# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

## Programa Teórico de Entrenamiento

Centro de Conservación de Energía y del Ambiente
CENERGIA

Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial
SENATI

Energía y Medio Ambiente
ECOFYS
Utrecht – Holanda

# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

## Programa Teórico de Entrenamiento

# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

## Programa Teórico de Entrenamiento

SENATI
CENERGIA
ECOFYS
Utrecht/Lima 1999

Este manual ha sido elaborado por:

Ing. Carlos Orbegozo Reto (CENERGIA)
Ing. Bob Schulte (ECOFYS)
Ing. Gert. J. Hoogenstrijd (ECOFYS)

Dibujos: Amerentske Koopman

**Manual publicado por:**

ECOFYS

**Energía y Ambiente**

Kanaalweg 16-G
3526 KL Utrecht
Holanda

CENERGIA

**Centro de Conservación de Energía y del Ambiente**

Calle Deraín 198
San Borja – Lima 41
Perú

Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción parcial o total por impresión, fotografía, microfilm o por cualquier otro medio, sin autorización escrita de los editores.

Esta publicación ha sido posible gracias al aporte económico de la ***Fundación Hulsebosch Prior***, Holanda.

La información contenida en esta publicación ha sido recopilada con el mayor cuidado en cuanto a su legitimidad. Sin embargo, tanto los editores como los autores quedan exentos de toda responsabilidad legal por cualquier daño o perjuicio producido como consecuencia de la aplicación de los métodos en ella descritos.

# CONTENIDO


INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIANTES ..... 9

1. INTRODUCCIÓN ..... 11
   1.1 Visión general del estado del arte de los paneles fotovoltaicos ..... 11
      1.1.1 ¿Qué es energía solar? ..... 11
      1.1.2 Historia de los paneles fotovoltaicos ..... 11
      1.1.3 Precios de los sistemas fotovoltaicos ..... 13
   1.2 Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos ..... 15
   1.3 Posibilidades y limitaciones de la tecnología fotovoltaica ..... 19
      1.3.1 ¿Cuándo son los sistemas fotovoltaicos una opción? ..... 19
      1.3.2 Puntos fuertes y débiles de la tecnología fotovoltaica ..... 21
      1.3.3 Lecciones aprendidas ..... 22

2. LA FUENTE DE ENERGÍA SOLAR ..... 25
   2.1 Introducción ..... 25
   2.2 Patrones estacionales y diarios ..... 29
   2.3 Unidades ..... 33
   2.4 Radiación solar en el Perú ..... 34
   2.5 Radiación solar en un lugar específico (inclinación orientación) ..... 34
   2.6 Sombras y reflejos ..... 36
   2.7 Mediciones ..... 38
      2.7.1. Instrumentos de medición ..... 38
      2.7.2 Inexactitud ..... 40
      2.7.3 Midiendo la radiación total ..... 40
      2.7.4 Midiendo temperatura ..... 40
   2.8 Conclusiones ..... 42

3. ¿CÓMO OPERAN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS? ..... 43
   3.1 Distribución del sistema ..... 43
   3.2 Celdas fotovoltaicas, proceso de producción ..... 44
   3.3 Paneles fotovoltaicos, módulos ..... 45
   3.4 Componentes eléctricos ..... 47
      3.4.1 Unidad de control ..... 47
      3.4.2 Cables ..... 49
      3.4.3 Adaptadores, convertidores ..... 51
      3.4.4 Inversor ..... 51
   3.5 Acumuladores (baterías) ..... 52
      3.5.1 Introducción ..... 52
      3.5.2 Capacidad estimada de almacenamiento ..... 53
      3.5.3 Carga, descarga y estado de carga ..... 53
      3.5.4 Ciclo, ciclo de vida y profundidad de descarga ..... 54
      3.5.5 Autodescarga ..... 54
      3.5.6 Tipos de baterías ..... 55

3.6 Estructuras de soporte ..... 57
3.7 Simbología utilizada con más frecuencia en instalaciones fotovoltaicas ..... 59

4. DISEÑO DEL SISTEMA E INSTALACIÓN ..... 60
4.1 Vínculo entre el producto y el usuario ..... 60
4.2 Diseño del sistema, requerimientos del usuario ..... 61
4.2.1 Consumo de energía de los artefactos eléctricos ..... 61
4.2.2 Patrón de consumo de energía, demanda promedio ..... 62
4.2.3 Observaciones ..... 63
4.3 Diseño del sistema, aspectos financieros ..... 63
4.3.1 Costo del sistema ..... 65
4.3.2 Análisis del sistema de costos ..... 66
4.4 Dimensiones de la batería de almacenamiento ..... 69
4.5 Dimensiones de la unidad de control ..... 69
4.6 Selección del lugar de ubicación, requerimientos ..... 70
4.7 Mantenimiento y extensión al usuario ..... 70
4.8 Contratos de servicio ..... 71

5. LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA A ESCALA NACIONAL ..... 73
5.1 Introducción ..... 73
5.2 Capacidad de potencia fotovoltaica instalada en el pais ..... 73
5.3 Referencias de proyectos nacionales ..... 74
5.3.1 Convenio GTZ - CORPUNO: Electrificación Fotovoltaica en Puno ... 74
5.3.2 Segundo Convenio GTZ - Región Mariátegui ..... 74
5.3.3 Dirección Ejecutiva de Proyectos(DEP - MEM): Proyecto Piloto San Francisco ..... 75
5.3.4 Proyecto para Ahorro de Energia(PAE - MEM): Electrificación fotovoltaica insular ..... 76
5.3.5 Conclusiones ..... 77
5.4 Directorio de empresas e instituciones ..... 77

ANEXO A: ASPECTOS FINANCIEROS Y ECONÓMICOS ..... 81

A.1 Introducción ..... 83
A.2 Cálculo del costo de inversión ..... 83
A.3 Generadores Diesel ..... 85
A.4 Conexión a la red ..... 86
A.5 Cifras económicas ..... 86
A.6 Costos de la electricidad ..... 90

## INTRODUCCIÓN PARA LOS ESTUDIANTES

El curso, **Generación de electricidad a pequeña escala con energía solar fotovoltaica,** ha sido diseñado especialmente para ser desarrollado en los cursos dirigidos a electricistas, electrotécnicos y mecánicos en las escuelas técnicas de nivel intermedio del SENATI en el Perú. En él se tratarán los aspectos teóricos y prácticos de la tecnología fotovoltaica (FV).

El objetivo principal es poner a disposición de los estudiantes un conocimiento básico acerca de los fundamentos de la tecnología fotovoltaica a través de un enfoque práctico del tema, desarrollando únicamente los puntos más relevantes del aspecto teórico. De este modo, al finalizar el curso, el alumno habrá adquirido un conocimiento básico acerca de la tecnología fotovoltaica, sus posibilidades, restricciones y aplicaciones; y a su vez será capaz de dimensionar, instalar, inspeccionar y dar mantenimiento a pequeños sistemas fotovoltaicos. Además, aprenderá a realizar mediciones y a detectar errores en el sistema.

