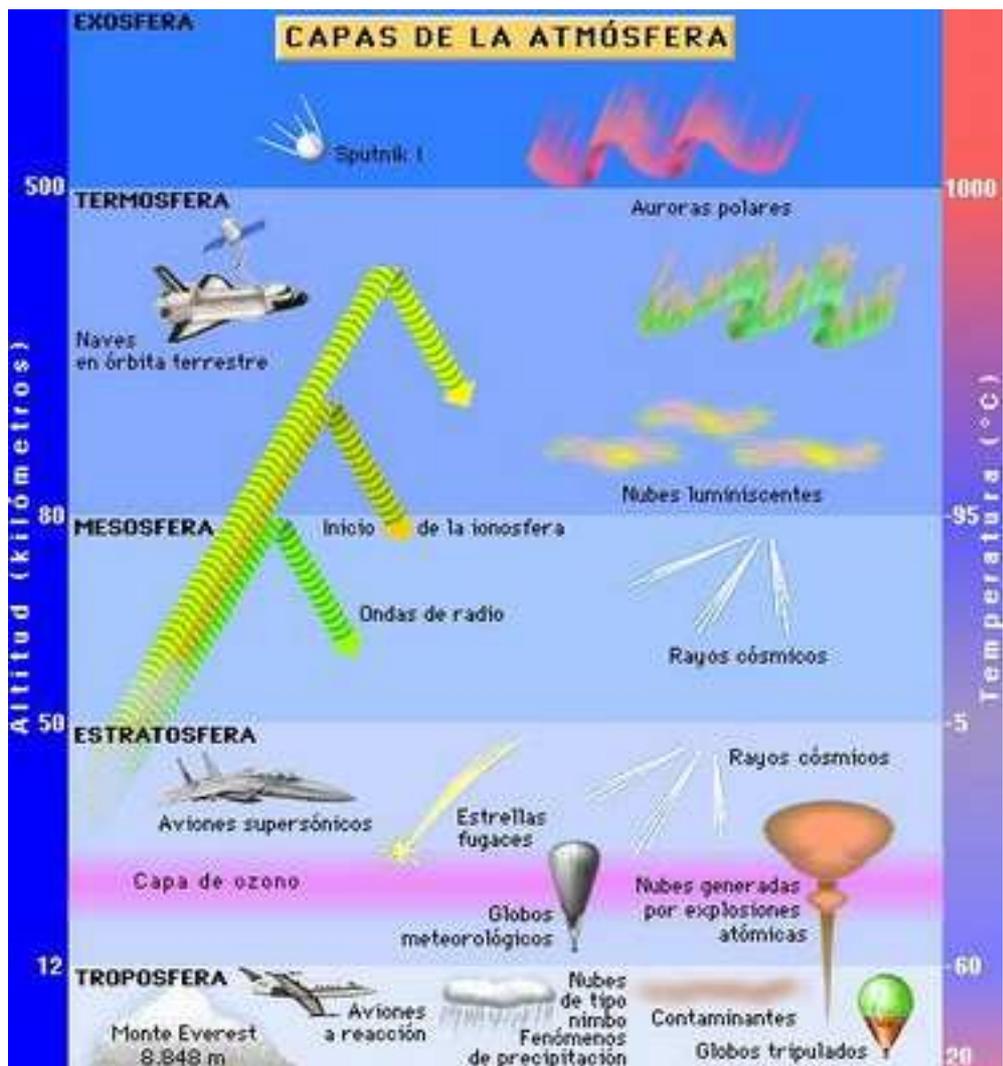


Figura 2.9: Capas de la atmósfera⁵.

- ✓ **Tropósfera**, zona más baja de la atmósfera, la altura llega hasta los 12 km aproximadamente. Aquí es donde se producen todos los fenómenos meteorológicos. Contiene la mayor proporción de vapor de agua, lo que permite mantener el calor emergente de la superficie terrestre.

⁵ Gráfica obtenida en página web: <http://atlas.snet.gob.sv/atlas/files/FenomenosMeteorologicos-/TroposferaEsferaCambio.html>

- ✓ **Estratósfera**, capa comprendida entre los 12 km h <math>< 90</math> km de altura. En esta parte se encuentra presente la capa de Ozono (O_3) quién se encarga de proteger a la tierra de los rayos ultravioletas (muy elevadas) provenientes del Sol. Las cantidades de O_2 y CO_2 son casi nulas en esta capa, y el hidrógeno aumenta proporcionalmente.

- ✓ **Mesósfera**, capa comprendida entre 90 km h <math>< 1.100</math> km de altura. Aquí se halla la capa de iones de la atmósfera, que nos permite realizar todo tipo de transmisiones de radio y televisión. En la mesósfera o ionósfera el gas predominante es el hidrógeno.

- ✓ **Termosfera**, capa de la atmósfera terrestre ubicada entre la mesósfera y la exósfera. Se encuentra comprendida entre 80 km h <math>< 600</math> km, aproximadamente. En esta capa la temperatura se eleva continuamente hasta más allá de los 1000 °C. En esta capa, la radiación ultravioleta, pero sobre todo los rayos gamma y rayos X provenientes del Sol, provocan la ionización de átomos y moléculas. En dicho proceso los gases que la componen elevan su temperatura varios cientos de grados, de ahí su nombre. Los transbordadores espaciales son aquellos que operan en la capa de la atmósfera.

- ✓ **Exósfera**, capa externa de la atmósfera terrestre, por sobre la Ionósfera. Está compuesta principalmente de hidrógeno y helio, y las partículas van disminuyendo hasta desaparecer. Debido a la baja atracción gravitacional algunas de ellas pueden escaparse de la exósfera.

2.1.5 La Radiación Solar e influencias de Factores geométricos.

Los factores geométricos más influyentes sobre la radiación solar recibida en la Tierra son los siguientes:

- ✓ **Latitud (véase la figura 2.10)**, es el ángulo entre cualquier punto de la superficie terrestre y el ecuador de ésta. Se mide entre 0° y $+90^{\circ}$ en el hemisferio norte, y entre 0° y -90° en el hemisferio sur.

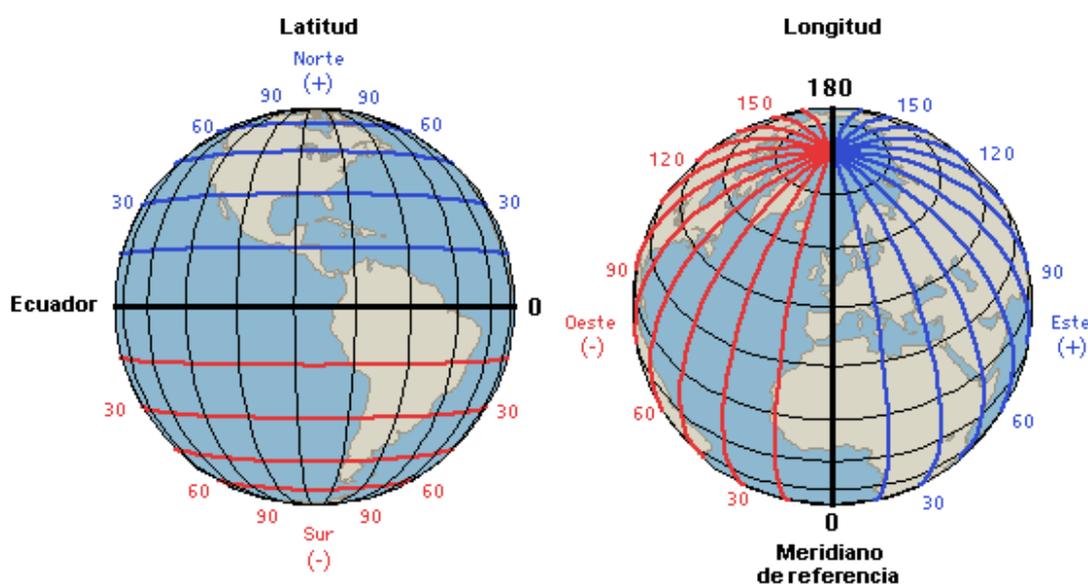


Figura 2.10: Factores geométricos por: latitud y longitud⁶

- ✓ **Longitud (véase la figura 2.10)**, es el ángulo formado entre cualquier punto de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich. Se mide entre 0° y $+180^{\circ}$ hacia el este del meridiano de Greenwich, y entre 0° y -180° hacia el oeste del meridiano de Greenwich. La latitud y longitud definen la ubicación de un lugar determinado en la Tierra.

⁶ Gráfica obtenida la página web: <http://lcardo.over-blog.com/article-37147677.html>

- ✓ **Eclíptica (véase la figura 2.11)**, corresponde al plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del Sol, y también, a la línea aparentemente recorrida por el Sol a lo largo de un año.

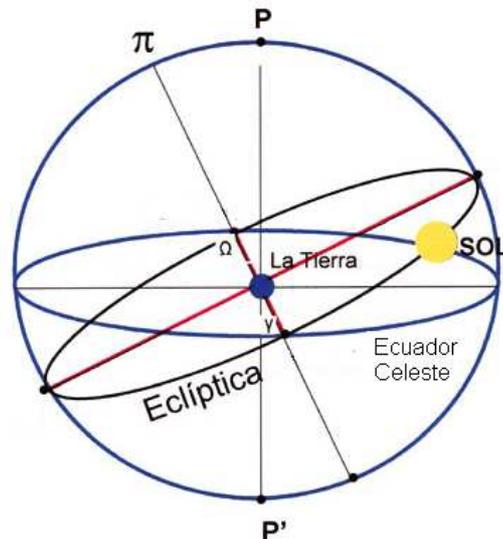


Figura 2.11: Factores geométricos: Eclíptica y ecuador celeste⁷

- ✓ **Ecuador Celeste (véase la figura 2.11)**, es la proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste en el espacio.
- ✓ **Azimut del Sol (véase la figura 2.12)**, Corresponde al ángulo medido sobre el horizonte que forman el punto cardinal Norte o Sur (según la referencia utilizada) y la proyección vertical del Sol sobre el horizonte.

⁷ Gráfica obtenida la página web: http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1448

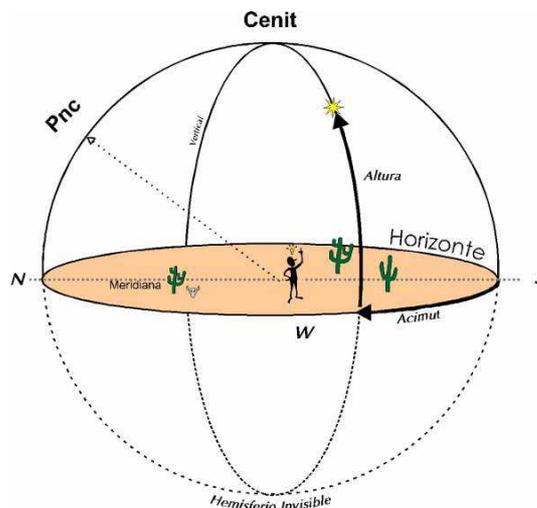


Figura 2.12: Factores geométricos de acimut y altura del sol⁸

- ✓ **Altura del Sol (véase la figura 2.12)**, Corresponde al ángulo formado entre el horizonte terrestre y el Sol que ve un observador.
- ✓ **Ángulo horario (véase la figura 2.13)**, Es el que determina la posición del Sol con respecto al eje terrestre. El ángulo horario vale cero al mediodía solar (momento en que el Sol se encuentra en la cima de su recorrido), y toma valores negativos antes de mediodía y positivos después de mediodía.

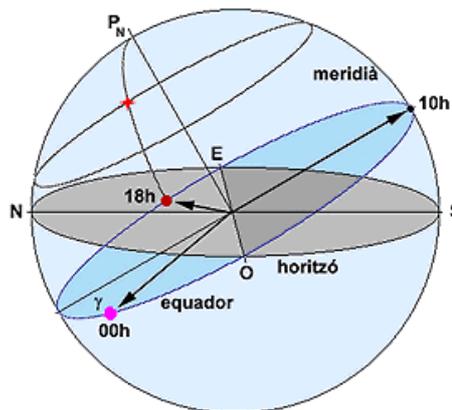


Figura 2.13: Factores geométricos por ángulo horario⁹

⁸ Gráfica obtenida la página web: <http://www.tierradelazaro.com/astro/tiemposol.htm>

⁹ Gráfica obtenida la página web: <http://www.astrogea.org/coordenada/ficha6.htm>

- ✓ **Azimut del plano (véase la figura 2.14)**, Corresponde al ángulo formado entre la proyección de la normal del plano sobre la horizontal del lugar y la dirección sur o norte, de acuerdo a la convención que se utilice.

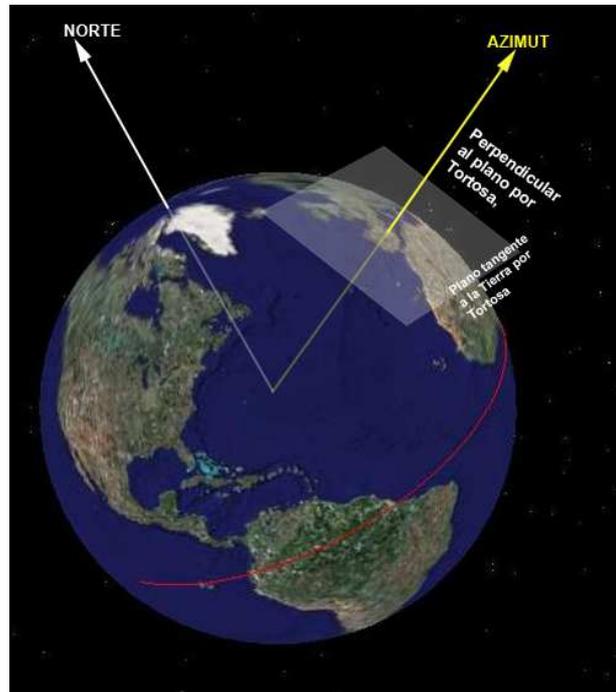


Figura 2.14: Factores geométricos de azimut del plano terrestre¹⁰

- ✓ **Ángulo de inclinación del plano (véase la figura 2.15)**, Corresponde al ángulo formado entre el plano y la superficie (horizontal) terrestre.

¹⁰ Gráfica obtenida la página web: <http://pisana.wordpress.com/2007/05/02/6-el-azimut/>

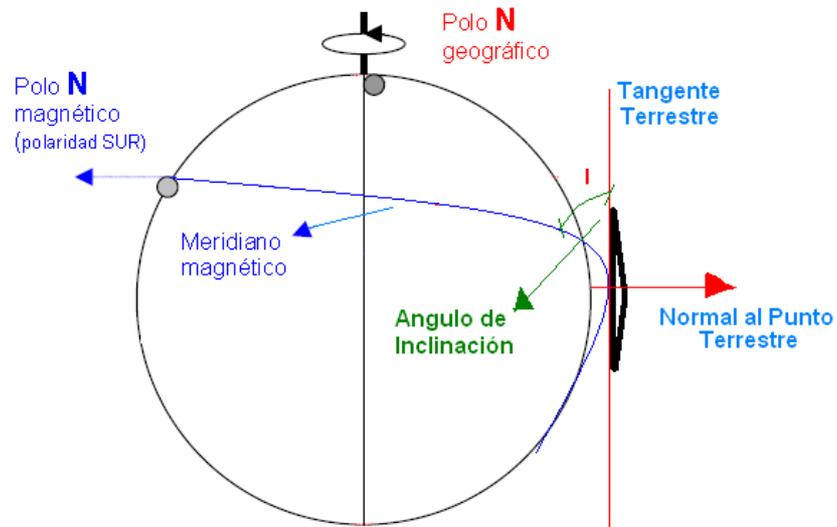


Figura 2.15: Factores geométricos por ángulo de inclinación del plano terrestre¹¹

- ✓ **Día del año (véase la figura 2.16)**, Para cada día del año se tiene una distinta posición del Sol. Los días se miden utilizando el sistema Juliano, donde los días van desde N=1 (1 de enero) hasta N=365 (31 de diciembre). En años bisiestos, se llega hasta N=366. Conocidas todas las variables anteriores para un determinado lugar y momento, es posible calcular el ángulo que finalmente define la radiación solar directa sobre un plano, el que corresponde al ángulo formado entre la normal del plano y el rayo proveniente del Sol.