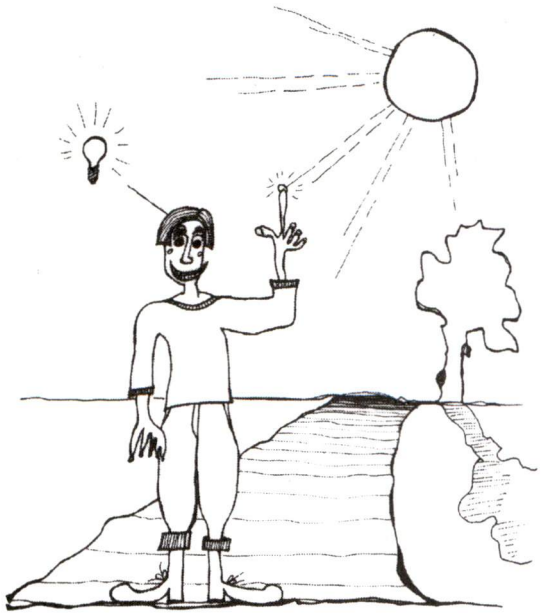
El curso está dividido en dos partes. La primera parte estará dedicada a la teoría de la tecnología fotovoltaica e incluirá ejercicios prácticos acerca de los temas tratados. Luego de tratar la teoría, se dará paso a la segunda parte del curso, en la que se llevará a cabo un taller práctico.

Para finalizar, éste es el primero de cuatro cursos consagrados a la Energía Solar Fotovoltaica, Energía Termo Solar (termas solares), Energía Eólica y Microcentrales Hidroeléctricas.

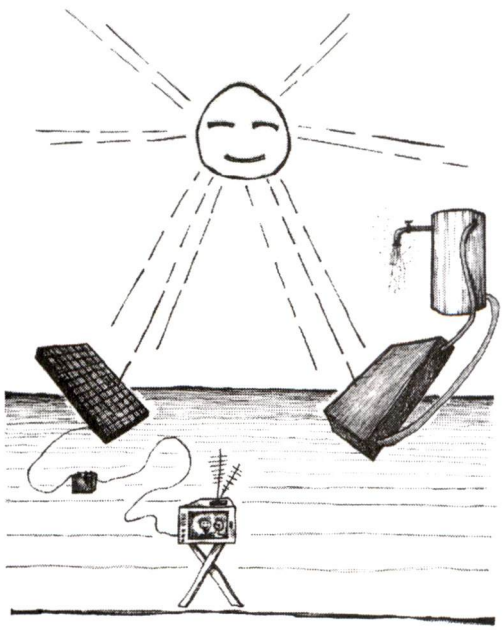
# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Visión general del estado del arte de los paneles fotovoltaicos

### 1.1.1 ¿Qué es energía solar?



Sin la presencia del sol no existiría vida en la tierra. El planeta sería demasiado frío, no crecerían las plantas ni habría vida alguna, excepto quizás por algunas bacterias, que al parecer se adaptan a cualquier entorno. Hoy en día, todos nuestros recursos energéticos provienen indirectamente del sol. Los combustibles fósiles son, en efecto, plantas y árboles muy antiguos, que crecieron gracias a la luz solar y han sido comprimidos durante millones de años. La energía eólica y la hidráulica son generadas mediante procesos globales conducidos por el sol. La madera para combustible es obtenida de los árboles, los cuales no podrían crecer sin luz solar.



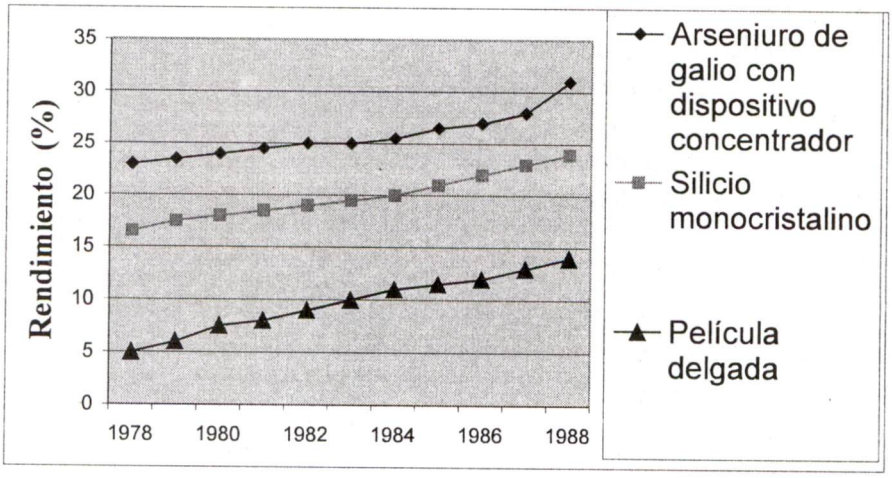
En este manual trataremos el tema relacionado con el uso directo de la energía solar: la conversión de la radiación solar en energía por medio de celdas fotovoltaicas. La conversión de la radiación en calor (energía térmica) es tema del manual "Calentamiento de agua mediante el uso de termas solares".

### 1.1.2 Historia de los paneles fotovoltaicos

La generación de electricidad con celdas solares fotovoltaicas fue descubierta en el año 1839 por Edmond Becquerel. Aunque las bases teóricas del efecto fotovoltaico eran conocidas desde principios de siglo, hasta el año 1954 no se consiguió producir celdas que aprovecharan dicho efecto con rendimiento razonable, siendo lograda por la Bell Telephone, en New Jersey. Desde mediados de siglo, se desarrolló el proceso de purificación de monocristales de silicio, impulsando enormemente el avance de la industria electrónica.

En 1956, Loferski publicó unas tablas de rendimiento de conservación fotovoltaica para todos los materiales semiconductores y a principios de los años setenta, se obtuvieron en el laboratorio rendimientos del 20 % trabajando con celdas monocristalinas de arseniuro de galio (GaAS). Dicho rendimiento es mucho menor, cuando dichas celdas se producen a escala industrial.

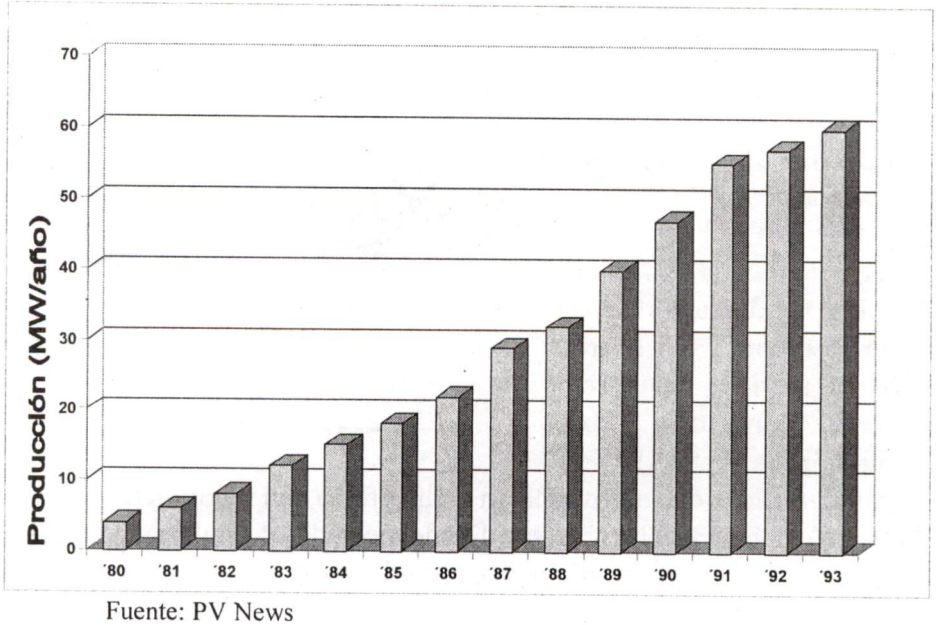
**Figura 1.1:** ***Evolución de los rendimientos (en laboratorio) de las celdas fotovoltaicas***