¹¹Gráfica obtenida la página web: http://www.colmagnet.org/p_quienes_somos_view.asp

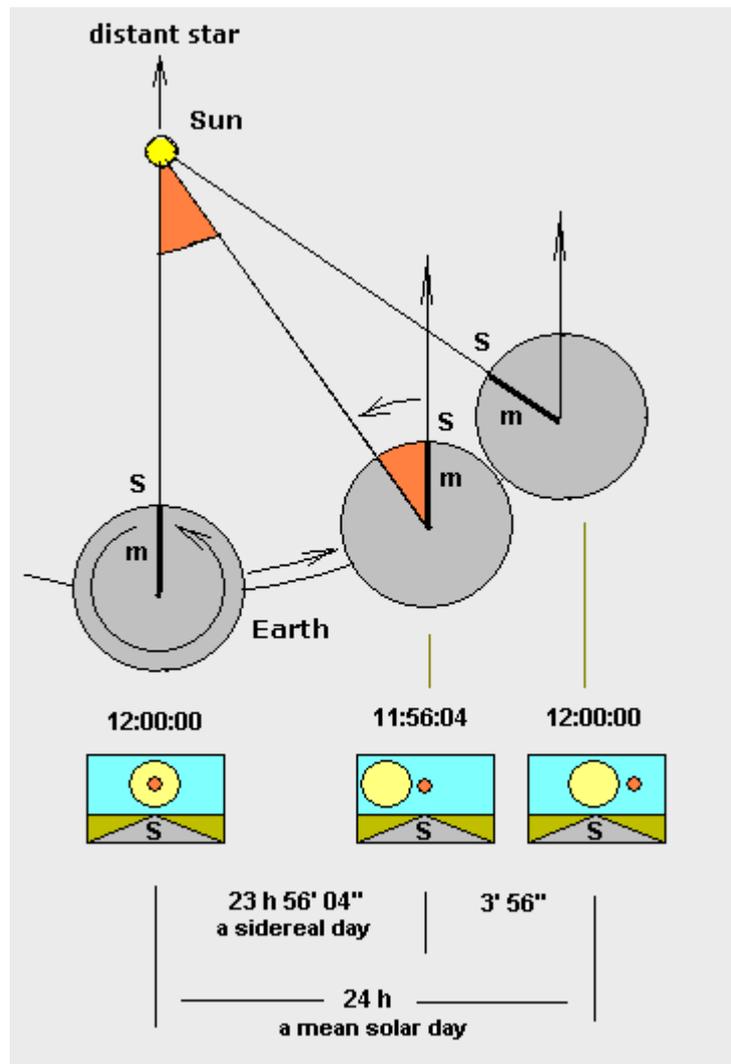


Figura 2.16: Factores geométricos por día del año con respecto al sol¹²

¹² Gráfica obtenida la página web: <http://foro.meteored.com/astrologia/duda+sobre+ortos+y+ocazos-t117007.0.html>

CAPÍTULO 3. Estado del Arte de Sistemas de Tecnología Solar Fotovoltaica

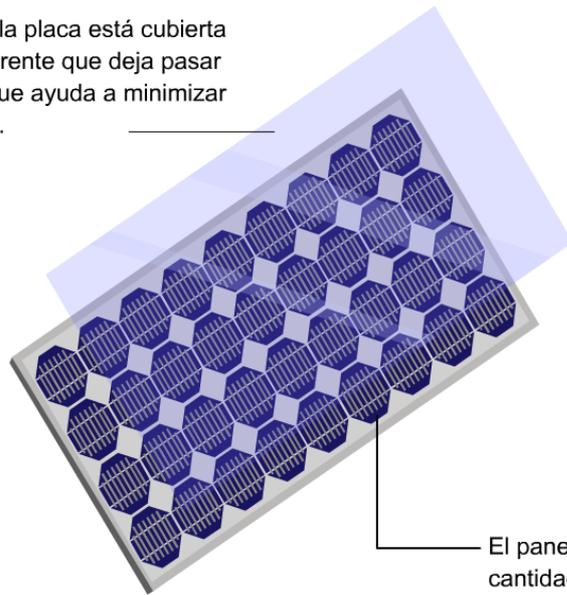
3.1 Antecedentes de la Energía fotovoltaica

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el físico francés A. E. Becquerel en sus estudios sobre las celdas electrolíticas. Varios años después, en 1873, W. Smith descubrió la fotoconductividad en el selenio. Tres años más tarde, en 1876, el efecto fotovoltaico fue observado por G. W. Adams y R. E. Day en una estructura semiconductor de selenio. La primera celda de selenio fue descrita en 1883 por C. D. Fritts. En 1884 Hallwach observó la fotosensibilidad de estructuras de cobre/óxido de cobre (Cu/Cu₂O), y E. H. Kennard y E. O. Diterich ligaron el efecto fotovoltaico con la existencia de una barrera.

La energía solar fotovoltaica consiste en el aprovechamiento de la luz del sol (radiación electromagnética) que incide sobre una célula fotovoltaica (fotoeléctrica, véase la figura 3.1) que produce energía eléctrica. Entonces, la célula fotovoltaica es un dispositivo electrónico que genera energía eléctrica de forma directa al recibir la luz solar. La celda fotovoltaica está compuesta de un material semiconductor, generalmente silicio; cuando los fotones inciden (rayo de luz del sol) en una de las caras del panel solar genera una corriente eléctrica producida por el efecto fotovoltaico.

La conversión de la luz solar en electricidad sin las complicaciones de almacenar el calor solar y hacerlo pasar luego a través de un ciclo termodinámico tiene un gran atractivo por su simplicidad y finalmente por su bajo costo. Sin embargo la obtención de paneles solares de bajo costo ha sido un objetivo difícil.

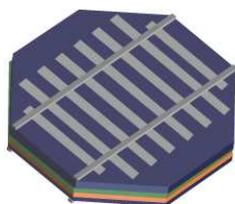
La parte superior de la placa está cubierta con un vidrio transparente que deja pasar la radiación solar y que ayuda a minimizar las pérdidas de calor.



El panel es formado por una cantidad determinada de células fotovoltaicas cuyo número dependerá del voltaje requerido.

Figura 3.1: Panel solar con celdas fotoeléctricas o fotovoltaicas. Fuente: Consumer.es

Una célula fotovoltaica estándar de 100x100 mm (véase la figura 3.2) produce 3 [A] y 0,5 [V], el rendimiento máximo obtenido en pruebas laboratorio (donde se construye el panel) es de 22% y el valor real es de un 13%. La fabricación de estas células resulta un proceso realmente costoso, tanto económicamente como en tiempo. Aunque el material con el que están fabricadas (silicio, véase la figura 3.3) es muy abundante en la tierra, su procedimiento es laborioso y complicado: se requieren hornos especiales para elaborar los tochos de silicio, de los cuales se cortarán posteriormente las obleas (células), motivo por el cual resulta todavía un producto de alto costo.



La célula fotovoltaica es el elemento encargado de transformar la energía solar en eléctrica. Cada célula produce entre 0,4 y 0,5 voltios (V) aproximadamente.

Figura 3.2: Una celda solar fotovoltaica estándar. Fuente: Consumer.es

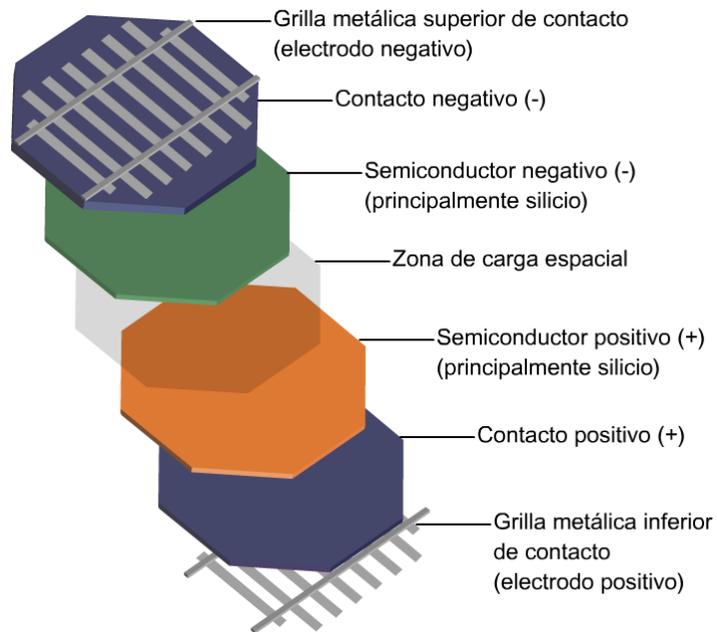


Figura 3.3: Composición de una celda solar fotovoltaica. Fuente: Consumer.es

Es importante que todas las células que componen un panel fotovoltaico tengan las mismas características, lo que significa que después de la fabricación de las mismas, hay que seguir un delicado proceso de clasificación y selección. Estas células se combinan en serie (véase la figura 3.4), para aumentar la tensión (V) o en paralelo, para aumentar la corriente sin aumentar la tensión. Los paneles comerciales suelen ser de 12 ó 24 voltios en corriente continua, los cuales a su vez pueden combinarse para conseguir las potencias adecuadas a cada necesidad (ver figura 3.5).

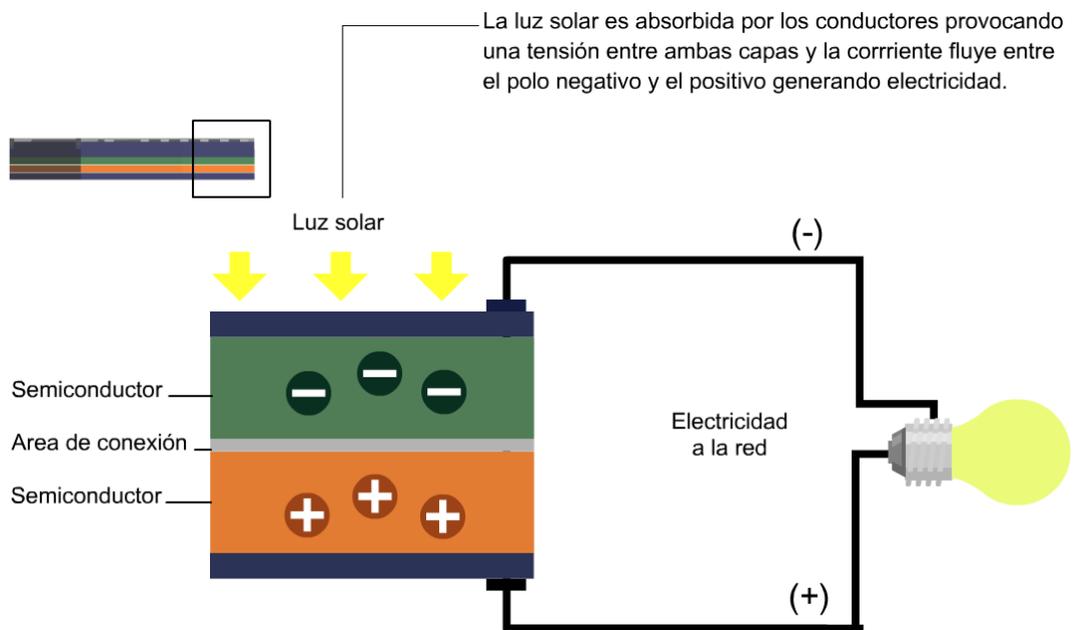


Figura 3.4: Conexión en serie de una celda solar fotovoltaica. Fuente: Consumer.es



Figura 3.5: Paneles solares fotovoltaicos que producen distinta corriente continua¹³.

¹³ Gráfica obtenida la página web: <http://domokyo.com/paneles-solares-de-muy-bajo-coste/>

Las potencias comerciales van desde los 5Wp¹⁴ hasta 180Wp. La energía eléctrica generada mediante este sistema puede ser aprovechada de dos formas: para verterla en la red eléctrica o para ser consumida en lugares aislados, donde no existe una red eléctrica convencional.

Debido a este aprovechamiento de la energía del sol (solar), se es capaz de llevar energía eléctrica, a una escuela o a un centro de salud situados en un lugar remoto (rural); no existiría la necesidad de construir una central convencional el mismo que contaminaría el medio ambiente con sus gases tóxicos. Tampoco sería necesario construir tendidos eléctricos, pues la energía fotovoltaica aislada de red se produce allá donde hay sol y donde se consume. También son aplicados en casas residenciales o ciudadelas para disminuir los costos y consumo de energía eléctrica, como se puede ver en la figura 3.6.

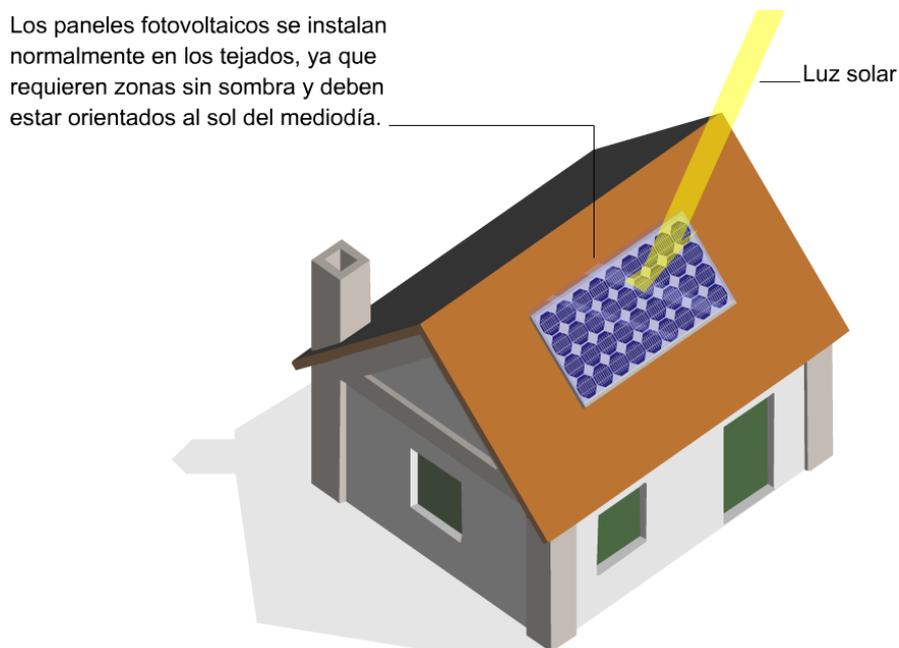


Figura 3.6: Paneles solares fotovoltaicos que producen distinta corriente continua.

Fuente: Consumer.es

¹⁴ **Wp**, potencia pico de los paneles o células fotovoltaicas se establece en condiciones estándar de medida: a 1000W/m², 25°C. Suponiendo que esta potencia en las instalaciones variará dependiendo del lugar geográfico y la época del año.

En la práctica operacional, los paneles solares tienen la ventaja sobre los modos de conversión térmica de que un panel solar responde linealmente al flujo. Cuando la intensidad solar fluctúa, la salida desciende. El mejor aprovechamiento de la energía solar (mayor eficiencia y menor costo) depende en buena medida de los futuros avances en la investigación y desarrollo de materiales.

3.2 Instalaciones de celdas fotovoltaicas.

Una instalación fotovoltaica tiene como objetivo producir electricidad a partir de la energía solar. La energía solar fotovoltaica tiene multitud de aplicaciones, desde la aeroespacial hasta juguetes pasando por las calculadoras y la producción de energía a gran escala para el consumo en general o a pequeña escala para consumo en pequeñas viviendas.

Se diferencian dos tipos de instalaciones: **las de conexión a red**, donde la energía producida es utilizada íntegramente para la venta a la red eléctrica de distribución, y **las aisladas de red**, que se utilizan para autoconsumo, ya sea una vivienda aislada, una estación repetidora de telecomunicación, una baliza de señalización en el mar, etc.

A continuación se explicará cada una por separado:

- **Instalaciones de conexión a red (véase figura 3.7)**, son aquellas instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red general de distribución tienen como objetivo vender toda la producción preferiblemente en instalaciones de más de 100 kW y de \$ 0,08 kWh. Estas instalaciones se pueden realizar en cualquier lugar que disponga de conexión a la red de distribución.

Se pueden instalar en el tejado de una vivienda o nave industrial, azotea plana, en el suelo sobre estructura fija, en el suelo igualmente, pero en una estructura móvil que sigue al sol, aumentando de esta forma la producción; también se instalan en zonas rurales donde se pueden agrupar varios usuarios para realizar varias conexiones y fomentar la producción de energía de origen no fósil. Como indica el esquema de conexión (ver figura 3.7), estas instalaciones están compuestas del campo de paneles fotovoltaicos, de un inversor que transforma la corriente continua producida por los paneles en corriente alterna con las características de la red de distribución, unos equipos de protección, control y contadores de la energía vendida y consumida si la hubiera.

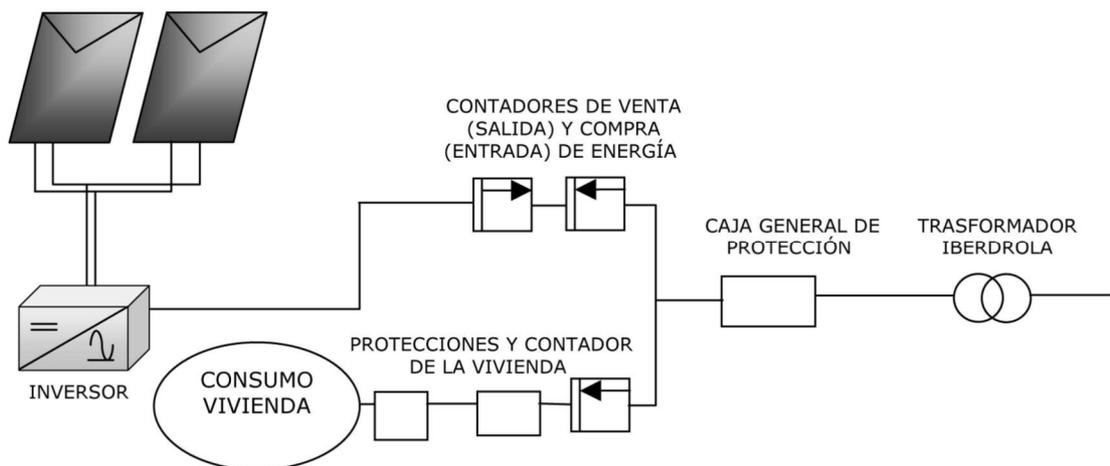


Figura 3.7: Esquema de la configuración de una instalación de conexión a red.

Fuente: autor.

➤ Instalaciones aisladas de red

Estas instalaciones se utilizan para electrificación de viviendas y edificios, alumbrado público, aplicaciones agropecuarias y ganaderas, bombeo y tratamiento del agua, antenas de telefonía aisladas de la red, etc. Están compuestas (ver la figura 3.8) por los paneles solares, el regulador de carga y una batería; ésta sería la

configuración básica, en la que el consumo sería en corriente continua.

Otra configuración básica es el bombeo solar, compuesto por los paneles, un pequeño equipo y la bomba, en el que se bombea agua cuando hay sol, no necesitando baterías. Y la configuración más utilizada en viviendas es la que lleva paneles, regulador de carga, baterías e inversor, este último para convertir la energía acumulada en las baterías en corriente alterna.

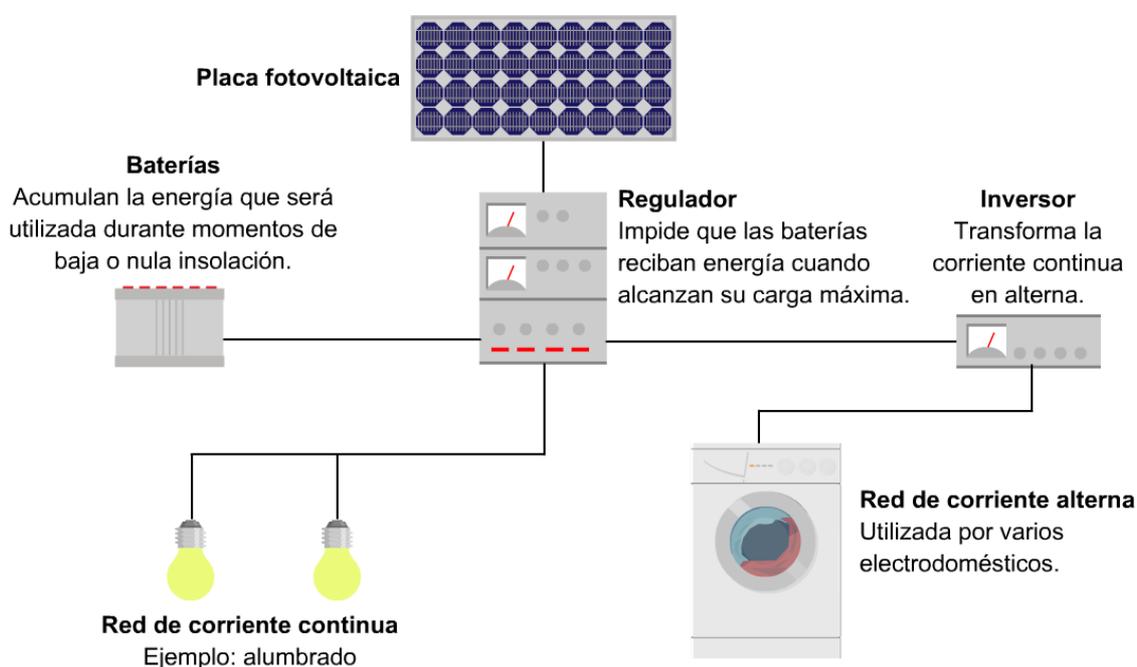


Figura 3.8: Esquema de la configuración de una instalación aisladas de red. Fuente: Consumer.es

➤ **Instalaciones Híbridas.**

Son aquellas que combinan los módulos fotovoltaicos (ver figura 3.9) con una o más fuentes energéticas auxiliares, como pueden ser los aerogeneradores, o los motores Diesel, de Gas Natural, o las Pilas de Hidrógeno. Este sistema es más fiable que los anteriores, ya que al disminuir la dependencia de captación y generación de electricidad del sistema fotovoltaico, el suministro

no se ve comprometido al ser complementado por otro tipo de generación ya sea renovable o no renovable.

Además tiene mejor rendimiento medioambiental al combinar en algunos casos varios sistemas de energías renovables. Este tipo de instalaciones parecen ser las que resolverán en el futuro las necesidades energéticas en zonas urbanas, mediante el aprovechamiento de diferentes fuentes de energía, seleccionadas en base a su rentabilidad económica y satisfacción de las necesidades de los usuarios.

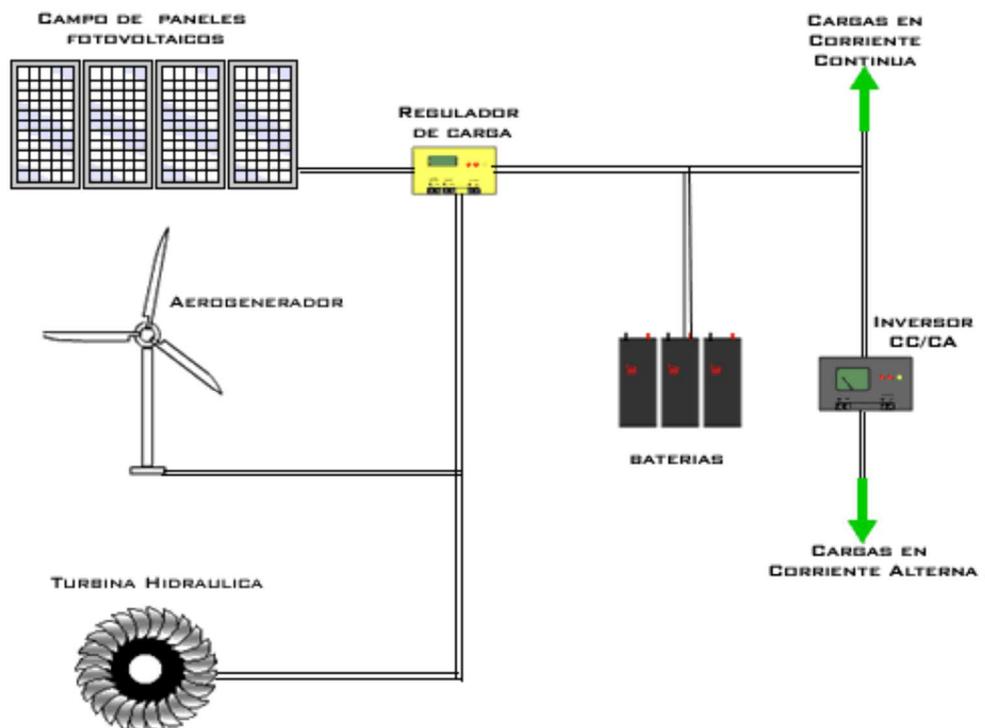


Figura 3.9: Esquema de la configuración de una instalación híbrida. Fuente: Consumer.es

No obstante, como es evidente, este tipo de instalaciones no se generalizará hasta que sea rentable para su usuario, bien porque obtenga subvenciones para su instalación, bien porque el coste de la energía

eléctrica consumida sea más alto que el generado por una instalación híbrida. En nuestro caso (instalaciones en edificios de viviendas en entorno urbano), nos centraremos en las instalaciones conectadas a red y las instalaciones híbridas.

En ambos casos, se ha de definir el sistema de generación adecuado al edificio que queremos dotar, ya sea con generadores estáticos o con sistema de seguimiento. Asimismo se ha de definir si el sistema manera se convierte algo del calor en energía aprovechable. El resultado es una excelente célula solar compuesta.

La investigación de base para esta generación se está supervisando y dirigiendo por parte de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para determinar si esta tecnología es viable o no. Entre las compañías que se encuentran trabajando en esta cuarta generación se encuentran Xsunx, Konarka Technologies, Inc., Nanosolar, Dyesol y Nanosys.

Este tipo de instalaciones parecen ser las que resolverán en el futuro las necesidades energéticas en zonas urbanas, mediante el aprovechamiento de diferentes fuentes de energía, seleccionadas en base a su rentabilidad económica y satisfacción de las necesidades de los usuarios. No obstante, como es evidente, este tipo de instalaciones no se generalizará hasta que sea rentable para su usuario, bien porque obtenga subvenciones para su instalación, bien porque el coste de la energía eléctrica consumida sea más alto que el generado por una instalación híbrida.

En nuestro caso (instalaciones en edificios de viviendas en entorno urbano), nos centraremos en las instalaciones conectadas a red y las instalaciones híbridas. En ambos casos, se ha de definir el sistema de

generación adecuado al edificio que queremos dotar, ya sea con generadores estáticos o con sistema de seguimiento.

3.2 Aplicaciones de celdas fotovoltaicas.

A continuación se detallarán ejemplos las diferentes aplicaciones que podrían realizar con las celdas fotovoltaicas:

Bombeo directo:

- Para calcular el consumo de energía hay que tener en cuenta la cantidad de litros necesarios por día, la altura a la que se encuentra el agua en el pozo y la capacidad del depósito de acumulación. Con estos datos tendremos que consultar programas específicos de cálculo que existan en el mercado o consultar tablas en los manuales de los equipos específicos a instalar.
- Instalación solar para bombeo de 2.500 litros diarios de agua a una altura de 10m. para invierno y 5.000 litros para verano. Potencia instalada 200 Wp.
- 2 paneles de 100 Wp cada uno, de cualquier marca comercial como puede ser Isofotón, B.P., etc.
- Bomba SQ Flex solar.
- Acoplador IO-100.
- Inversión aproximada: \$ 4.805

Vivienda de ocio:

- Necesitaríamos alimentar 6 lámparas de 11 vatios cada una durante tres horas al día.
- Utilizaríamos el método de cálculo de los amperios-hora, y la instalación la realizaremos a 12 voltios.

- Potencia que generaría es 200 Wp.
- 2 paneles de 100 Wp cada uno.
- Batería monoblock de 250 Ah, calculada para cubrir las necesidades de cuatro días.
- Regulador de 20 A.
- Inversor de 200 W de potencia.
- Inversión: \$ 3.089

Bodega:

- 10 puntos de luz de 18 W cada uno, durante cuatro días a la semana, un total de 16 horas semanales. Método utilizado de amperios-hora y la instalación a 12 V. Potencia instalada 400 Wp.
- 4 paneles de 100 Wp cada uno.
- Batería de 6 vasos de 2 voltios por vasos de plomo ácido de una capacidad de 626 Ah calculada para cubrir seis días sin radiación.
- Regulador de 45 A.
- Inversor de 400 W.
- Inversión: \$ 5.274

Vivienda habitual a 48 V:

- 10 puntos de luz de 11 W y 5 puntos de luz de 18 W con un uso diario de 3 horas cada uno. Refrigerador con un consumo diario de 700 Wh por día. Lavadora de 400 W de consumo con un uso diario de 1,5 horas (600 Wh día). Televisión de 95 W con un uso diario de 3 horas (285 Wh día). Ordenador de 300 W con un uso diario de 1 hora. Varios pequeños electrodomésticos de una potencia total de 500 Wh día. Potencia instalada 2.400 Wp. Instalación realizada a 48 V. Instalados en cuatros grupos de 6 paneles por grupo.
- 24 paneles de 100 Wp cada uno.

- Batería de 24 vasos de 2 voltios cada uno, con una capacidad de 900 Ah para cubrir seis días sin radiación.
- Regulador de 60 A.
- Inversor de 2.300 W.
- Inversión: \$ 21.830

Instalación aislada para un picadero realizada a 24 V:

- 4 puntos de luz de 35 W cada uno con un uso de cinco horas diarias para la pista exterior. 4 puntos de luz de 11 W para los boxes con un uso diario de 3 horas. 2 puntos de luz de 14 W para la entrada a la finca y la entrada a los boxes, con un uso diario de 2 horas. Potencia instalada 800 Wp.
- 8 paneles de 100 Wp cada uno.
- Batería de 12 vasos de 2 voltios cada uno con una capacidad de 600 Ah y una autonomía de seis días sin radiación.
- Regulador de 45 A.
- Inversor de 800 W.
- Inversión aproximada: \$ 13.567

Instalación repetidora de telecomunicaciones:

- Un equipo de telefonía de 33 W a 24 voltios funcionando las 24 horas del día, un equipo de telefonía de 7 W a 12 voltios funcionando las 24 horas del día, con una autonomía de baterías de 3 días. Potencia instalada 600 Wp.
- Instalación calculada a 24 voltios.
- 6 paneles de 100 Wp cada uno.
- Batería de 12 vasos de 2 voltios cada uno con una capacidad de 490 Ah y una autonomía de 3 días sin radiación.
- Regulador de 30 A.
- Convertidor de 12 V a 24 V.
- Inversión aproximada: \$ 8.605

Instalación conectada a red de 5 kW:

- Instalación solar para venta de la energía generada a la red general de distribución. Potencia instalada 6.720 Wp.
- 42 paneles de 160 Wp cada uno.
- Inversor de 5.000 W de potencia.
- Inversión: \$ 43.450.

Instalación de un seguidor solar de 5 KW:

- Instalación solar para venta de la energía generada a la red general de distribución mediante un seguidor solar de un eje. Potencia instalada 6.120 Wp.
- 36 paneles de 170 Wp cada uno.
- Inversor de 5.000 W de potencia.
- Inversión: \$ 51.340

3.3 Según el tipo de celda solar fotovoltaica

En este apartado, se analizarán los distintos tipos de tecnologías que existen en el mercado mundial en cuanto a celdas solares fotovoltaicas. Las mismas que han sido clasificadas en cuatro generaciones, indicando el orden de importancia y relevancia en la historia de evolución de las celdas solares. En la actualidad existen diversas investigaciones en las cuatro generaciones, en cuanto a las tecnologías de la primera generación ocupan un mayor mercado a nivel mundial en la producción comercial con 89.6% en el año 2007.

3.3.1 Celdas fotovoltaicas solares de Primera Generación [Luque, 02] [Luque, 03].

En la 1era generación de las celdas fotovoltaicas que son diseñados por elementos de mayor área que las habituales, de excelente calidad y única en el mercado, donde las tecnologías de esta 1era generación requieren de más energía (trabajo) para así impedir cualquier progreso significativo en la reducción de los gastos de producción.

Las celdas solares diseñadas con el semiconductor de silicio consideradas de uniones únicas, aproximándose teóricamente a una eficiencia máxima de un 33%, logrando igualdad de gastos con respecto a la generación de energía eléctricas con combustibles fósiles después de un periodo de recuperación de la inversión de 5 a 7 años. El principio de operación de las celdas fotovoltaicas solares es que son diseñadas con un semiconductor (material) llamado silicio (Si, ver figura 3.9) para la 1era generación, mismos que son para la construcción de los chips microelectrónicos.



Figura 3.8: Barra de silicio policristalino¹⁵.

¹⁵ Imagen obtenida de la página web: http://3.bp.blogspot.com/XxO1CH0w3jQ/So-CKt_j7jI/AAAAAAAAAAc/X6Rah0v3rVk/s320/barra+de+silicio+polocristalino.jpg

En un semiconductor los fotones o cuantos de luz de suficiente energía bombean a los electrones desde la llamada banda de valencia, donde suelen encontrarse, a la llamada banda de conducción, más energética. Ambas bandas están separadas en el eje de energías por la llamada banda prohibida. Desde esta banda de conducción los electrones pueden extraerse a un circuito exterior mediante un contacto metálico hecho en una región llamada "tipo n", fabricada dopando (impurificando) localmente el semiconductor con un elemento químico adecuado; fósforo, por ejemplo, en el caso del silicio.

Tras perder su energía en realizar el trabajo eléctrico que se desee (encender luces, poner en marcha la lavadora, etc.), los electrones se retornan a la banda de valencia del semiconductor en cuestión mediante otro contacto a una región llamada "tipo p", dopada con otro elemento químico; por ejemplo, boro en el silicio. La tecnología de las células de primera generación, las de silicio cristalino, que dominan el mercado actual, debe ser constantemente mejorada, y las empresas españolas deben poder acceder a las mejoras necesarias.

Sin agotar las posibilidades, pues las tres empresas españolas fabricantes de módulos son capaces de acceder a la investigación y a la tecnología externas, estas empresas pueden contar con la colaboración de los varios centros universitarios con capacidad en esta tecnología, es decir, básicamente, el IES, el Instituto de Microelectrónica del País Vasco y el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, con las colaboraciones más puntuales de otros centros en tecnologías próximas, tales como el CIEMAT, la Universidad Rovira y Virgili de Cataluña y la Universidad Autónoma de Madrid.

De hecho, tanto Isofotón, que está basada principalmente en tecnología generada en España, como muy principalmente BP Solar, a pesar

de que su tecnología de base es australiana, colaboran intensamente con los centros citados en el desarrollo de procesos más eficientes para fabricar células de silicio, principalmente con fondos de origen europeo. BP Solar ha declarado en ocasiones que el IES era su principal centro de apoyo externo en I+D, aunque esta situación puede cambiar por el reciente desplazamiento del centro de gravedad de la corporación hacia los EEUU. AstroSolar/Atersa, que ha puesto en marcha la fabricación de células, aunque con un apoyo tecnológico básico de origen estadounidense, colaborarán sin duda en breve con los centros españoles para perfeccionar o adaptar lo que pueda ser menester de la tecnología que están implementando.

Un efecto previsible de la nueva estructura de apoyo a la I+D empresarial en España es el establecimiento de una red mucho más tupida de colaboraciones entre las empresas españolas, hoy todavía principalmente Isofotón, y los laboratorios públicos de I+D. La creación de una red intensa de esta naturaleza no estaba favorecida por la anterior situación de dependencia básica de fondos europeos, que en cambio favorecían la colaboración siempre muy interesante con centros europeos. Sin duda ambas fuentes de fondos se complementan mutuamente, y debe evitarse la ausencia de cualquiera de ellas.

3.3.2 Celdas fotovoltaicas solares de Segunda Generación [Luque, 03].

Las celdas fotovoltaicas de 2da generación se desarrollaron para mejorar los requisitos de energía eléctrica y minimizar gastos de producción de las celdas fotovoltaicas. Existen variedad de técnicas como una alternativa de construcción, consideradas como buenas porque reducen las altas temperaturas en la fabricación. Por lo tanto estas técnicas para fabricación provocan que los costos de producción (materiales) resulten más económicos.

En la 2da generación de las celdas solares fotovoltaicas, los materiales más utilizados con éxito han sido las películas finas como por ejemplo el telururo de cadmio, seleniuro de cobre, seleniuro de indio, silicio amorfo y silicio micromorfo. Las mismas que son aplicadas a un sustrato de vidrio o cerámica, reduciendo así su masa y los costos. Por esto los fabricantes se inclinan por las de 2da generación.