Fuente: PV News

La comercialización de celdas solares FV comenzó con las de silicio monocristalino que aún ocupan el primer lugar en el mercado. Posteriormente aparecieron las compuestas por material policristalino, de fabricación más económica, aunque de menores rendimientos, pero con la ventaja adicional que pueden ser fabricadas en forma cuadrada y así aprovechar mejor el área rectangular disponible en un panel. El desarrollo de la tecnología fotovoltaica surgió durante los programas de investigación espacial durante los años 1950-70.

***Figura 1.2:*** **Incremento en la producción de módulos fotovoltaicos (1980-1993)**




Fuente: PV News

Recientemente se han comercializado celdas de silicio amorfo, extendiendo su uso para artefactos de muy baja potencia, como calculadoras, relojes, radios portátiles, etc., por ultimo, han aparecido tecnologías más sofisticadas, como los semiconductores de película delgada, o las combinaciones de diversos semiconductores, a fin de optimizar las respuestas a la acción de la luz solar.

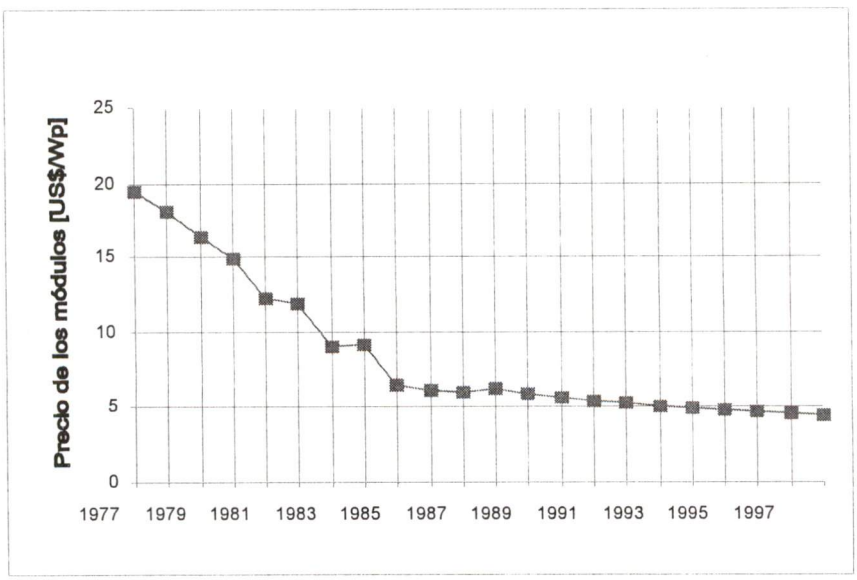
Las primeras aplicaciones prácticas de la electricidad fotovoltaica se encontraron en los vehículos espaciales, alimentando los equipos de control de medida o de retransmisión de datos. Posteriormente, se inicio la producción industrial de los primeros paneles para aplicaciones terrestres domésticas; como electrificación de viviendas aisladas. Sin embargo, estos productos no fueron suficientemente competitivos como para lograr un amplio mercado sino hasta principios de la década de los ochenta.

***Ejercicio 1.1:***
¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los módulos de silicio monocristalinos frente a los policristalinos?

### 1.1.3 Precios de los sistemas fotovoltaicos

El proceso de producción de las celdas fotovoltaicas es una actividad complicada de alta tecnología que requiere de inversiones gigantescas. Desde el punto de vista económico, no es interesante armar una pequeña planta de fabricación en países en desarrollo porque el precio de las celdas que se fabricarían es proporcionalmente inverso al tamaño de la planta manufacturera fotovoltaica. Por lo tanto, una planta pequeña nunca podrá competir con las grandes ya existentes en los EEUU, Europa y Japón. Aún en un país como India, con bajos costos en mano de obra y precios de energía, muy pocas son las plantas que están produciendo celdas fotovoltaicas por aproximadamente 5 US$/$W_p$, mientras que los precios internacionales hoy en día están en el orden de los 3 US$/$W_p$.

**Figura 1.3a:** ***Baja de precios en las últimas décadas***



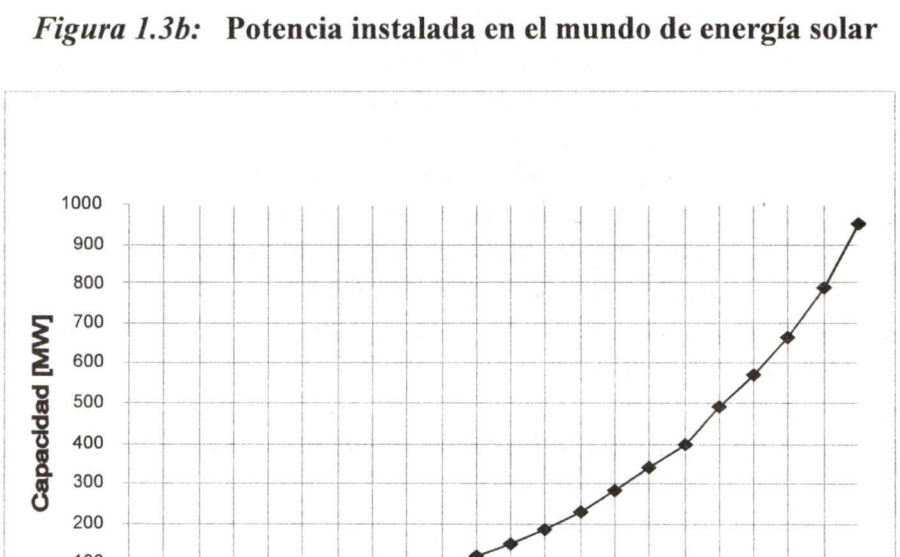

Fuente: PV News

Las celdas fotovoltaicas eran aún muy costosas para muchas de las aplicaciones comerciales, sin embargo probaron ser una opción interesante para aquellos lugares, realmente alejados de la red pública. Desde entonces, los precios de las celdas fotovoltaicas han ido bajando y su eficiencia se ha incrementado gradualmente y por lo tanto, los costos por unidad de electricidad generada con FV empiezan a ser cada vez más bajos.