Junto a las células de primera generación, de silicio mono y multicristalino, podemos hablar de las de segunda generación, células que, o bien no son de silicio cristalino, tales como las células de capa delgada, o bien las que siendo o no de silicio cristalino, utilizan luz concentrada para su operación. Las células de capa delgada suscitan, desde hace mucho tiempo, el interés de los investigadores. Sin embargo sólo el silicio amorfo ha suscitado interés de los grandes inversores para una comercialización, quizás prematura, y los bajos rendimientos así como la inestabilidad inicial de esta célula, han reducido su mercado prácticamente al de aplicaciones de consumo, no energéticas, tales como relojes y calculadoras.

Nuevos materiales como el CIS y el CdTe constituyen hoy día una promesa que parece sólida, y hay grandes compañías en fase de iniciar una fabricación que se espera sea de mayor éxito que las células de Si-a, una vez aprendidos de los errores que aquella industrialización prematura trajo consigo. De todas maneras los fabricantes de células de Si frecuentemente defienden que, con una producción masiva, sus células pueden llegar a reducciones de costes semejantes a las que prometen las células de capa delgada.

En el fondo, extrapolando, puede ser fácil determinar el coste que pueden llegar a tener las células de Si cristalino. Mucho más difícil es determinar el coste real de las células de capa delgada, que depende

grandemente de las prestaciones del producto obtenido y de los rendimientos de fabricación, conceptos ambos que requieren una fabricación piloto para determinarlos (y que en todo caso son mantenidos en secreto por los que, mejor o peor, los conocen).

La situación en España para las células de capas delgadas es menos favorable. Hay una investigación sólida en el CIEMAT, que se completa con la brillante actuación, aunque menos consolidada, del Departamento de Física Aplicada y Óptica de la Universidad de Barcelona y la de la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. Sin embargo, no hay ninguna compañía en España que se haya interesado en este tema.

En estas circunstancias la única actividad a la que pueden entregarse los grupos españoles, muy importante sin duda, es a la de colaborar con actuaciones europeas de ámbito supranacional. En el caso de los sistemas de concentración, como en el de las células de capa delgada, el concepto es igualmente antiguo, y su éxito en la industrialización y comercialización, aún más escaso. En parte, esto se ha debido a que los sistemas de concentración tienden a ser demasiado grandes en comparación con los paneles planos, y suelen tener órganos móviles.

Probablemente los motivos de compra de los módulos fotovoltaicos actuales rechazan estas dos características. Así las cosas, se ven forzados a competir por precio y en esto no suelen poder hacerlo con la energía convencional. Sin embargo, es casi seguro que los sistemas de concentración tienen el potencial de ser más baratos que los de módulo plano.

Ocurre también que si bien hay excelentes células de laboratorio para concentración, la exigüidad de los mercados ha impedido la creación de compañías comerciales que las fabriquen. De esta manera, el desarrollo de

sistemas fotovoltaicos de concentración es hoy virtualmente imposible, excepto para quienes tengan en su mano la capacidad de fabricar células de concentración. Además, los problemas tecnológicos no triviales de evacuación de calor, encapsulado de células y fabricación barata de una estructura óptica móvil no están tampoco completamente resueltos.

En esta área, la situación española es muy favorable. Aunque la actividad industrial en concentración fotovoltaica es más importante en EEUU, el IES es un centro con más de veinte años de experiencia que, por ejemplo, ha ganado una ayuda de I+D en EEUU, junto con la empresa americana Sunpower Corp. en la que es públicamente calificada como una de las más competentes del mundo en óptica sin imagen.

Además, surgen otras. Isofotón ha tomado posición en dos acciones específicas: por una parte, el desarrollo de un concentrador estático con células bifaciales, de pequeñas dimensiones y concebido como una persiana veneciana, usando una nueva técnica de diseño de los concentradores --la técnica SMS inventada en el IES-- para aplicaciones específicas de los edificios conectados a la red. Estos tipos de productos no tienen ningún órgano móvil y permiten concentraciones hasta 4x, con el consiguiente ahorro de silicio.

La otra acción es el desarrollo de concentradores de AsGa, de alto rendimiento con niveles de concentración 1000x necesarios para pagar el elevado precio del material de partida. El montaje de este tipo de concentrador se inspiraría en el usado para los diodos LED, que se fabrican hoy a millones a precios reducidos. También la óptica en este caso es del IES, sintetizada por el método SMS y las células de AsGa han sido desarrolladas en el IES, en colaboración con el Instituto Ioffe de San Petersburgo, y alcanza rendimientos del 26.2% a 1000x, el mayor del mundo a esa concentración.

3.3.3 Celdas fotovoltaicas solares de Tercera Generación [Luque, 03].

Existe una tercera generación de células solares que ya comienza a despuntar. Por tercera generación nos referimos a células que no siguen el esquema básico de funcionamiento de una célula solar tradicional. Estas células solares de tercera generación permiten eficiencias de conversión eléctrica teóricas mucho mayores que las actuales y un precio de producción mucho menor. Se trabaja en diversas líneas de investigación, entre las que se encuentran:

- ✓ Dispositivos de más de un ancho de banda prohibida para la conversión óptima de fotones a varias longitudes de onda diferentes.
- ✓ Modificación del espectro de luz incidente (para incluir el espectro de UV e infrarrojo durante la noche).
- ✓ Aprovechamiento del calor producido dentro de la célula.

Entre otras, se consideran tecnologías de célula solar de tercera generación las siguientes:

- ✓ Células multi-unión (de más de un ancho de banda prohibida). La mayor eficiencia eléctrica conseguida hasta la fecha (41,1%) se ha obtenido con uno de estos dispositivos.
- ✓ Nanoestructuras de silicio
- ✓ Alza conversores (Upconverters) / baja conversores (downconverters)
- ✓ Células de portadores calientes (hot-carrier cells)
- ✓ Células termoeléctricas
- ✓ Nanoestructuras de silicio
- ✓ Células de banda intermedia
- ✓ Células con pozos cuánticos

En España se ha puesto en marcha el Proyecto Singular Estratégico Fotomol, para incrementar el conocimiento sobre la célula solar orgánica y la célula fotovoltaica Graetzel (también conocida como célula solar sensibilizada por colorante). Este dispositivo nanoestructurado se forma con nanopartículas de dióxido de titanio, un material muy abundante y no tóxico.

La nanoestructura de dichas nanopartículas, multiplica en un factor 1000 el área en que un colorante absorbido en la superficie, puede ser fotoexcitado y generar fotocorriente, con una eficiencia de conversión de luz en electricidad de 10%. Simula de forma artificial la fotosíntesis que se realiza en las plantas. Por ahora este dispositivo está limitado por problemas de estabilidad.

El nuevo “nanoobjeto” que proponen consiste en los llamados nanohilos coaxiales, o barras a escala nanométrica que absorben mayor cantidad de luz que una superficie plana porque se aprovechan los laterales de la estructura. “Los nanohilos conseguidos hasta la fecha muestran unas excelentes propiedades de fotoluminiscencia en el infrarrojo cercano.

Se pretende que la eficiencia de conversión de la energía solar de esos hilos microscópicos alcance el 40%, cuando actualmente las células fotovoltaicas comercialmente disponibles fabricadas de silicio no superan el 12% de eficiencia. “El silicio, material inorgánico, por sí solo absorbe una limitada cantidad de energía solar. Por lo que se está estudiando añadir un colorante orgánico (que contiene carbono) para mejorar la capacidad de absorción. En este caso hablamos de células solares híbridas”.

La segunda aproximación con la que trabajan en la UV para multiplicar la cantidad de luz captada consiste en combinar en una célula solar varios semiconductores con diferente ancho de banda en forma de nanohilo coaxial. Estos materiales de naturaleza inorgánica actúan como

conductores de electricidad o como aislantes dependiendo de ciertas condiciones.

El concepto de célula de tercera generación ha sido acuñado con la creación en Australia del "Centro Especial de Investigación para Foelectricidad de Tercera Generación". Sin embargo, este concepto se ha ido fraguando en la última década, como una respuesta novedosa que aprovecha también las más recientes tecnologías. Se trataría en este caso de conseguir células solares que trascendieran el concepto antes explicado, y que por lo tanto no estuviera sometido a sus límites, que en el mejor de los casos no podrían permitir un rendimiento mayor del 40%, según las leyes de la termodinámica.

Es de señalar que la mejor célula de segunda generación ha alcanzado un rendimiento del 27,6%, que representa el 78% del que impone el límite termodinámico para la estructura y las condiciones de medida utilizadas. Varias son las maneras de trascender esos límites. Es conocida de antiguo la utilización de varias células solares en "tandem". Se trata en este caso de conjuntos de células solares ordinarias, cada una sometida al límite de SQ, pero que consideradas como un todo lo superan.

Constituidas por diversos materiales, y por consiguiente con bandas prohibidas diferentes, se apilan unas sobre otras, la primera la de mayor banda prohibida, y así sucesivamente, de manera que los fotones más energéticos son absorbidos por la primera, los siguientes por la siguiente, etc. Rendimientos cercanos al 87% se podrían alcanzar usando un número infinito de estas células en condiciones ideales. En el momento actual la empresa **Spectrolab** y el **Laboratorio Nacional de Energías Renovables**, ambos de **EEUU**, han conseguido ya un rendimiento del 32.2% con una estructura de tres células solares de fofuro de indio y galio sobre arseniuro de galio, todo ello sobre germanio.

Este tipo de células son muy caras, pero trabajando a 1000x, y con la óptica apropiada, por ejemplo la que se está desarrollando en el IES¹⁶ para las células de AsGa a 1000. Se podrían llegar a alcanzar, en climas apropiados, costes en el rango de 3.5 centavos de dólar por kWh lo que es menos que en muchas de las técnicas actuales de producción de electricidad.

De todas maneras el desarrollo de las células tandem para muy alta concentración, aunque estimado posible, no se ha abordado todavía, según nos indican Antonio Luque y Gabriel Sala, del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, aunque sí a nivel de investigación. Aún sin llegar a estos límites de calidad, células de capa delgada, por ejemplo de Si amorfo, en tandem con células de CSi amorfo de mayor banda prohibida y de GeSi amorfo, de menor banda prohibida, se están usando para generar células tandem que, no estando constreñidas por el rendimiento de la célula de SQ, tienden hacia valores superiores del rendimiento, quizás los necesarios para hacer rentables estas células.

De hecho, alguna compañía de EEUU está investigando en células basadas en este concepto. En España la colaboración Isofotón-IES señalada antes sobre concentradores a 1000x, se continuaría con el desarrollo de células tandem de alto rendimiento para concentración, usando los concentradores SMS explicados antes. También el CIEMAT tiene los medios para avanzar en el desarrollo de materiales tipo CSi y GeSi amorfos, para tandems de capa delgada.

Por último, el IES ha avanzado una propuesta de una nueva célula de tercera generación. Se trata de usar dos fotones en un semiconductor con una banda prohibida muy ancha para bombear un electrón a la banda de

¹⁶ IES, Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, ha sido sin duda condición necesaria, aunque no suficiente, desde luego, para llevar a España a la primera liga de la energía fotovoltaica y situarla en los primeros puestos de los mercados mundiales.

conducción. Para ello propugnamos crear una banda permitida de energías en medio de la banda prohibida, de manera que un primer fotón bombearía al electrón de la banda de valencia a la intermedia, y el segundo la bombearía desde ella a la de conducción. Por supuesto, los fotones de mayor energía podrían efectuar el bombeo sin pasar por la banda intermedia.

La elevada anchura de la banda prohibida permitiría suministrar los electrones al circuito exterior con una energía libre elevada. Además, al contrario de lo que ocurre en las células solares normales, en las que los fotones con energía inferior a la banda prohibida no son absorbidos y no hacen ningún efecto, en éstas las transiciones con la banda intermedia permitiría el uso de los fotones menos energéticos. Los límites teóricos del rendimiento de estas células se encuentran por encima del 60%.

Por lo tanto, la tercera generación de células fotovoltaicas que se están proponiendo en la actualidad son muy diferentes de los dispositivos semiconductores de las generaciones anteriores, ya que realmente no presentan la tradicional unión p-n para separar los portadores de carga fotogenerados.

Para aplicaciones espaciales, se están estudiando dispositivos de huecos cuánticos (puntos cuánticos, cuerdas cuánticas, etc.) y dispositivos que incorporan nanotubos de carbono. Para aplicaciones terrestres, se encuentran en fase de investigación dispositivos que incluyen células foto electroquímicas, células solares de polímeros, células solares de nanocristales y células solares de tintas sensibilizadas.

3.3.4 Celdas fotovoltaicas solares de Cuarta Generación [Luque, 03].

Una hipotética cuarta generación de células solares, según el Instituto de Tecnología de Nueva Jersey, consistiría en una tecnología fotovoltaica compuesta en la que se mezclan, conjuntamente, nanopartículas con polímeros para fabricar una capa simple multiespectral. Células que son más eficientes, y baratas. Basadas en esta idea, y la tecnología multiunión, se han usado en las misiones de Marte que ha llevado a cabo la NASA.

La primera capa es la que convierte los diferentes tipos de luz, la segunda es para la conversión de energía y la última es una capa para el espectro infrarrojo. De esta manera se convierte algo del calor en energía aprovechable. El resultado es una excelente célula solar compuesta. La investigación de base para esta generación se está supervisando y dirigiendo por parte de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para determinar si esta tecnología es viable o no. Entre las compañías que se encuentran trabajando en esta cuarta generación se encuentran Xsunx, Konarka Technologies, Inc., Nanosolar, Dyesol y Nanosys.

CAPÍTULO 4. Componentes que forman un Sistema Fotovoltaico

4.1 Generalidades

En este capítulo veremos los componentes de un sistema fotovoltaico, las características de estos componentes, los criterios y cuidados para la instalación y puesta en operación de infraestructura para el aprovechamiento de la energía solar. Así, los objetivos de este tema son:

- Identificar los componentes de un sistema fotovoltaico
- Comprender los principios básicos de funcionamiento de los principales componentes
- Comprender las principales características de estos componentes con vista a su utilización en sistemas fotovoltaicos.

4.2 Tipos de Instalaciones Fotovoltaicas

Durante mucho tiempo el aprovechamiento de la energía solar se limitó a situaciones en las que era imposible o muy costosa la extensión de las líneas eléctricas. Pero hoy en día esto ha cambiado radicalmente. El uso de la energía solar se ha extendido debido a la disminución en el costo de los sistemas, la constante mejora en las características técnicas de los componentes de estos sistemas y al creciente interés, a nivel mundial, por la generación de energías limpias y renovables.

Los componentes de un sistema fotovoltaico varían según las aplicaciones para las que se utilizan. Estas aplicaciones pueden clasificarse en:

- Sistemas fotovoltaicos independientes
- Sistema mixtos de generación de energía

- Sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución de energía eléctrica

A continuación describimos cada aplicación.

4.2.1 Sistemas Fotovoltaicos independientes.

Los sistemas fotovoltaicos independientes son aquellos en los que la única fuente de energía es la producida por el panel solar y, por lo tanto, no están conectados a otros sistemas de generación de energía ni a la red de distribución eléctrica. Ya que solamente se produce energía cuando el sol alumbra, generalmente este grupo de aplicaciones requiere de un subsistema de almacenamiento para que la energía esté disponible cuando no haya luz solar.



Figura 4.1: Conexión directa de la salida del panel a la carga.

El esquema de conexión más simple posible es conectar directamente la salida del panel solar a la carga, como se muestra en la figura 4.1. Este esquema es utilizado en proyectos a nivel de hobby o en cargadores de baterías recargables y otras aplicaciones sencillas. Otro esquema relativamente sencillo es aquel que utiliza un regulador de tensión entre la salida del panel solar y la carga, como muestra la figura 4.2. Este dispositivo utiliza un convertidor CC/CC (convertidor de corriente continua a corriente continua) para generar a la salida una tensión constante, diferente de la tensión de entrada, que algunos dispositivos necesitan para operar adecuadamente independizándola de las variaciones de tensión propias del panel.

Algunos dispositivos simples, como calculadoras y relojes, utilizan este esquema. Cuando la fuente de luz desaparece el panel no genera energía. Cabe recordar que los sistemas de iluminación artificial también generan fotones que los paneles solares pueden aprovechar, aunque la energía que puede ser generada con esta fuente de luz es pequeña.



Figura 4.2: Regulador de tensión

Los sistemas fotovoltaicos más comunes son los que utilizan algún sistema de almacenamiento de energía para los momentos en los que el panel solar no produce energía. El sistema de almacenamiento más utilizado es la batería química. La figura 4.3 muestra un diagrama en bloques del sistema. Mientras haya luz solar el panel solar carga la batería y además alimenta la carga, cuando el panel no genera energía eléctrica, la batería alimenta la carga.

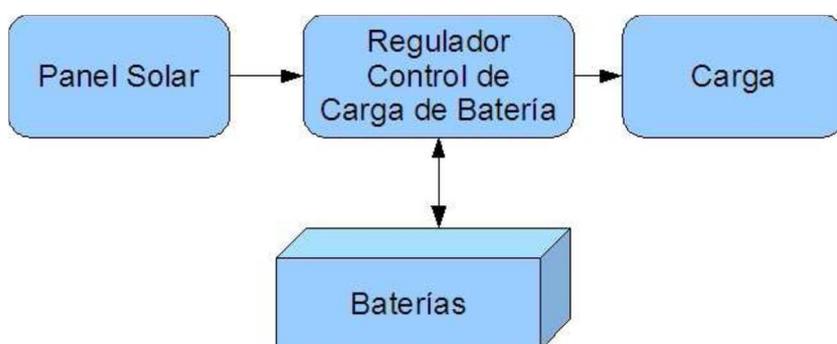


Figura 4.3: Panel solar con batería para el almacenamiento de energía.

Estos sistemas pueden o no tener un regulador de tensión hacia la carga. La función del control de carga de la batería es la de evitar dos situaciones que afectan grandemente la vida útil de una batería: la carga excesiva y la descarga excesiva. Algunos controladores de carga de batería utilizan una estrategia de control denominada seguidor de potencia máxima para optimizar el funcionamiento de todo el sistema.

Otra forma de almacenamiento consiste en aprovechar la energía potencial del agua de un tanque elevado. Evidentemente este esquema se utiliza para la provisión de agua utilizando energía solar. Mientras el sol ilumina el panel la bomba envía agua al tanque, cuando no se produce energía para accionar la bomba el agua almacenada en el tanque es utilizada (Ver figura 4.4).

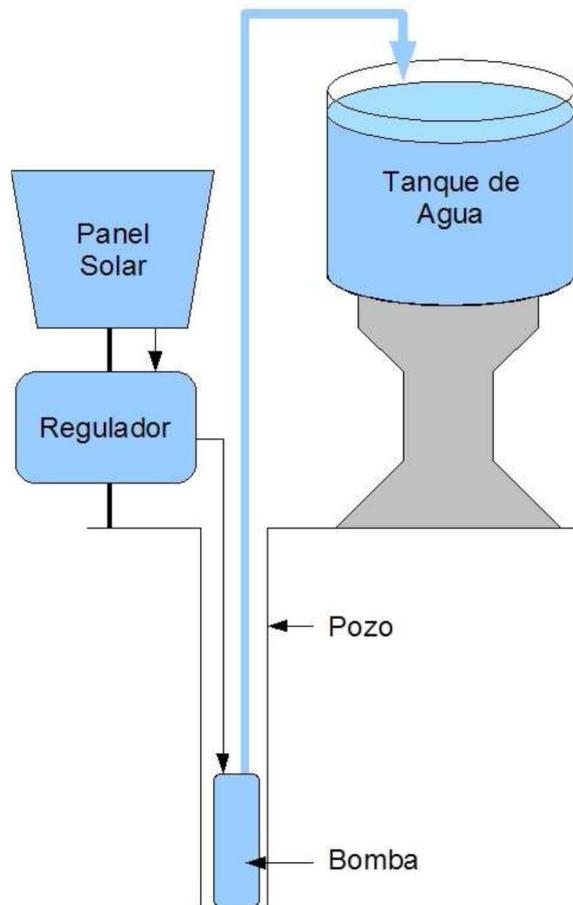


Figura 4.4: Almacenamiento de energía utilizando un tanque de agua.

En todas las situaciones presentadas anteriormente se ha supuesto que la carga requiere de una tensión continua para operar. Dado que la mayor parte de los electrodomésticos disponibles en el mercado utilizan corriente alterna en lugar de corriente continua en algunos casos es necesario disponer de un dispositivo que sea capaz de transformar la corriente continua, generada por el panel solar, en corriente alterna. A este

dispositivo se lo conoce con el nombre de inversor o convertidor CC/CA (convertidor de corriente continua a corriente alterna).

Cabe mencionar que existen electrodomésticos que utilizan corriente continua en lugar del corriente alterna, pero suelen ser más costosos. La figura 4.5 muestra un esquema de esta aplicación.

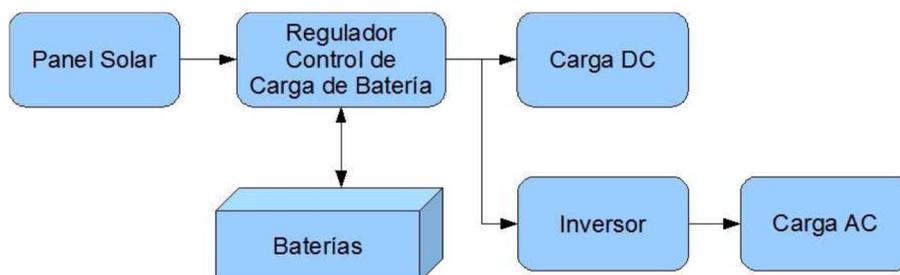


Figura 4.5: Sistema fotovoltaico con inversor.

4.2.2 Sistemas mixtos de generación de energía.

Son aquellos en los que se dispone, además de la energía solar, de otros medios de generación de energía eléctrica. Estos generadores podrían ser otros sistemas de generación limpios, como los eólicos, o generadores eléctricos conectados a motores de combustión. En este caso, los sistemas se complementan entre sí para entregar la cantidad de energía necesaria a la carga o para cubrir todas las horas de utilización requeridas.

Los generadores eólicos tienen un comportamiento de generación de energía eléctrica similar al panel solar por lo que la energía producida debe utilizarse para cargar el banco de baterías. Algunos reguladores comerciales disponen de entradas dobles: panel solar y generador eólico. En el caso de grupos generadores con motores de combustión, que producen corriente alterna, es necesario un circuito de conmutación que permite el intercambio de fuentes de alimentación (batería a grupo generador y viceversa) sin interrupciones en el suministro.

4.2.3 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución de energía eléctrica.

Entre los sistemas conectados a la red se distinguen dos tipos, por un lado aquellos que utilizan la energía solar para disminuir el consumo de energía de la red de distribución de tal forma a reducir los costos, y, por otro lado, aquellos que pueden proveer el exceso de energía producida por el sistema fotovoltaico a la red. Estos últimos normalmente tienen un incentivo gubernamental por ser energías de producción limpia y, en particular, en el caso de la energía solar tienen la ventaja de que el pico de producción de energía generalmente coincide con el pico de consumo.

Los sistemas que tienen por objetivo reducir el consumo de la energía de la red de distribución eléctrica tienen componentes como los que se muestran en la figura 4.6. Las baterías almacenan el exceso de producción, si lo hubiere, para cuando se necesite. En algunos casos podría no utilizarse baterías, la energía producida por el panel fotovoltaico es consumida mientras ilumine el sol, en días nublados o por la noche, la carga se alimenta de la red de distribución eléctrica.

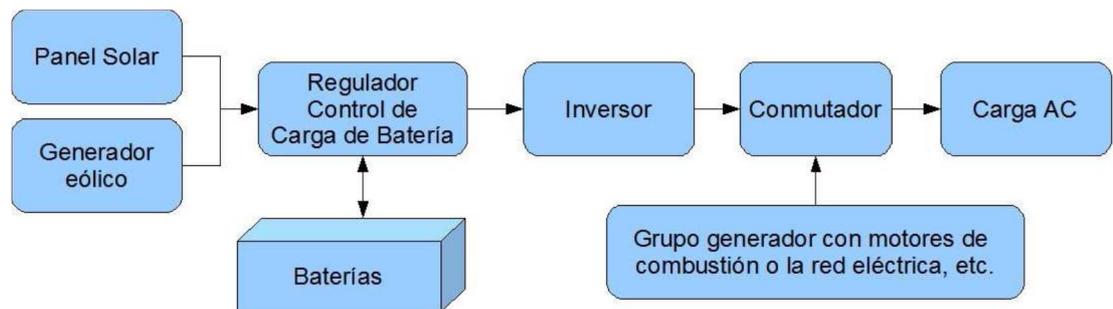


Figura 4.6: Sistemas mixtos de generación de energía.

En este caso es importante considerar si las horas de mayor producción de energía del sistema fotovoltaico permiten un ahorro razonable.

El esquema de la figura 4.7 muestra los principales componentes de un sistema fotovoltaico que es capaz de entregar energía a la red de distribución eléctrica. Para que esto sea posible se requiere de un inversor que cumpla con las reglamentaciones de calidad de la red de distribución. Además el inversor debe sincronizarse en fase con la tensión de la red de distribución para poder proporcionar energía.

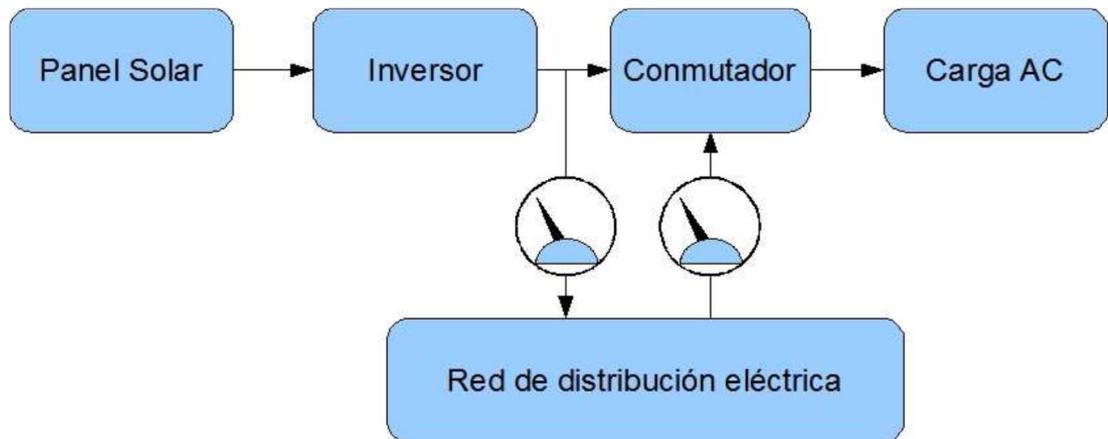


Figura 4.7: Sistemas conectados a la red.

El incentivo para la producción de energía limpia, como es la fotovoltaica, consiste en un precio mayor de la energía producida, en ciertos horarios, que la consumida. Si la energía es vendida a la empresa que presta el servicio de producción y distribución de energía eléctrica se requiere, además del medidor de la energía consumida, de un instrumento de medición de la energía proveída.

4.3 Componentes de un Sistemas Fotovoltaico.

En este apartado se describe el principio de funcionamiento de cada uno de los dispositivos mencionados en los párrafos anteriores.

4.3.1 Subsistema de captación de energía.

En los sistemas fotovoltaicos, el subsistema de captación de energía es aquel que convierte la luz solar en energía eléctrica y está compuesto por un conjunto de células fotovoltaicas. Para facilitar el transporte y el montaje de estas células fotovoltaicas, estas se ensamblan en módulos en la misma fábrica. El diseño del subsistema de captación consiste en, habiendo seleccionado el módulo adecuado, conectar varios de ellos para construir el panel solar.

4.3.3.1 Módulo fotovoltaico

Varias células fotovoltaicas se agrupa en lo que se denomina un módulo fotovoltaico. Este módulo proporciona soporte físico y protección mecánica a las células fotovoltaicas que lo componen.

En los módulos, las células fotovoltaicas están recubiertas por un material encapsulante, normalmente silicona, y por encima está cubierta con vidrio templado. Tanto el encapsulante como el vidrio deben ser transparentes y esta transparencia no debe verse afectada por la exposición constante a la luz solar. Para proveer el soporte mecánico se utiliza generalmente aluminio, disponiéndose de una chapa por debajo del módulo y perfiles en los costados.

Estos módulos disponen de bornes externos de contacto para la conexión eléctrica y elementos que permiten la sujeción mecánica a la estructura de soporte de todo el panel. La figura 4.8 muestra un esquema de un módulo solar compuesto por un conjunto de células fotovoltaicas.

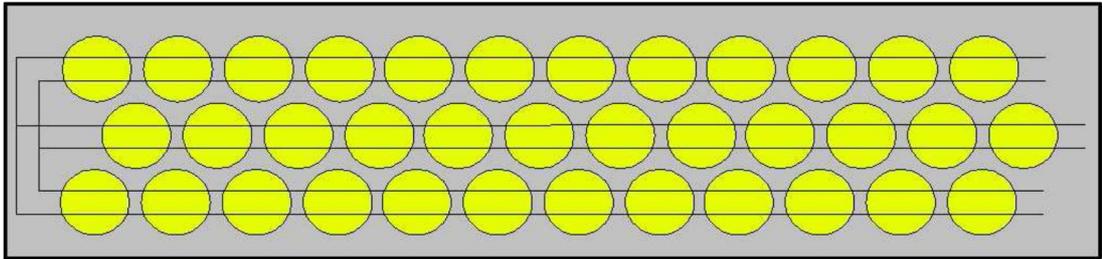


Figura 4.8: Módulo solar compuesto por un conjunto de células fotovoltaicas.

✓ **Módulos con células fotovoltaicas conectadas en serie.**

Desde el punto de vista eléctrico las células fotovoltaicas no se utilizan individualmente debido a su bajo voltaje que producen, por lo que generalmente las células se conectan en serie. Por ejemplo, los módulos diseñados para operar con baterías de 12 Voltios por lo que generalmente cuentan con 36 a 40 células fotovoltaicas. La figura 4.9 muestra el símbolo electrónico de una célula fotovoltaica.

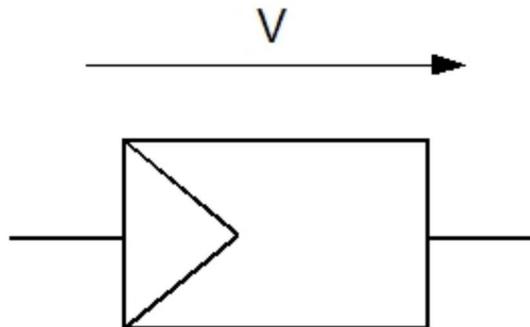


Figura 4.9. Símbolo electrónico de la célula fotovoltaica.

La figura 4.10 muestra un conjunto de n células fotovoltaicas conectadas en serie. En este esquema de conexión se cumple que:

$$V_T = \sum_{i=1}^n V_i$$

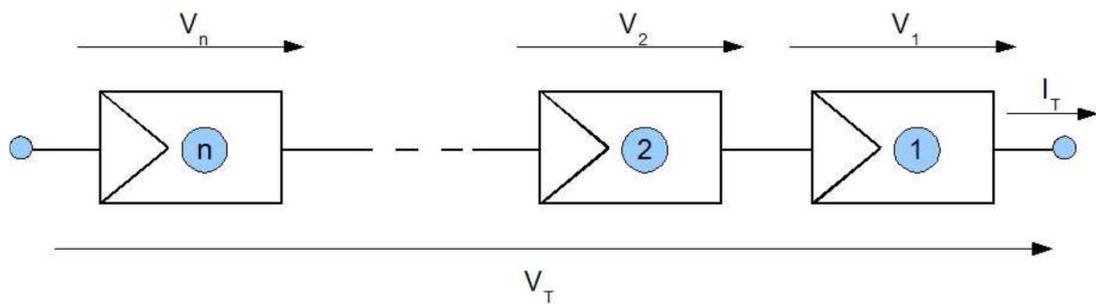


Figura 4.10: Células fotovoltaicas conectadas en serie.

Donde V_T es la tensión en los bornes del módulo. Si todas las celdas producen una misma tensión, es decir:

$$V_T = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

Entonces:

$$V_T = nV$$

La corriente que circula por el módulo es:

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

La tensión se eleva proporcionalmente a la cantidad de células conectas, mientras que la corriente que circula por cada célula es la misma.

✓ **Módulos con irradiación solar no homogénea**

Durante el funcionamiento en el campo de los módulos solares puede ocurrir que las células no reciban una irradiación solar homogénea. Esta situación puede darse por la sombra que algún objeto proyecta sobre el panel, excremento de aves, nieve, hojas o cualquier otro desecho que cae sobre el panel.

En esta situación, la o las células completamente cubiertas dejan de producir corriente y se convierten en carga para el resto de las células. La corriente que circula por esta célula no iluminada puede ser muy elevada, causando el efecto de punto caliente (hot spot), que es un área pequeña dentro de la célula, en la cual la temperatura es muy alta pudiendo dañar el encapsulado o destruir la célula misma.

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica, esta situación produce una gran pérdida de la potencia generada, en un ejemplo citado en [Quaschnig, 05], la pérdida es del orden del 70% para una superficie cubierta del 2% de un módulo. Para proteger las células se utilizan diodos de “bypass”, la función de estos diodos es anular la célula no iluminada.

Lo ideal sería disponer de un diodo por cada célula, pero, por lo general y debido a consideraciones económicas, se utiliza uno de estos diodos en paralelo con un grupo de 18 a 24 células [Quaschnig, 05]. Estos diodos se ubican dentro de la caja de conexión o embebidos en el marco del módulo. Cabe mencionar que estos diodos cumplen la función de proteger las células, pero no evitan la pérdida de potencia generada, así cuando un diodo de “bypass” conduce todo el conjunto de células que este protege quedan anuladas.

Un modelado matemático detallado de las células y paneles solares afectados por sombras se puede encontrar en [Quaschnig, 05].

✓ **Módulos con células fotovoltaicas conectadas en paralelo**

Otra alternativa de conexión de las células fotovoltaicas para conformar un módulo es en paralelo, en este caso las n células quedan conectadas como se muestra en la figura 4.11.

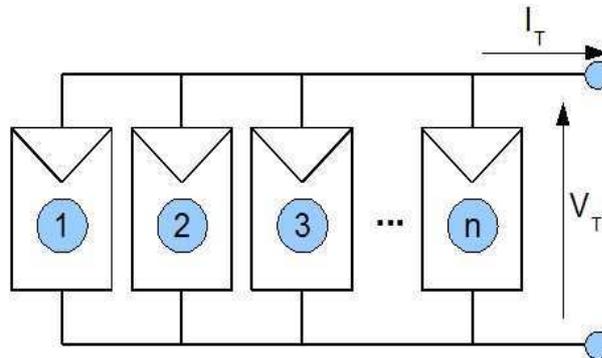


Figura 4.11: Células fotovoltaicas conectadas en paralelo.

Si la tensión de todas las células es la misma $V_T = V_1 = V_2 = \dots = V_n$, en este esquema de conexión se cumple que la tensión de salida del módulo es igual a la tensión de cualquiera de las células:

$$V_T = V_n$$

La corriente que circula por el módulo es:

$$I_T = \sum_{i=1}^n I_i$$

Suponiendo que todos los paneles son iguales y se encuentran en las mismas condiciones, entonces:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

Por lo tanto la corriente total de salida del módulo será:

$$I_T = nI$$

Este esquema de conexión es menos utilizado que la conexión en serie. Presenta la ventaja de ser significativamente menos susceptibles a las sobras parciales sobre el módulo y los problemas asociados de destrucción de las células es menos probable. Por otro lado presenta la desventaja de una tensión de salida baja, igual a la de una célula, mientras que la corriente de salida es proporcional al número de células.