Hoy en día el precio por unidad (kWh) bajo óptimas circunstancias, puede ser tan barato como 0.25 US$, a pesar de que para muchas de las situaciones prácticas, los precios están aproximadamente en 0.50 a 1.00 US$ por kWh cuando se incluyen también todos los costos indirectos. Para una comparación; el precio para generar una unidad de electricidad con plantas térmicas a carbón a gran escala está alrededor de 0.10 US$.

Con éstos precios que bajan por kWh, el número de aplicaciones comerciales va creciendo. Al principio los FV eran sólo una opción interesante para aplicaciones espaciales, hoy en día pequeñas celdas fotovoltaicas se usan dondequiera alrededor del mundo en infinidad de diferentes aplicaciones comerciales. Seguidamente se muestra la potencia instalada a escala mundial de energía solar fotovoltaica.

***Figura 1.3b:*** **Potencia instalada en el mundo de energía solar**




Fuente: PV News

Por lo general, el precio de un sistema fotovoltaico se expresa en dólares por W pico (US$/$W_p$). Si un panel solar genera 100 $W_p$ a luz solar plena (1,000 W/$m^2$, a 25 grados Celsius), significa entonces que ésa es su capacidad normal. Actualmente, los paneles solares producen 100 – 110 $W_p$ por cada $m^2$; de modo que el área de un panel con tal capacidad será de 1 $m^2$ aproximadamente.

**Tabla 1.1:** ***Precios y eficiencias para diferentes módulos***

| Tipo de célula | Eficiencia [%] (en la práctica) | Precio [US$/ $W_p$] |
|---|---|---|
| Monocristalina | 16 | 6 |
| Policristalina | 10 - 14 | 5 |
| Película delgada | 10 | 2 (esperada) |
| Silicio amorfo policristalino | 10 | 1 - 2 |

*Fuente: Renewable Energy*

Estos precios son para diferentes celdas fotovoltaicas. En la práctica sin embargo, es más interesante saber los precios para sistemas completos, porque el precio por $W_p$ depende mucho del tamaño del sistema. En la siguiente tabla se dan algunos precios promedios para diferentes tamaños de sistemas. Tome en cuenta que estos precios sólo son indicadores aproximados. Los precios reales difieren mucho debido a circunstancias locales (vea también el capítulo 4.3, "*Diseño del sistema, aspectos financieros*").

**Tabla 1.2:** ***Precios promedios por tamaño de sistemas***

| Precio [US$/ $W_p$] | Tamaño [$m^2$] |
|---|---|
| 5 | > > 10 |
| 10 | aprox. 10 |
| 20 | < < 10 |

***Ejercicio 1.2:***
Compare estos precios con los actuales del mercado en el Perú.
¿Hay una diferencia considerable? De ser así, trate de explicar por qué.

## 1.2 Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos

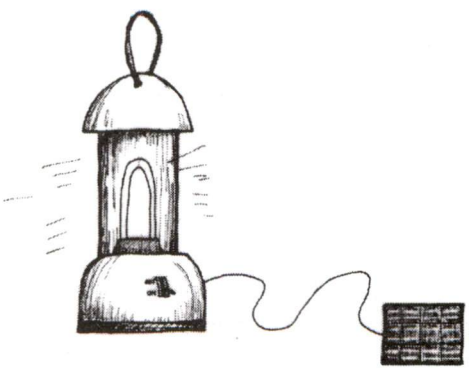
Por supuesto que usar sistemas fotovoltaicos no es la única manera de utilizar la energía del sol. Básicamente los sistemas solares pueden dividirse en dos grandes categorías: aplicaciones solares termales y aplicaciones solares fotovoltaicas.

Con la energía solar térmica, la radiación es convertida en calor y utilizada para calentar agua, aire u otro elemento. Con la energía solar fotovoltaica la radiación es convertida directamente en electricidad que puede usarse para cualquier propósito. La cantidad de aplicaciones es entonces virtualmente ilimitada, desde un par de miliwatts para relojes de pulsera y calculadoras de bolsillo, 50 – 100 watts para sistemas domésticos, hasta el orden de los kilowatts para centrales de generación de potencia. Las aplicaciones más conocidas son:

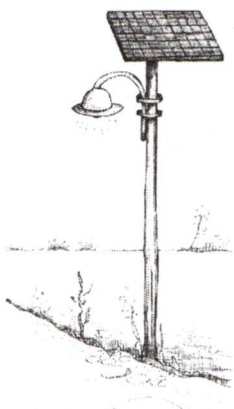
- calculadoras
- juguetes
- luces de señalización
- cercos eléctricos
- bombas para agua potable o irrigación
- lámparas portátiles
- luces de emergencia
- sistemas domésticos pequeños, 50 W para algunas lámparas, radio y una TV
- refrigeradores para vacunas, etc.

Recientemente otras grandes aplicaciones se han vuelto populares, como fachadas u oficinas hechas de paneles fotovoltaicos, generación de potencia conectada a la red a gran escala, paneles de advertencia a lo largo de las carreteras y proyectos de casas con techos completos de paneles fotovoltaicos. Aunque algunos sistemas trabajan bastante bien y la tecnología está suficientemente madura, este tipo de actividades son proyectos de investigación y demostración donde la economía no juega un papel importante.

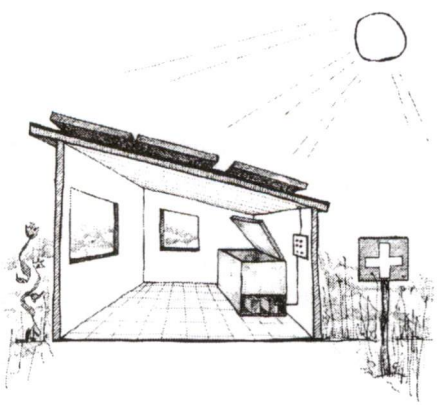
**Figura 1.4:** ***Ilustraciones de las diversas aplicaciones fotovoltaicas***



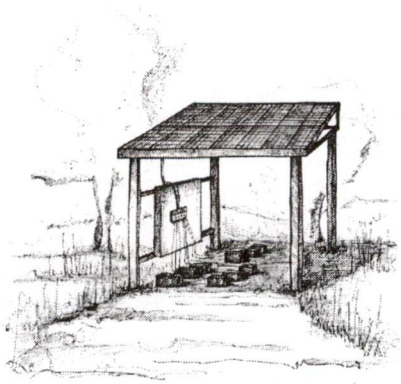
Lámpara fotovoltaica



Poste de iluminación solar



Refrigeración solar



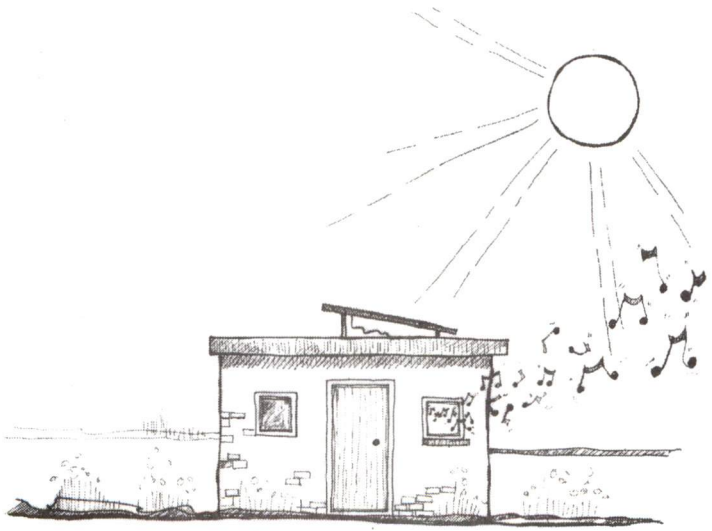
Cargador de baterías

Las aplicaciones más apropiadas para países como el Perú son:

**Iluminación, radio y televisor en residencias**

Las necesidades de energía para uso "doméstico", asociadas directamente con una elevación del nivel de vida en el área rural, en requerimientos de iluminación e información (radios, TV).