Tomando en cuenta que la pérdida que se produce en los cables es proporcional a la corriente que circula por ellos es preferible, para una misma potencia, utilizar tensiones más altas.

4.3.3.2 Características de tensión – corriente de los módulos fotovoltaicos comerciales

La tabla 4.2 presenta algunos datos técnicos de módulos comerciales tomados de las hojas técnicas publicadas por los fabricantes. La tabla 1 identifica estos parámetros.

Símbolo	Definición
P_{MPP0}	Potencia Pico en condiciones estándar
V_{MPP0}	Tensión en el punto de potencia máxima P_{MPP0}
I_{MPP0}	Corriente en el punto de potencia máxima P_{MPP0}
V_{OC0}	Tensión de circuito abierto en condiciones estándar
I_{SC0}	Corriente de corto circuito en condiciones estándar
α_{Voc}	Coficiente de temperatura para la tensión
α_{Isc}	Coficiente de temperatura para la corriente
α_{MPP}	Coficiente de temperatura para la Potencia máxima

Tabla 4.1: Parámetros de las hojas técnicas de los fabricantes.

Los parámetros P_{MPP0} , V_{MPP0} , I_{MPP0} , V_{OC0} e I_{SC0} corresponden a aquellos medidos en las condiciones estándar de medida: con una irradiación solar de $1.000W/m^2$ (E_{1000}), masa de aire (AM) 1,5 y una temperatura del módulo de $25^\circ C$ (T_{25°)

Fabricante	Kyocera	AET Solar	Sharp	BP Solar	Siemens	Schott Solar
Modelo	K40T	C 123P	NE80EJEA	BP 585	SM55	ASE 260
P_{MPP0} (W _p)	43	123	80	85	55	260
V_{MPP0} (V)	17,4	17,2	17,3	18	17,4	57,1
I_{MPP0} (A)	2,48	7,16	4,63	4,72	3,15	4,55
V_{OC0} (V)	21,7	21,3	21,6	22,01	21,7	70,9
I_{SC0} (A)	2,65	8,12	5,16	5	3,45	4,91
Número de células	36	36	36	36	36	120
α_{Voc} (%/°C)	-0,378	-0,338	†	-0,35	-0,35	-0,38
α_{Isc} (%/°C)	0,043	0,04	†	0,028	0,035	0,10
α_{MPP} (%/°C)	-0,22	-0,5	†	-0,45	†	-0,47
Largo (mm)	526	616	537	537	329	1.336
Ancho (mm)	652	1.499	1.200	1.204	1.293	1.605
Diodos de "bypass"	2	2	†	2	2	†
Tipo de células	Poli-cristalina	Poli-cristalina	Poli-cristalina	Mono-cristalina	Mono-cristalina	Poli-cristalina

† No se dispone de este dato.

Tabla 4.2: Datos técnicos de las hojas técnicas de algunos módulos comerciales.

Para estimar las características de operación del módulo en condiciones diferentes a las que se indican en las hojas técnicas pueden utilizarse las siguientes ecuaciones [Quaschnig, 05]:

$$V_{OC} = V_{OC0} \frac{\ln(E)}{\ln(E_{1000})} \left[1 + \frac{\alpha_{Voc}(T - T_{25^\circ})}{100} \right]$$

$$I_{SC} = I_{SC0} \frac{E}{E_{1000}} \left[1 + \frac{\alpha_{Isc}(T - T_{25^\circ})}{100} \right]$$

$$V_{MPP} = V_{MPP0} \frac{\ln(E)}{\ln(E_{1000})} \left[1 + \frac{\alpha_{Voc}(T - T_{25^\circ})}{100} \right]$$

$$I_{MPP} = I_{MPP0} \frac{E}{E_{1000}} \left[1 + \frac{\alpha_{Isc}(T - T_{25^\circ})}{100} \right]$$

Donde $E_{1000} = 1.000 \frac{W}{m^2}$, $T_{25^\circ} = 25^\circ C$, E es la radiación solar actuante sobre el módulo, T es la temperatura del módulo. La relación de tensión y corriente de un módulo se puede estimar en función de los parámetros c_1 y c_2 :

$$C_1 = I_{SC} e^{-C_2 V_{OC}}$$

$$C_2 = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC}}\right)}{(V_{MPP} - V_{OC})}$$

La expresión que relaciona la tensión y la corriente es:

$$I = I_{SC} - C_1 e^{-C_2 V}$$

4.3.3.3 Panel Solar.

Los módulos fotovoltaicos son los componentes básicos del subsistema de captación. El diseño del subsistema de captación de energía consiste en determinar las características de los módulos a utilizar, la cantidad y tipo de conexión de estos módulos para obtener la tensión nominal y la potencia a generar. La figura 4.12 muestra un conjunto de módulos formando un panel solar.

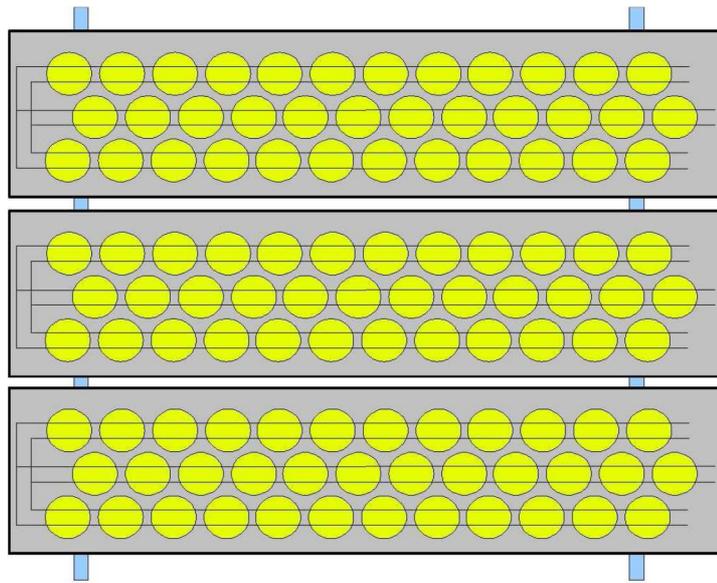


Figura 4.12: Panel solar compuesto por un conjunto de módulos solares.

Los paneles solares se pueden combinar en disposición serie para aumentar la tensión de salida o paralelo para aumentar la corriente generadas, o en una combinación de ambas para producir la corriente y la tensión requeridas por la aplicación (ver figura 4.13).

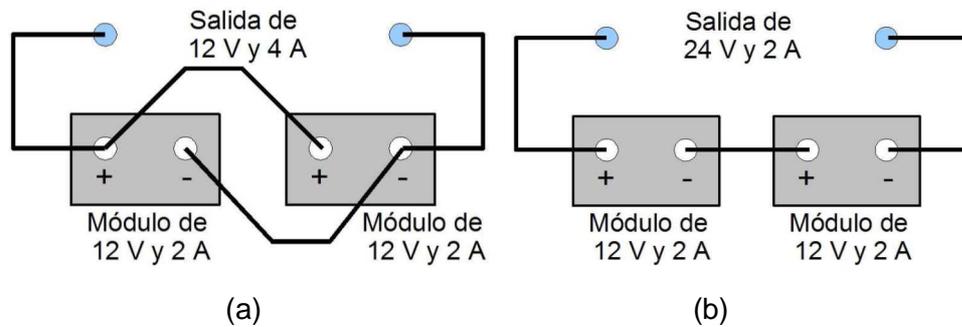


Figura 4.13: Paneles conectados en paralelo (a) y en serie (b).

En el caso de n módulos iguales conectados en serie, con una tensión de módulo V_m y una corriente de módulo I_m se cumple que:

$$I = I_m$$

$$V = nV_m$$

La conexión en paralelo de n módulos iguales, con una tensión de módulo V_m y una corriente de módulo I_m , cumple con las siguientes expresiones:

$$V = V_m$$

$$I = nI_m$$

4.3.3.4 Orientación y ángulo del Panel Solar.

Un elemento auxiliar muy importante en un sistema fotovoltaico es la estructura de soporte del panel solar. Esta estructura permite sostener adecuadamente el panel de forma que resista a la acción los elementos y orientar el panel adecuadamente para maximizar la energía generada. Con el fin de maximizar la energía obtenida de un panel solar es esencial su correcta ubicación con respecto al sol de tal forma a maximizar la irradiación.

Cuanto más perpendicular la luz incida sobre el panel mayor es la energía producida. Si el panel está fijo dos son los parámetros importantes para maximizar la energía producida a lo largo del día: por un lado el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal y por el otro la orientación del panel con respecto a los puntos cardinales (ver figura 4.14). En cuanto a la orientación, en el hemisferio norte los paneles deben orientarse hacia el sur, mientras que en el hemisferio sur deben estar orientado al norte.

La orientación debe ser hacia el norte o sur geográfico, que, en general, no se corresponde exactamente con el norte o sur magnético. En cuanto a la inclinación, esta depende de la latitud en la que se encuentre el panel. Mientras más cerca del ecuador se encuentra, menor debe ser el ángulo, mientras más lejos del ecuador mayor deberá ser el ángulo. Los fabricantes de paneles solares ofrecen algunas claves para la correcta selección del ángulo.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la estación del año, el ángulo de inclinación debe ser mayor en el invierno y menor en el verano. Si no es posible modificar el ángulo de inclinación del panel, sería conveniente posicionarlo para optimizar la energía producida durante el invierno. Otra alternativa sería disponer en el soporte de, al menos, dos ángulos de inclinación, uno para el verano y otra para el invierno.

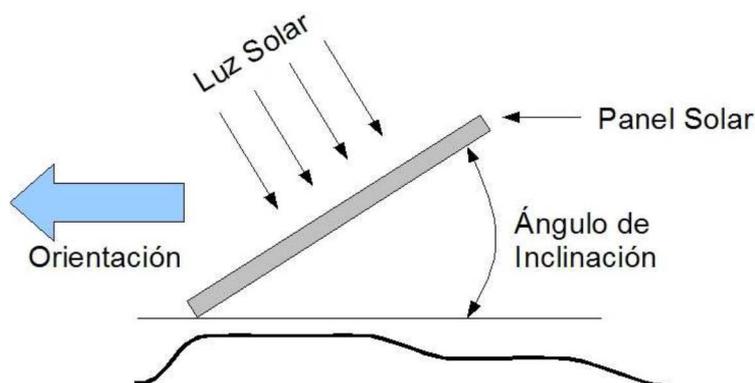


Figura 4.14. Orientación e inclinación del panel solar.

Es importante tener en cuenta, con relación a la ubicación de los paneles solares, que los mismos se encuentren completamente iluminados por la luz solar, sin sombras parciales. Como hemos mencionado, una sombra cubriendo parcialmente algunas células de un módulo puede hacer que el módulo completo reduzca drásticamente la energía producida inclusive hasta llegar a cero. Durante las operaciones de instalación de los paneles solares, es muy importante cuidar que estos estén cubiertos de la luz solar para evitar daños por cortocircuitos accidentales.

4.4 Subsistema de almacenamiento de energía.

Dado que el sol está disponible durante algunas horas del día y que algunos usos de la energía se centran por la noche, por ejemplo la iluminación artificial, algunos sistemas fotovoltaicos disponen de un sistema

de acumulación de energía. El sistema de acumulación de energía más comúnmente utilizado son las baterías químicas. La batería es un sistema electroquímico de almacenamiento de energía eléctrica, las más comúnmente utilizadas en sistemas fotovoltaicos son las baterías de ácido – plomo [Masters, 04] [Quaschnig, 05].

Considerando un estudio realizado por el Banco Mundial sobre electrificación rural y considerando no solamente el costo inicial, sino también los costos de mantenimiento y reemplazo, los paneles solares y las baterías representan los costos más altos de un sistema de aprovechamiento solar, ambos en igual proporción [Bopp, 98]. Existen otras tecnologías de baterías, como las de Níquel Cadmio (NiCd) que presentan una relación energía/peso muy buena, mayor cantidad de ciclos de carga y descarga, mayores corrientes de carga y de descarga y no presentan inconvenientes con las descargas profundas.

Un problema que presentan es que el Cadmio es peligroso para el ser humano ya que se acumula en los tejidos y puede dañar órganos y producir cáncer. La tecnología de baterías que está reemplazando a las baterías NiCd son las de Níquel Metalhidruro (NiMH). Estas baterías presentan todas las ventajas de las de NiCd, con una mayor densidad de energía. Al no contener Cadmio es más amigable con el medio ambiente, aunque también utiliza pequeñas cantidades de otros productos tóxicos.

La principal desventaja es que, al tener una resistencia interna mayor, no se comportan bien cuando se necesita una alta corriente de descarga y tiene una mayor autodescarga. Las dos tecnologías mencionadas tienen en común la desventaja importante del mayor costo con relación a las de ácido – plomo, por esta razón solamente se utiliza en situaciones en las que se justifica este mayor costo. A continuación se presentan las características más resaltantes de las baterías químicas del tipo ácido – plomo.

4.4.1 Baterías de ácido – plomo.

En el año 1800 el físico de origen italiano Alessandro Volta presenta a la Real Sociedad de Londres la primera pila o batería moderna. Esta consistía en un conjunto de discos puestos uno encima del otro de cobre, luego zinc, luego paño mojado con agua acidulada y luego cobre otra vez y así sucesivamente, formando una pila de discos, de allí su nombre. La parte inferior de la pila (zinc) es el contacto negativo y la parte superior de la pila (cobre) el positivo (ver figura 4.15).

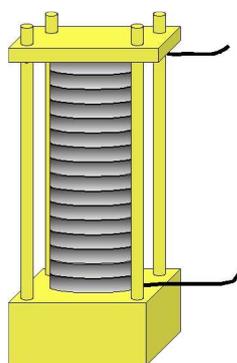


Figura 4.15: Esquema de la pila de Volta.

En 1860 Gaston Planté (1834-1889), científico francés, construyó un acumulador que utilizaba electrodos de plomo y electrolito de ácido sulfúrico diluido, muy similar a los que se utilizan hoy en día. La pila de Volta tenía el problema de que la intensidad de la corriente producida era muy baja. Planté construyó este dispositivo para acumular la energía de una o más pilas de Volta, para luego devolverla con mayor intensidad en menor tiempo. De ahí el nombre que le dio a su invento.

Este invento pasó desapercibido en su época. En 1879, el mismo Planté volvió a presentar su invento, esta vez con mayor interés, debido a que la electricidad tenía para ese entonces un uso generalizado.

Camilo Faure en 1881 desarrolla una variante del acumulador de Planté que permitió su fabricación industrial. La industria automotriz le dio un gran impulso al desarrollo de los acumuladores. Es importante mencionar que, desde el punto de vista del medio ambiente, las baterías de ácido – plomo son peligrosas ya que pueden producir contaminación por plomo si no son adecuadamente desechadas o recicladas.

4.4.1.1 Funcionamiento de las Baterías de ácido – plomo.

Como se había mencionado antes, las baterías de ácido – plomo almacenan energía química, esta reacción es reversible, por lo que pueden ser recargadas. Estas baterías están compuestas por un conjunto de celdas como la que se muestra en figura 4.16 conectadas en serie para obtener la tensión nominal de la batería.

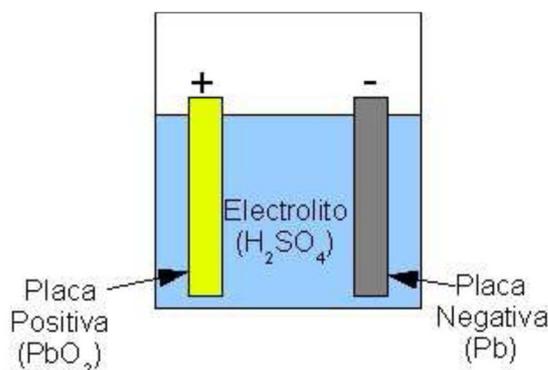
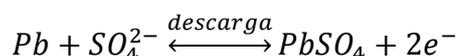


Figura 4.16. Celda de una batería de ácido – plomo.

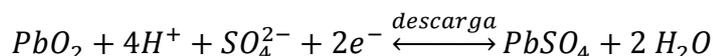
Generalmente la tensión producida por cada celda es de aproximadamente 2 Voltios y la tensión nominal de la batería suele ser de 12 o 24 voltios. El terminal positivo (cátodo) es óxido de plomo (PbO₂) y el terminal negativo (ánodo) plomo (Pb) esponjoso, el electrolito es ácido sulfúrico (H₂SO₄) disuelto en agua (H₂O). Al producirse la descarga el plomo tanto del cátodo como del ánodo se convierten en sulfuro de plomo (PbSO₄) liberando cargas eléctricas.

El proceso de carga convierte nuevamente el sulfuro de plomo en plomo y óxido de plomo, componentes originales del terminal negativo y el positivo, absorbiendo cargas eléctricas en el proceso.

Reacción en terminal negativo:



Reacción en el terminal positivo:



Algunos fabricantes combinan el plomo de los terminales con calcio o antimonio para mejorar ciertas características, como por ejemplo la vida útil de la batería o la resistencia interna de la batería. Si la batería es cargada en exceso se produce el fenómeno de electrólisis del agua por el cual se libera oxígeno (O₂) en el terminal positivo e hidrógeno (H₂) en el terminal negativo. El hidrógeno es un gas inflamable y por otro lado la combinación de hidrógeno y oxígeno también puede ser peligrosa, por lo que es muy importante mantener las baterías en un lugar bien aireado. Por esta misma razón se requiere de mantenimiento, que consiste en verificar el nivel del electrolito de la batería y agregar agua destilada hasta el nivel recomendado por el fabricante.

4.4.2 Características de las baterías ácido – plomo

a) Tipos de baterías según su construcción y su uso

Desde el punto de vista de su construcción se pueden diferenciar dos tipos de baterías de ácido – plomo en el mercado, las denominadas húmedas y las de gel. Las baterías húmedas tienen el electrolito en forma líquida. Para ciertas aplicaciones esto puede ser un problema ya que implica la posibilidad de derrame del ácido.

También requieren de mantenimiento, el cual consiste en agregar agua destilada para compensar la pérdida por la emisión de gases (H_2 y O_2) hasta el nivel recomendado por el fabricante. Siendo que los materiales que utilizan este tipo de baterías son fáciles de conseguir el costo de la misma es relativamente bajo.

Otro tipo de baterías húmedas son las que utilizan la tecnología AGM, siglas en inglés de “*Absorbed Glass Mat*”, en español estera de fibra de vidrio absorbente. En este tipo de baterías el electrolito se encuentra absorbido por capilaridad (saturadas a $\approx 95\%$) en una estera de fibra de vidrio que se ubica entre las placas positiva y negativa de la celda. Aunque no son secas técnicamente, tienen las mismas características que las secas.

Generalmente son baterías selladas que no dejan salir los gases que se producen durante la operación de la batería, sino que los recombinan en agua (H_2O) por lo que no requieren de ningún mantenimiento. Por razones de seguridad disponen de válvulas para liberar presión de los gases en el caso que esta supere un valor máximo determinado. Gracias a que la estera de fibra de vidrio absorbe el electrolito pueden ubicarse en cualquier orientación.

Las baterías secas son las que se denominan también de gel. En estas se agrega al electrolito dióxido de silicio (SiO_2) que lo inmoviliza. Como en el caso de las baterías AGM, las de gel favorecen el proceso químico que permite recombinar el oxígeno y el hidrógeno para producir agua nuevamente con lo que ambas son generalmente libres de mantenimiento por el tiempo de su vida útil. También pueden ubicarse en cualquier orientación ya que el electrolito no es líquido.

Desde el punto de vista del uso de las baterías existen varios tipos:

- ✓ **Baterías de arranque:** este tipo de batería son las más comunes ya que se utilizan para el arranque de los automóviles. También son las más baratas. En operación, normalmente se encuentran completamente cargadas y solamente en el arranque se descargan entregando, en muy poco tiempo, una gran cantidad de corriente. Las más comunes son baterías húmedas, por lo que requieren reponer el agua al electrolito periódicamente. No están diseñadas para descargas profundas, para no reducir su vida útil la descarga no debe superar el 20% de su capacidad nominal. El tiempo de vida útil de este tipo de baterías suele ser de un año.

- ✓ **Baterías de tracción:** se utilizan para accionar motores eléctricos de vehículos pequeños, como carros de golf, sillas de ruedas, carretillas elevadoras, etc. El costo es mayor que las baterías de arranque y pueden soportar descargas profundas, del orden del 80% de su capacidad nominal. Además tienen una vida útil superior. Suelen utilizar la tecnología AGM o de gel.

- ✓ **Baterías estacionarias:** son las baterías utilizadas en fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS), luces de emergencia, sistemas de telecomunicaciones, etc. Estas baterías se cargan constantemente y eventualmente sufren una descarga lenta pero constante durante un tiempo. Tienen una vida útil larga (>10 años) y soportan bien las descargas profundas. Seleccionar las baterías adecuadas para sistemas fotovoltaicos depende de cada aplicación, generalmente las mejores serían las que permitan un ciclo de descarga profunda, bajo mantenimiento y una vida útil larga para amortizar mejor los costos.

Existen fabricantes que diseñan baterías específicamente para este tipo de aplicaciones, estas serían evidentemente las más aconsejables. Pero existen aplicaciones en las cuales se utilizan baterías de arranque debido a su disponibilidad y bajo costo, a pesar de que son las menos recomendables para sistemas fotovoltaicos, esto se da generalmente cuando el costo es el factor limitante.

b) Capacidad de almacenamiento de energía

La capacidad de almacenamiento de energía de una batería se mide en Amperios por hora (Ah), este valor nos indica la cantidad de corriente que es capaz de entregar, a la tensión nominal de la batería, durante una hora de descarga. Por ejemplo, una batería de 100 Ah es capaz de entregar 100 amperios durante una hora, 50 amperios durante dos horas o 1 amperio durante 100 horas.

Otra variante de indicación de capacidad de carga, utilizada normalmente en las baterías de descarga profunda y en particular aquellas utilizadas en sistemas fotovoltaicos, se da en amperios por hora para 100 horas de descarga (C_{100}). De esta forma si una batería tiene una capacidad $C_{100} = 100$ Ah, la corriente nominal de descarga es de $I_{100} = C_{100} / 100$ horas = 1A. Esta medida se utiliza debido al efecto Peukert, el cual está directamente relacionado con la resistencia interna de la batería.

Mientras más alta es la corriente de descarga más energía se disipa, en forma de calor, en la resistencia interna y por lo tanto es menor la capacidad de corriente que puede entregar a la carga. En otras palabras, la capacidad de la batería es inversamente proporcional a la velocidad de descarga. La figura 4.17 ilustra este efecto.

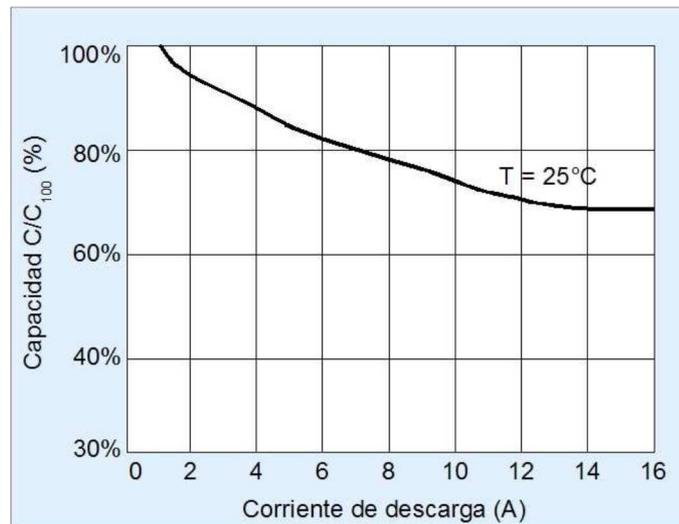


Figura 4.17: Capacidad utilizable relacionada con C_{100} en función de la corriente de descarga para una temperatura $T=25^{\circ}\text{C}$.

En el caso de las baterías de arranque para automóviles, normalmente se indican dos medidas importantes:

- ✓ **CCA (Cold Cranking Amperage):** La cantidad de corriente que una batería puede entregar durante 30 segundos a una temperatura de 0°F (-18°C) mientras la tensión de la batería se mantiene por encima de un valor mínimo utilizable. Esta medida tiene relación con la necesidad de entregar mucha corriente durante un tiempo relativamente corto aún en climas extremos. Una batería de descarga profunda tendría en este parámetro un valor muy bajo.

- ✓ **RC (Reserved Capacity):** es el número de minutos durante los cuales una batería puede entregar 25 Amperios mientras la tensión de la batería se mantiene por encima de un valor mínimo utilizable (27°C). Esta medida es similar a Ah para 100 horas de descarga y en el caso de las baterías de descarga profunda este valor es superior a las de arranque.

c) Eficiencia de la carga

La eficiencia de carga de una batería se define como la relación entre la cantidad de carga que entrega durante la descarga y la que recibe durante el proceso de carga. Se diferencian dos tipos de eficiencia, la eficiencia en Amperios por hora (η_{Ah}) y la eficiencia en Watts por hora (η_{Wh}). La eficiencia en Amperios por hora considera solamente la corriente, mientras que la eficiencia en Watts por hora considera tanto la corriente como la tensión de la batería, las siguientes expresiones definen ambas medidas de eficiencia:

$$\eta_{Ah} = \frac{\int_0^{t_d} I_d dt}{\int_0^{t_c} I_c dt}$$

$$\eta_{Wh} = \frac{\int_0^{t_d} V_d I_d dt}{\int_0^{t_c} V_c I_c dt}$$

Donde V_d es la tensión de descarga, I_d es la corriente de descarga y t_d es el tiempo de descarga, mientras que V_c , I_c y t_c son los correspondientes parámetros de carga. Una eficiencia de carga del 100% implica que toda la carga entregada a la batería es devuelta luego por ella. La eficiencia de carga en Amperios por hora de una batería de ácido – plomo se encuentra entre 80% y 90%. Los valores de eficiencia en Watts por hora son 10% inferiores [Quaschnig, 05].

d) Ciclos de carga y descarga. Profundidad de descarga

El número de ciclos de carga y descarga que una batería es capaz de soportar es un parámetro muy importante a la hora de diseñar un sistema fotovoltaico. Normalmente este parámetro está relacionado con la profundidad de la descarga (DoD, siglas en inglés de “Depth of Discharge”).

Las baterías de arranque para automóviles no deben descargarse más del 20% para no comprometer la vida útil de la batería, a este tipo de baterías se las conoce también como de descarga superficial.

Las baterías de tracción o estacionarias generalmente permiten una mayor profundidad de descarga, del orden del 80% como máximo. Por esta razón se las conoce como baterías de descarga profunda. Una característica común a todas las baterías de ácido – plomo es que a medida que la profundidad de la descarga aumenta disminuye la cantidad de ciclos de carga – descarga que la batería puede soportar. La figura 4.18 muestra un ejemplo que ilustra esta situación.

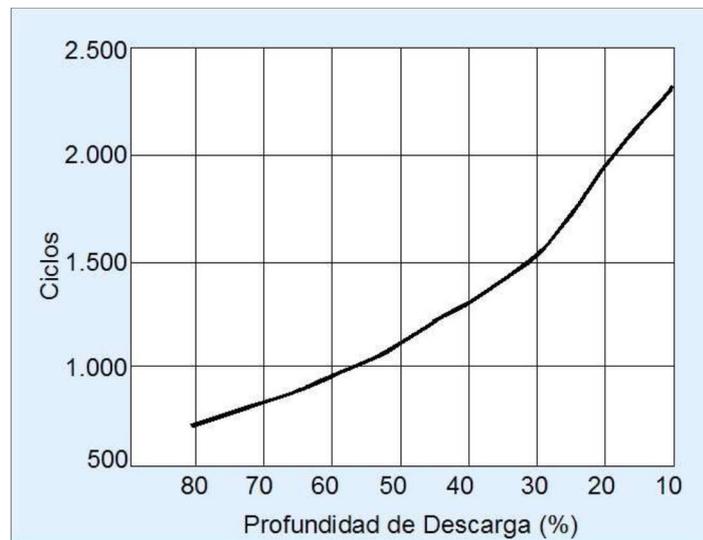


Figura 4.18: Número de ciclos de carga descarga contra profundidad de la descarga.

Así para una profundidad de 20% de descarga, esta batería es capaz de soportar hasta 2.000 ciclos de carga – descarga. Si la profundidad aumenta, por ejemplo al 80% de la descarga, esta batería soporta 700 ciclos de carga – descarga. Cabe mencionar que tanto la sobrecarga como la sobredescarga de una batería reducen drásticamente su vida útil.

e) Autodescarga.

Todas las baterías sufren el proceso de autodescarga, que consiste en una pérdida de la energía almacenada debido a procesos internos de la batería que no tienen que ver con el de descarga propiamente. Esta situación se produce cuando la batería se encuentra almacenada sin un cargador adecuado. Normalmente los cargadores realizan una carga superficial permanente para compensar la autodescarga.

En general, las baterías de ácido – plomo tienen una tasa de autodescarga de aproximadamente 10% por mes, aunque este valor depende del tipo de batería. Las temperaturas más altas favorecen el proceso de autodescarga.

f) Estado de carga

Determinar el estado de carga (SOC, siglas de “State Of Charge”) de una batería es fundamental para el correcto funcionamiento de la misma. Por otro lado, determinar este parámetro es difícil. La forma más precisa de conocer el estado de carga de la batería se utiliza un densímetro para medir la densidad del electrolito, ya que el ácido sulfúrico es más denso que el agua y si la concentración es alta quiere decir que la batería está cargada.

Los fabricantes de baterías ofrecen tablas de referencia que relacionan la densidad del electrolito con el estado de carga. Este método solo puede ser utilizado en baterías abiertas en las cuales se puede acceder al electrolito, por otro lado, la medida no debe realizarse inmediatamente después de una descarga o una carga ya que la densidad no sería homogénea en todo el electrolito.

Por las razones expuestas, normalmente esta medición no se realiza estando la batería en operación y los cargadores estiman la carga disponible basándose en la tensión de los bornes. Esta es una medida indirecta del

estado de carga ya que la tensión de salida pero con los bornes de la batería desconectados es proporcional a la densidad del electrolito. Cuando la batería está entregando potencia la tensión en sus bornes depende de la carga. La tabla 4.3 presenta una estimación del estado de carga de una batería ácido – plomo de 12 Voltios [4].

Rango de Voltaje (V)	Estado de Carga
>14,4	Batería llena
13,5 a 14,1	Operación normal, batería cargado, desconectada de la carga
12,0 a 14,1	Operación normal, batería cargado, conectada a la carga
11,5 a 12,7	Operación normal, batería conectada a la carga
11,4	Batería vacía

Tabla 4.3: Estimación de estado de carga de una batería ácido – plomo de 12 voltios.

g) Efecto de la temperatura sobre la batería

En cuanto a la temperatura de operación de una batería, el parámetro más afectado es la capacidad de entregar la energía almacenada a la carga. La capacidad de energía que es capaz de entregar una batería de ácido – plomo plenamente cargado disminuye cuando disminuye la temperatura. Esta situación se produce debido a que el proceso químico de las baterías se ve afectado por las bajas temperaturas. Así, en el ejemplo de la figura 4.19 [Quaschnig, 05], si la temperatura ambiente se encuentra entre 30 y 40 °C la batería es capaz de entregar el ~100% de su capacidad de almacenamiento. Si la temperatura disminuye a -30°C la capacidad que es capaz de entregar se reduce al 50%.

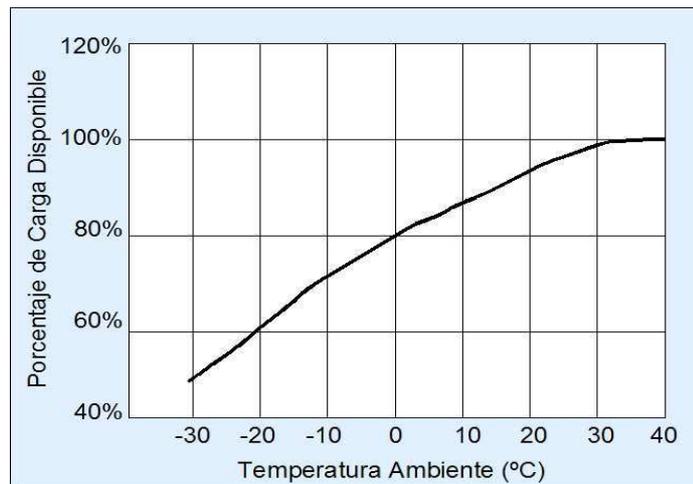


Figura 4.19: Porcentaje de la carga disponible en función de la temperatura ambiente.

h) Vida útil de la batería

La cantidad de años que la batería puede funcionar, siempre que se utilice adecuadamente, depende de varios factores. Las baterías están diseñadas para soportar una cantidad determinada de ciclos de carga y descarga, como habíamos mencionado en párrafos anteriores, por esta razón el tiempo de vida útil tiene que ver con los ciclos que la batería soporta. Tomando como ejemplo la curva de la figura 4.18 y considerando una descarga de solamente el 20%, esta batería podría sufrir unos 2.000 ciclos de carga y descarga. Si utilizamos esta batería en una aplicación fotovoltaica y cada día la batería se carga por la mañana y se descarga por la noche, esta podría funcionar durante más de 5 años. Cabe destacar que este tiempo de vida útil de la batería no es igual a la garantía que el fabricante ofrece contra defectos de fabricación, que generalmente es bastante menor. La vida útil de la batería se puede ver afectada por el efecto del envejecimiento. Existen varios procesos que producen este envejecimiento [Bopp, 98]:

- ✓ **Corrosión:** el plomo y sus aleaciones no es estable cuando está sometido a potenciales positivos relativamente altos, a los que está sometido en el electrodo positivo, razón por la cual se produce la corrosión. La corrosión depende de manera muy compleja de la temperatura, el potencial, la concentración de ácido sulfúrico, la aleación utilizada y la calidad del electrodo. Para evitar este proceso es necesario utilizar tensiones de carga moderadas, mantener la temperatura de la batería relativamente baja y realizar un buen electrodo. La corrosión produce el aumento de la resistencia interna de la batería.

- ✓ **Sulfatación:** es el fenómeno por el cual se producen cristales de sulfuro de plomo. Estos cristales, cuando son de gran tamaño, tienden a no participar el proceso electroquímico de carga y descarga. Para minimizar la sulfatación se requiere una alta concentración de ácido en el electrolito y alcanzar frecuentemente el 100% de la carga.

- ✓ **Crecimiento de dendritas:** estas dendritas son conductoras de la corriente eléctrica y tiende a causar cortocircuitos que incrementa la autodescarga y hace que el proceso de carga sea menos eficiente.

- ✓ **Degradación del electrodo negativo:** este fenómeno se produce debido al uso de aditivos que cuando son sometidas a altas temperaturas y tensión inversa en los electrodos causan el crecimiento de cristales de plomo que destruyen el electrodo.

- ✓ **Estratificación de la concentración del ácido:** este fenómeno consiste en que la densidad del ácido no está uniformemente distribuida, con una mayor concentración en la parte inferior del electrolito. Este proceso causa una mayor sulfatación en la parte

baja de los electrodos. Para evitar este fenómeno se puede aprovechar el proceso de gasificación que se produce durante la carga con altas tensiones o utilizar sistemas activos de generación de burbujas para mezclar el electrolito. La primera solución favorece la corrosión, mientras que la segunda requiere parte de la energía producida por el panel solar.