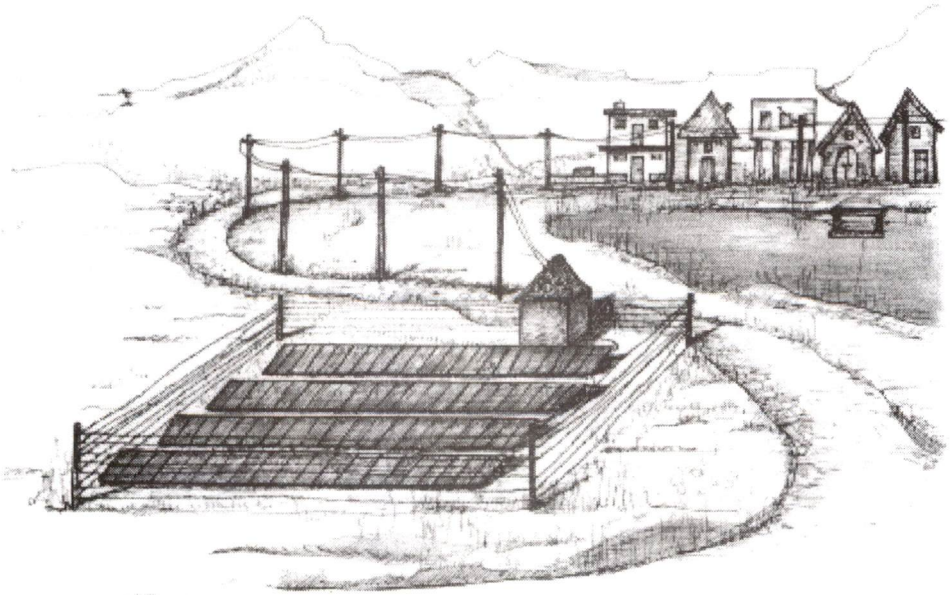
**Figura 1.5:** ***Sistema solar fotovoltaico domiciliario***



**Sistema de la iluminación pública**

Iluminación pública en calle, plazas, carreteras y locales que cumplen funciones sociales, incluso se pueden colocar como cargadores de baterías.

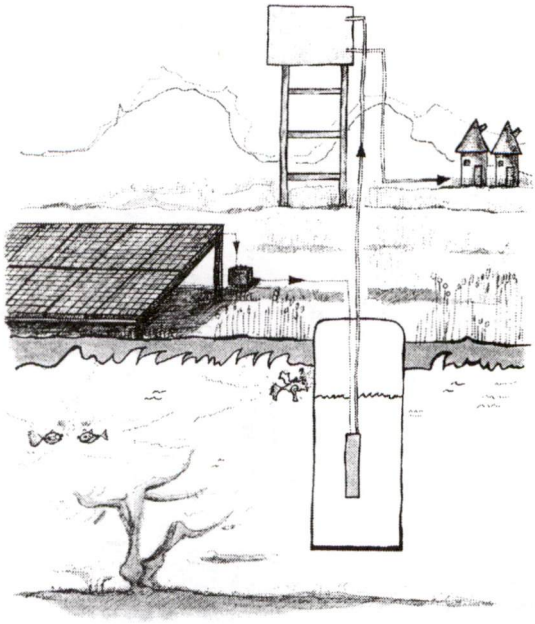
**Figura 1.6:** ***Sistema de iluminación pública***



**Sistema de bombeo para agua**

El accionamiento de bombas para agua de pequeñas, medianas y grandes capacidades, son últimamente una técnica segura y confiable.

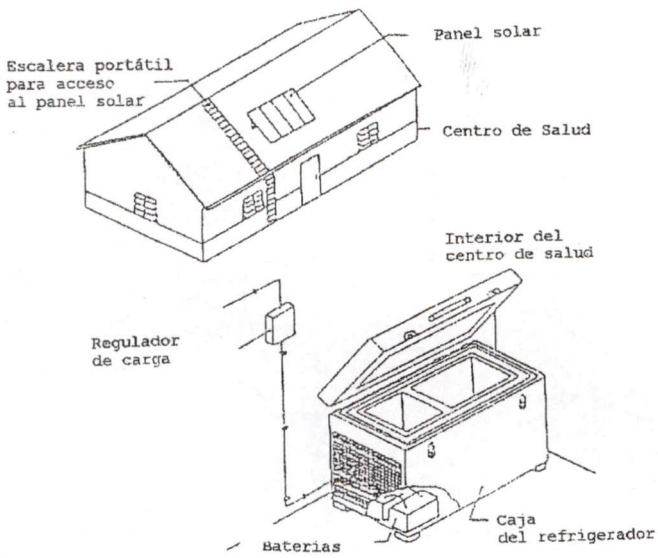
**Figura 1.7:** ***Sistema de bombeo para agua***



**Sistema de refrigeración con energía fotovoltaica**

La refrigeración en pequeña escala, se usa principalmente para la conservación de vacunas y medicamentos en centros hospitalarios de regiones alejadas.

**Figura 1.8:** ***Sistema de refrigeración con energía solar fotovoltaica***



***Ejercicio 1.3:***
¿Podría sugerir otras posibles aplicaciones para la tecnología fotovoltaica?

***Ejercicio 1.4:***
Dé ejemplos acerca del uso de la energía solar en los siguientes lugares (tres en cada caso):

a) En un hogar

b) En un hospital

c) En un colegio

## 1.3 Posibilidades y limitaciones de la tecnología fotovoltaica

### 1.3.1 ¿Cuándo son los sistemas fotovoltaicos una opción?

Una de las restricciones más importantes de la tecnología fotovoltaica es el precio. Por lo menos, eso es lo que la mayoría de la gente piensa. Uno de los objetivos de este curso es demostrar que el precio de la electricidad no es el único punto importante. A veces la fiabilidad, la seguridad o el confort, pueden ser buenas razones para pagar más por un sistema fotovoltaico.

Por otro lado, en muchos de los casos los sistemas fotovoltaicos son más económicos que los sistemas convencionales. Aunque los costos de capital de los paneles fotovoltaicos son altos, los costos en general por unidad de electricidad pueden ser más bajos, como por ejemplo extender la red.