Algunas reglas que permiten maximizar la vida útil de las baterías son [Bopp, 98]:

- El voltaje de carga no debe ser muy alto porque favorece la corrosión y la pérdida de agua por electrólisis.
- Tampoco puede ser muy bajo porque favorece la corrosión.
- Periodos muy largo sin cargar completamente la batería deben ser evitados para evitar la sulfatación
- Descargas profundas deben evitarse ya que producen sulfatación y el crecimiento de dendritas.
- La tensión de carga no debe invertirse en los bornes de la batería ya que produce la destrucción del electrodo negativo
- La estratificación del ácido hay que evitar ya que favorece la sulfatación
- Las temperaturas altas en las baterías favorecen todos los procesos de envejecimiento
- Cierta nivel de sobrecarga es necesaria periódicamente (una al mes) para asegurar una carga completa

Cabe mencionar que algunas de estas reglas no pueden conseguirse fácilmente en un sistema fotovoltaico independiente.

4.4.3 Controlador de carga de baterías

Uno de los factores por el cual el uso de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía es su alto costo, por lo que es muy importante optimizar al máximo la vida útil de todos los componentes del sistema fotovoltaico. Uno de los elementos más exigidos son las baterías, ya que sufren ciclos de carga y descarga diarios. La figura 4.20 muestra un patrón de carga y descarga típico de una batería en un sistema fotovoltaico [Duryea, 01].

El esquema más simple de conexión de todos los componentes presentados hasta este punto se muestra en la figura 4.21. El panel solar se conecta en paralelo con la batería y la carga. El diodo que se muestra en la figura 4.21 evita que el panel solar se convierta en carga para la batería cuando no genera energía. Este diodo, en contrapartida, se convierte en una pérdida permanente para el sistema, ya que este cuando conduce produce una caída de potencial entre sus bornes. Esta caída de potencial es constante, por lo que la potencia disipada en forma de calor en el diodo es:

$$P_D = V_D I_{PS}$$

Donde P_D es la potencia disipada, V_D es la tensión del diodo (aproximadamente 0,5V) y I_{PS} es la corriente que entrega el panel solar.

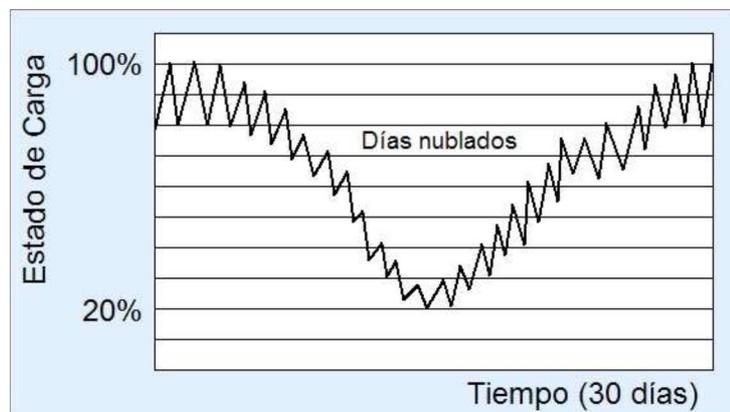


Figura 4.20: Patrón de carga y descarga de la batería en un sistema fotovoltaico.

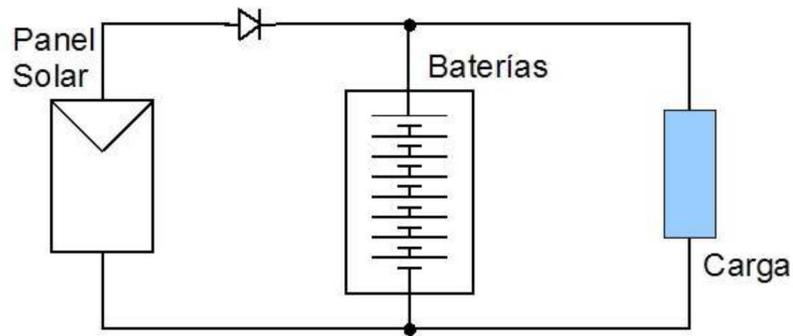


Figura 4.21: Esquema de conexión.

La tensión del panel solar es:

$$V_{PS} = V_B + V_D$$

Donde V_{PS} es la tensión en el panel solar, V_B es la tensión en los bornes de la batería y V_D es la caída de tensión en el diodo. La tensión en la batería depende de estado de carga y la tensión en el diodo es constantes (~0,5V), por lo que la tensión del panel solar crece a medida que la batería se carga. Este esquema de conexión es sencillo y se obtienen puntos de operación muy razonables, como se muestra en la figura 4.22.

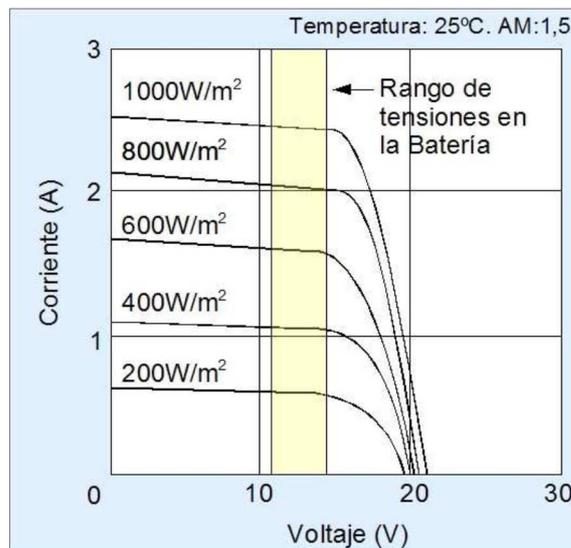


Figura 4.22: Rango de tensiones de una batería y curvas de tensión corriente de un módulo.

El problema que presenta este esquema es la falta de protección contra exceso de carga y la profundidad de la descarga. Ambos factores afectan a la vida útil de la batería. Por esta razón se utilizan controladores de carga de la batería cuya función es desconectar el panel solar de la batería cuando esta alcanza la tensión de carga máxima y, por otro lado, desconectar la carga cuando la tensión de la batería alcanza el valor de descarga máxima.

La figura 4.23 muestra un esquema del controlador.

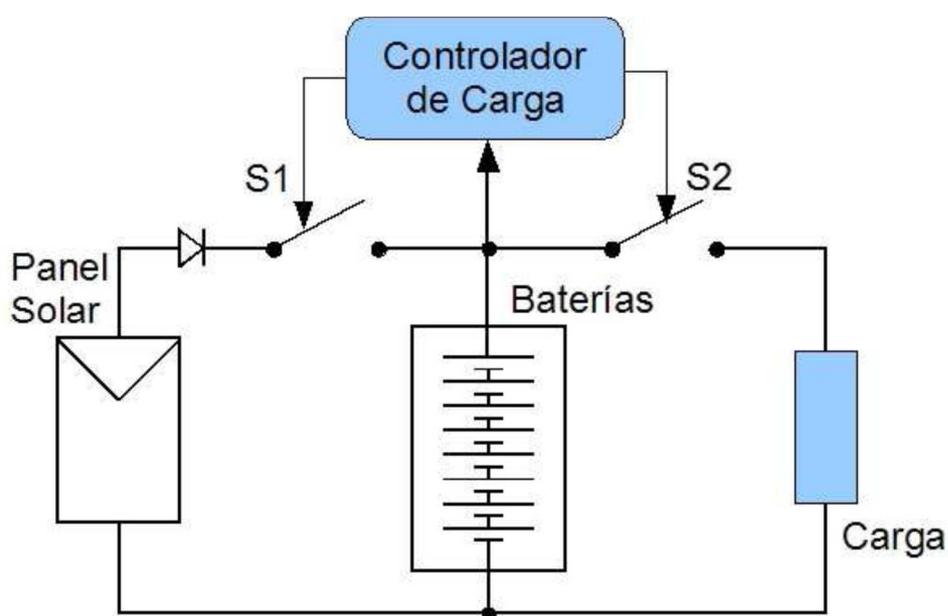


Figura 4.23: Controlador de Carga de la Batería

El controlador de carga de batería más sencillo toma como referencia la tensión en la batería, de tal forma que si esta tensión alcanza o supera los 14,4V, para una batería de 12V, la llave ideal S_1 se abre desconectando el panel solar de la batería y terminando la carga. Si la tensión de la batería es igual a 11,4V (para una batería de 12V), la llave S_2 desconecta la carga evitando así una descarga más profunda de la batería.

Cabe mencionar que para realizar sus funciones, este controlador utiliza parte de la energía producida por el sistema fotovoltaico. Por otro lado, este controlador introduce otra fuente de pérdidas de energía son las llaves S_1 y S_2 , normalmente implementadas con transistores de efecto de campo (MOSFET) de potencia, los cuales tienen una resistencia en conducción muy baja, del orden de los miliohmios [Rashid, 04], pero aún así disipan alguna potencia.

En la literatura [Duryea, 01] se proponen otros esquemas más sofisticados de carga que tienen en cuenta otros parámetros para estimar el estado de carga de la batería, como ser la corriente de carga y la temperatura en la batería, entre otros.

4.5 Subsistema de conversión CC/CC y conversión CC/CA.

Razones para los convertidores CC/CC: cambiar la tensión entregada en la carga, optimizar la transferencia de potencia entre el panel solar y la batería junto con la carga.

4.5.1 Convertidor CC/CC.

La función de un convertidor CC/CC es la de convertir el voltaje de salida del panel solar a un voltaje de corriente continua diferente. El símbolo electrónico de un convertidor CC/CC se muestra en la figura 4.24.

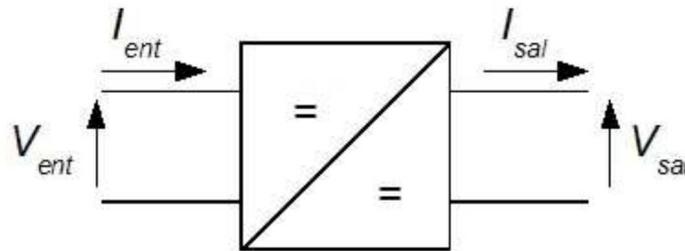


Figura 4.24: Símbolo del convertidor CC/CC.

Una característica importante para los convertidores CC/CC es la eficiencia energética de la conversión. Esta eficiencia energética se expresa en lo que se denomina flujo de potencia:

$$P_{ent} = P_{sal} + P_p$$

En donde P_{ent} es la potencia que el panel solar entrega, P_{sal} es la potencia que el convertidor entrega a la carga y P_p es la potencia que se disipa en el convertidor. Si el convertidor es ideal la eficiencia se define como:

$$\eta_p = \frac{P_{sal}}{P_{ent}}$$

Los buenos convertidor, aquellos que utilizan las últimas tecnologías disponibles, alcanzan una eficiencia superior al 90% [Rashid, 04]. Considerando que el convertidor es ideal la ecuación queda:

$$P_{ent} = P_{sal}$$

Si el convertidor es ideal la eficiencia se define como:

$$\eta_p = \frac{P_{sal}}{P_{ent}}$$

Los buenos convertidor, aquellos que utilizan las últimas tecnologías disponibles eficiencia superior al 90% [5].

Considerando que el convertidor es ideal la ecuación 4.32 queda:

$$P_{ent} = P_{sal}$$

Por otro lado, tomando en cuenta que $P=V*I$ tenemos que:

$$V_{ent} * I_{ent} = V_{sal} * I_{sal}$$

Reagrupando los términos tenemos:

$$\frac{V_{ent}}{V_{sal}} = \frac{I_{sal}}{I_{ent}}$$

Por otro lado, tomando en cuenta que $P=V*I$, tenemos que:

$$V_{ent} * I_{ent} = V_{sal} * I_{sal}$$

Reagrupando los términos tenemos:

$$\frac{V_{ent}}{V_{sal}} = \frac{I_{sal}}{I_{ent}}$$

Esta última expresión se puede observar que si elevamos la tensión de salida (V_{sal}) la corriente de salida (I_{sal}) disminuye y viceversa. Los convertidores CC/CC pueden clasificarse en:

- **Reductores:** aquellos cuya tensión de salida es inferior a la de entrada.
- **Elevadores:** aquellos cuya tensión de salida es mayor que la de entrada.
- **Reductores – elevadores:** pueden tanto elevar como disminuir la tensión en comparación con la entrada.

Se pueden clasificar también en aquellos que aíslan eléctricamente la salida de la entrada y aquellos que no.

CAPÍTULO 4. Conclusiones

CONCLUSIONES

La economía mundial en el ámbito de consumo energético tradicional enfrenta algunos retos, ocasionado por los precios de los combustibles y derivados del petróleo que suben de manera imprevisible.

Cada vez en más países globalizados, la población empieza a tenerle antipatía a las centrales de carbón o nucleares, para así cuidar el medio ambiente para evitar la contaminación ambiental ocasionado por el dióxido de carbono (CO₂).

En el Ecuador es imprescindible utilizar este tipo de fuentes de energía renovables, como lo es los Sistemas Fotovoltaicos, ya que en actualidad en países como España, Francia, Alemania, etc., están al día con este tipo de tecnología logrando mejorar los precios del consumo de electricidad especialmente residenciales (doméstica).

Asimismo, en el momento actual el Gobierno de la República del Ecuador, a través de la nueva Ley Orgánica de Educación Superior, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable y del SENACYT, se está emprendiendo proyectos de Investigación + Desarrollo para generación eléctrica utilizando estas tecnologías como la fotovoltaica y eólica para el despliegue de energías renovables.

Es necesario fomentar a la ciudadanía a que se involucren y que puedan compensar su balanza en el consumo energético, sólo así será posible movernos en cifras de MW que operan en la Unión Europea

El presente proyecto de investigación ha querido demostrar que las tecnologías actuales, como lo es los sistemas fotovoltaicos, son eficientes, y que a futuro podrían ser las únicas que permitan generar energía eléctrica.

En el Ecuador existen barreras de carácter no técnico que imposibilitan el pleno desarrollo y difusión de los sistemas fotovoltaicos en edificios, para lo cual es necesario realizar incentivos económicos o la exoneración de impuestos para aquellos edificios o empresas, para promover la utilización de los sistemas fotovoltaicos en edificios, aunque tienen bajos costes para funcionar, los costos para su inversión son elevados.

Para culminar, se realizó una amplia revisión bibliográfica, principalmente publicaciones especializadas, tesis de pregrado y posgrado utilizándose fuentes de información más recientes y actualizadas.

Bibliografía

- [Bopp, 98] Boop, Georg; Gabler, Hansjörg; Preiser, Klaus; Uwe, Sauer; Dirk and Schmidt, Heribert. *Energy Storage in photovoltaic Stand-alone Energy Supply Systems. Progress in photovoltaics: Research and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. 1998.
- [Carvajal, 09] Carvajal Tascón, Carlos. *El Sol*. Astronomía Autodidacta, Colombia, 2009. Website: <http://almaak.tripod.com/temas/sol.htm>
- [Castillo, 09] Castillo, J. L. *Causas de las glaciaciones*. Website: <http://almaak.tripod.com/temas/sol.htm>
- [Duryea, 01] Duryea, S.; Islam, S. y Lawrance, W. *A battery management system for stand alone photovoltaic energy systems*. IEEE Industry Applications Magazine. May/June 2001.
- [Garreaud, 07] Garreaud, R. *Clase 3: Transferencia Radiativa, Curso FG11C "Atmósfera, tiempo y clima"*, Semestre Otoño 2007.
- [Lorenzo, 06b] Lorenzo, E. *Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos*. Progensa, Sevilla, 2006.
- [Luque, 02] Luque A., Cuevas A. y Ruiz J. *La tecnología española lidera el desarrollo de revolución fotovoltaica*. Premio Juan de la Cierva de Trasferencia de Tecnología Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, 2002. Website: http://www.madrimasd.org/revista/revista20/quien/quien_es_quien2.asp

- [Luque, 03] Luque A., Cuevas A. y Ruiz J. *La investigación y el desarrollo fotovoltaico en España*. Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, 2003. Website: <http://www.censolar.es/articu04.htm>
- [Masters, 04] Masters, Gilbert. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2004.
- [Quaschnig, 05] Quaschnig, Volker. *Understanding Renewable Energy Systems*. Earthscan Canadá, 2005.
- [Rashid, 04] Rashid, Muhammad. *Electrónica de potencia*. Tercera edición. Pearson educación. México. 2004.
- [Rie04] Riechmann, J. *Gente que no quiere viajar a Marte. Ensayos sobre ecología, ética y autolimitación*. Los Libros de la Catarata, Madrid, 2004.
- [Robinson, 96] Robinson, N. *Solar Radiation*". Elsevier Publishing Company, 1996.
- [Stine, 10] Stinem W. B. y Geyer, M. *"Power From The Sun"* 2010 (a revised and updated (and free!) version of "Solar Energy Systems Design" by W. B. Stine and R. W. Harrigan (John Wiley and Sons, Inc. 1985)) PowerFromTheSun.net website: <http://www.powerfromthesun.net/chapter2/Chapter2.htm>
- [Van, 00] Van Campen, B. *Energía Solar Fotovoltaica*. FAO, Roma, 2000.

[Villegas, 06] Villegas D., M. *Diseño y Caracterización a nivel de prototipo del Sistema de Abastecimiento energético de una Plataforma de Telecomunicaciones tipo Globo-Antena*", Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, FCFM, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2006.

Enlaces Web

- Kyocera Corporation. Website: <http://www.kyocerasolar.com/>
- Sharp Electronics Corporation. Website: <http://www.sharppusa.com/solar/>
- Schott AG. Website. <http://www.schott.es/>
- BP P.L.C. Website: <http://www.bp.com/>
- Surrrette Battery Engineering. Website: <http://www.surrrette.com/>
- Concorde Battery Corporation. Website: <http://www.concordebattery.com/>
- Trojan Battery Company. Website: <http://www.trojan-battery.com/>