**En general se puede decir que usar FV para generar electricidad se vuelve aún costo efectivo, cuando se requieren pequeñas cantidades de electricidad y el lugar donde se requiere electricidad está muy alejado de la red pública.**

En el ejemplo de la siguiente página (figura 1.9)[1], se hace una comparación de la extensión de la red pública y la generación de electricidad para aplicaciones a pequeña escala con generadores diesel.

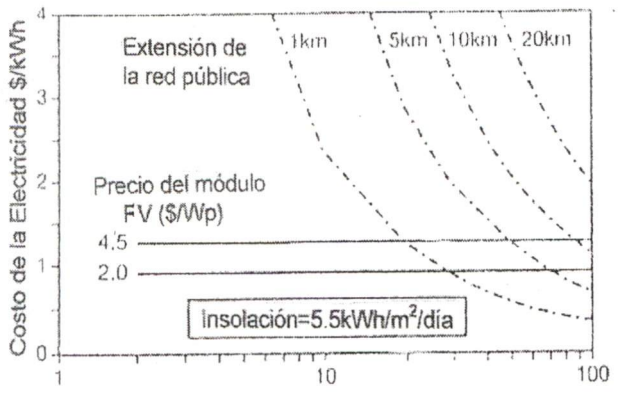
De este ejemplo se puede ver que aún en lugares muy cercanos a la red pública, los sistemas fotovoltaicos pueden resultar más económicos. Por ejemplo, en los suburbios de grandes ciudades, el uso de linternas portátiles fotovoltaicas puede satisfacer en particular algunas necesidades.

***Ejercicio 1.5:***
Piense en toda clase de actividades para las cuales la energía es necesaria en la vida diaria ¿En cuáles emplearía Ud. la energía fotovoltaica?

[1] Extraído de Power Guide [12]

## Figura 1.9: *Economía de la instalación de sistemas fotovoltaicos vs red pública y generadores diesel*

(a) electrificación de un pueblo pequeño: sistema FV vs. extensión de red




Carga diaria kWh/día

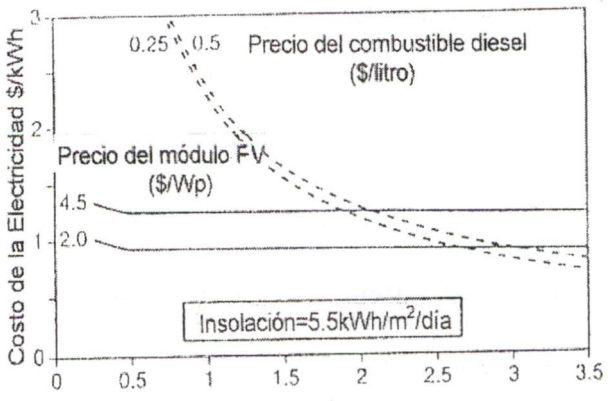
### *Premisas*

Este ejemplo presenta la demanda de electricidad de un pueblo pequeño, y compara el costo de la extensión de la red pública y su conexión en cada casa, con el costo de instalación de sistemas FV independientes en cada casa, sobre la base de un ciclo de vida. La carga diaria total que aparece sobre el eje horizontal y que, además, utiliza una escala logarítmica, refleja el número de conexiones efectuadas.

| | | |
|---|---|---|
| | Periodo de análisis | 20 años |
| | Porcentaje de descuento | 10% al año |
| Sistema FV | Factor de error del panel | 0.9 |
| | Almacenamiento de batería para sistema FV | 5 días |
| | Precio de la batería | $ 100 / capacidad en kWh |
| | Costos de estructura y cableado | $ 1.5 / Wp de panel |
| | Costos de instalación | 20% del costo del sistema |
| | Costos de mantenimiento y operación (M y O) | 2% del costo instalado |
| Extensión de la Red | Costo por conexión de red | $ 750 |
| | Costo por km de extensión de red | $ 25 000 |
| | Costos de mantenimiento y operación (M y O) | $ 0.10 / kWh / año |

Conclusión: Puede resultar más económico instalar sistemas FV para la electrificación de un pueblo alejado de la red con un número reducido de casas.

(b) carga remota independiente: sistema FV vs. generador diesel




Carga diaria kWh/día

### *Premisas*

El ejemplo se aplica a la demanda de potencia de una carga remota independiente (por ejemplo, artefactos de telecomunicaciones, bombas de agua, artefactos de refrigeración).

| | | |
|---|---|---|
| | Periodo de análisis | 20 años |
| | Porcentaje de descuento | 10% anual |
| Sistema FV | Factor de error del panel | 0.9 |
| | Almacenamiento de batería para sistema FV | 5 días |
| | Precio de la batería | $ 100 / capacidad en kWh |
| | Costos de estructura y cableado | $ 1.5 / Wp de panel |
| | Costos de instalación | 20% del costo del sistema |
| | Costos de mantenimiento y operación (M y O) | 2% / año del costo instalado |
| Generador Diesel | Utilizando un generador diesel de baja velocidad VA 5k | |
| | Costos del generador | $ 3000 |
| | Vida del generador | 20 años |
| | Costos de instalación | $ 600 |
| | Costos de mantenimiento y operación (M y O) | 100% / año del costo de la instalación |
| | Eficiencia del motor | 25% |

Conclusión: En muchos casos, para cubrir la demanda de cargas remotas independientes, puede resultar más económico instalar un sistema FV en lugar de utilizar un generador diesel.

***Ejercicio 1.6:***
Ver la figura 1.9: Economía de la instalación de sistemas fotovoltaicos vs red pública y generadores diesel

En el pueblo de Santa Fe, Ica, un hogar promedio registra una demanda diaria de energía de 0.50 kWh/día; y son 100 los hogares que carecen de luz eléctrica. El pueblo se encuentra a 10 kilómetros de la red. Si se instala módulos fotovoltaicos, el costo por $W_p$ será de 5.0 \$/ $W_p$.

Usted trabaja en Electro Sur Medio y debe decidir si el pueblo será electrificado con energía fotovoltaica o conexión a la red. Considerando sólo el aspecto económico, ¿qué opción escogería?

### 1.3.2 Puntos fuertes y débiles de la tecnología fotovoltaica.

En la sección anterior se mencionó una serie de aplicaciones comerciales. Las razones por las cuales alguien usaría un sistema fotovoltaico, en lugar de otro medio de generación de electricidad, no se han discutido aún. O, para decirlo de otra manera, ¿cuáles son las ventajas y desventajas de un sistema fotovoltaico?

Algunas de sus ventajas son que los sistemas fotovoltaicos casi no requieren de mantenimiento, no tienen partes movibles, no hacen ruido, no contaminan, son sistemas modulares, etc. En el siguiente ejercicio se le pedirá hacer una lista de estas ventajas.

De otro lado, hay desventajas o puntos débiles de los sistemas fotovoltaicos. Una de las desventajas más conocidas es el alto costo inicial de estos sistemas. Esto hace que mucha gente difícilmente adquiera un sistema fotovoltaico sin un sistema de crédito. Otras desventajas son que algunas de las partes deben importarse y que es una tecnología nueva y desconocida.

***Ejercicio 1.7:***
Existen varias formas para determinar qué opción es la mejor, por ejemplo, considerar la inversión necesaria para cada caso. Por supuesto, para decidir entre extender la red o emplear sistemas FV, es mejor trabajar con precios reales y no con un gráfico general. En el Perú (1998), el Ministerio de Energía y Minas empleó las siguientes cifras en sus cálculos:

450 US\$/hogar por conexión a la red
8,000 US\$ por kilómetro de línea de transmisión

Un sistema FV completo de 50 $W_p$, capaz de suministrar energía suficiente para un hogar, cuesta 1,000 US\$. ¿Qué opción requiere una menor inversión?

***Ejercicio 1.8:***
Haga un listado de los puntos fuertes y los puntos débiles de la tecnología fotovoltaica.
¿Qué haría para mejorar sus puntos débiles?

### 1.3.3 Lecciones aprendidas

En las décadas pasadas se implementaron en muchos países un sinnúmero de proyectos que introducían la tecnología fotovoltaica. En los setenta y ochenta, estos proyectos básicamente fueron de demostración e investigación para probar y demostrar la nueva tecnología bajo circunstancias prácticas. Gradualmente el producto maduró y los proyectos se orientaron más hacia el mercado.

Muchas de estas acciones fallaron, otras fueron exitosas. Muchas de las actividades han sido evaluadas y nos dan la posibilidad de aprender de experiencias anteriores. Con estas "lecciones aprendidas" pueden evitarse los mismos errores. Por ejemplo un documento del Banco Mundial [15] que describe experiencias en el Pacífico, especialmente nos enseña que al comienzo sucedieron muchos problemas técnicos: diseños inapropiados, componentes poco confiables, instalaciones inadecuadas y pobre mantenimiento. Aún más, hubo dificultades institucionales con el mantenimiento (¿quién es responsable?). Disponibilidad de repuestos, recojo de pagos periódicos, entrenamiento para los usuarios o técnicos locales.

En los siguientes recuadros, se dan dos ejemplos de procesos de introducción en el mercado. El primero describe problemas en el uso de sistemas fotovoltaicos en hospitales rurales en las islas de Indonesia. El segundo ejemplo describe por qué el negocio de Sudimara en Java fue exitoso.

Qué problemas en común se pueden ver en éstos y otros proyectos:

i. El mercado está generalmente en lugares alejados de las grandes ciudades, con mala infraestructura y bajos ingresos (dinero);
ii. Los fabricantes por lo tanto, generalmente trabajan en una base de proyecto a proyecto que implica poco compromiso por parte de los fabricantes;
iii. Porque el mercado no está aún desarrollado, no es aún viable crear una red de servicios;
iv. Algunas aplicaciones estaban o están en un estado experimental y no maduro;
v. Los precios estaban o están altos pero con los desarrollos tecnológicos, producción y ventas en aumento, los requerimientos (mayor eficiencia en el uso final) y precios fueron decreciendo.

**Energía solar en Irian Jaya, Indonesia (1985 a la fecha)**

Contexto: Introducción de la energía solar en las zonas rurales de Irian Jaya para uso en pequeños hospitales (alumbrado, refrigeración de medicinas).

Circunstancias: ubicación en el ecuador, área montañosa, no hay desarrollo moderno, muchos de los pobladores de los pueblos de la montaña no tienen educación. No hay industria, infraestructura muy limitada, no hay red, no hay disponibilidad de combustibles fósiles, económicamente dependientes del gobierno central de Jakarta que está a 4,000 km. de distancia.

Sistemas fotovoltaicos se introdujeron a través de una fundación, que trataba asuntos de salud en Irian Jaya. Los sistemas, refrigeradores y sistemas de alumbrado portátil y fijo, se llevaron e instalaron por un holandés y un fabricante internacional.

Experiencias:

i. Muchos problemas técnicos con baterías producidas localmente, equipo inmaduro, el usuario poco amigable, no había voltaje estándar (6 V), uso de partes informales, etc.
ii. Precios demasiado altos (7,000 US$ por un refrigerador)
iii. Ninguna posibilidad de ofrecer servicios de posventa (el proveedor más cercano estaba en Jakarta, a 4000 km. de distancia)
iv. A pesar de estos problemas muchos de los sistemas están aún funcionando porque no hay otra alternativa seria.

**Sistemas FV caseros en Java, Indonesia (1985 a la fecha)**

Contexto: Hace más o menos 10 años comenzó un proyecto con sistemas fotovoltaicos caseros en un lugar remoto en Java, la isla central de Indonesia. Un fabricante holandés de sistemas fotovoltaicos comenzó introduciendo pequeños sistemas fotovoltaicos (un par de luces y una radio). A través de diferentes proyectos auspiciados por los gobiernos de Holanda e Indonesia, se desarrolló un centro de capacitación local para fabricantes de (parte de) los sistemas y una amplia red de servicios para instalar los sistemas.

Circunstancias: Clima tropical húmedo, terreno montañosos, mala infraestructura, no hay red, población relativamente educada con ingresos. No muy alejado de la capital Jakarta.

Experiencias:

i. Tomó mucho tiempo desarrollar la capacidad de producción local, para alcanzar los requerimientos de calidad, pero ahora se puede tener un producto confiable, maduro y muy económico (400 US$);
ii. Las circunstancias son ideales; no hay red disponible y una población instruida y que tiene algo de dinero para gastar, por lo tanto las ventas son buenas y aún van en aumento (varios miles por año);
iii. Los centros de servicios locales trabajan bien; hay buen servicio de posventa, se recogen los pagos mensualmente, alta disciplina;
iv. Un mercado saludable y comercial sin subsidio alguno se está desarrollando.

Ahora que muchos de los problemas técnicos se han superado en la década pasada, puede caracterizarse por la década de experimentos, demostraciones de investigación y desarrollo (I+D) e introducción al mercado a pequeña escala; el momento es el adecuado para programas más grandes de desarrollo de mercado. En todo el mundo hay fondos disponibles para apoyar la comercialización del mercado en tecnologías de energías renovables y especialmente en tecnología fotovoltaica. Es de esperarse que más y más mercados estén disponibles. En muchos países la economía, y por tanto ingresos y demanda de electricidad, están creciendo más rápidamente que la red.

Ya hay algunos lugares donde los sistemas fotovoltaicos se venden sin subsidio o sin apoyo del gobierno. En muchos de los casos sin embargo, algún tipo de esquema crediticio es necesario para que la energía solar fotovoltaica sea asequible a un grupo mayor de clientes.

***Ejercicio 1.9:***
Los ejemplos del libro de texto hacen referencia a Indonesia. ¿Podría sugerir ejemplos del Perú o quizás de países cercanos al Perú? ¿Cuáles fueron las experiencias en dichos lugares?

***Ejercicio 1.10:***
Considerando las condiciones necesarias para instalar sistemas fotovoltaicos, piense en las regiones del Perú donde la energía solar fotovoltaica sería una buena opción. Si pudiera escoger, ¿dónde empezaría un negocio de venta de sistemas fotovoltaicos?

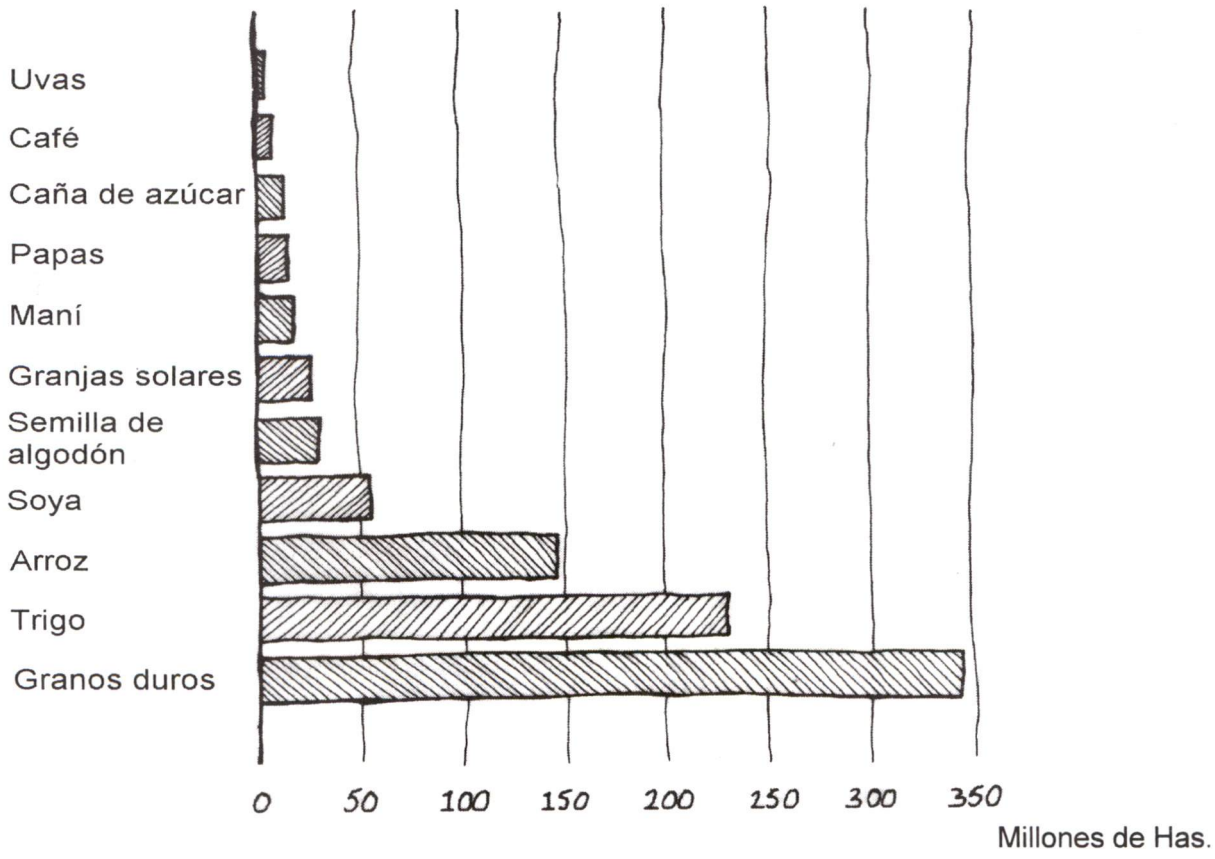
***Ejercicio 1.11:***
Se recomienda evitar que ciertos artefactos operen con energía solar. Dé algunos ejemplos y explique por qué.

# 2. LA FUENTE DE ENERGÍA SOLAR

## 2.1 Introducción

La energía que se recibe del sol es más que suficiente para cubrir toda la demanda energética del mundo. En realidad esta energía es 10,000 veces la actual demanda de energía del mundo. Si se quisiera cubrir todo este consumo con energía solar, se necesitaría una superficie de aproximadamente 25 millones de hectáreas (500 x 500 km), más o menos la misma área que se utiliza para cultivar maní o semillas de algodón. Como referencia, la actual producción de módulos fotovoltaicos está acercándose a los 100 $MW_p$/día, más o menos 1 kilómetro cuadrado al año (vea la figura 2.1).

**Figura 2.1:** ***Area terrestre requerida teóricamente para satisfacer la demanda mundial de energía con energía solar***

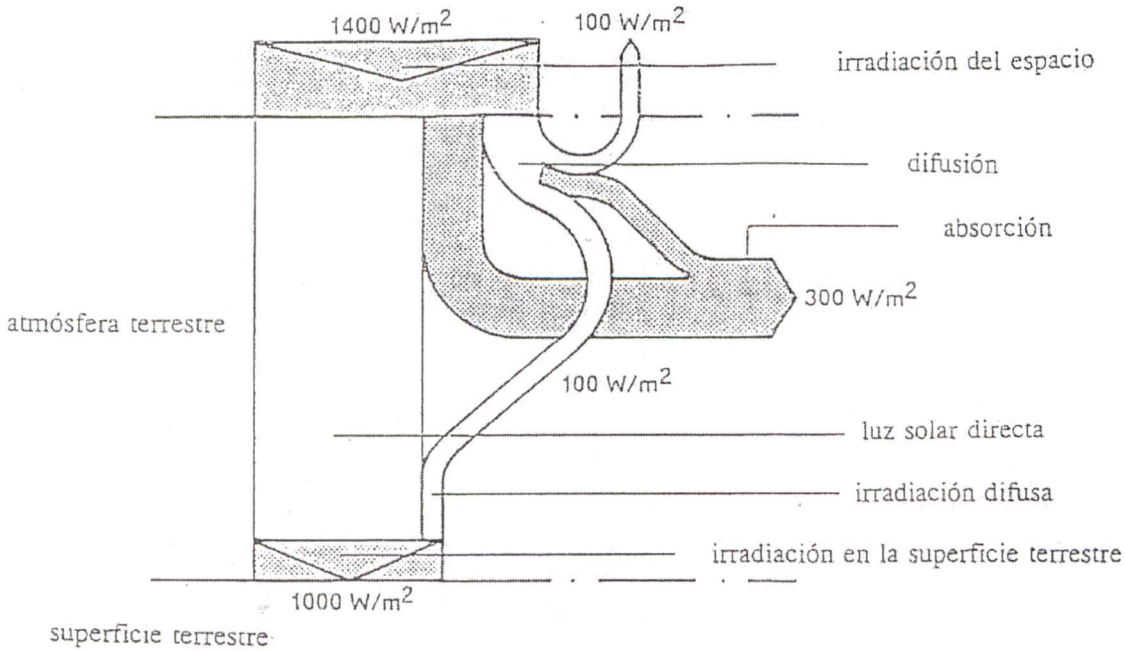



**Fuente: FAO, 1990**

Fuera de la atmósfera la radiación del sol tiene una intensidad de 1,350 $Wm^2$. En la tierra la máxima intensidad es aproximadamente 1,000 $Wm^2$, debido a las nubes, el polvo y el vapor de agua que absorbe, refleja y dispersa la radiación. Vea el balance energético de la radiación solar y algunos datos de radiación (figura 2.2).

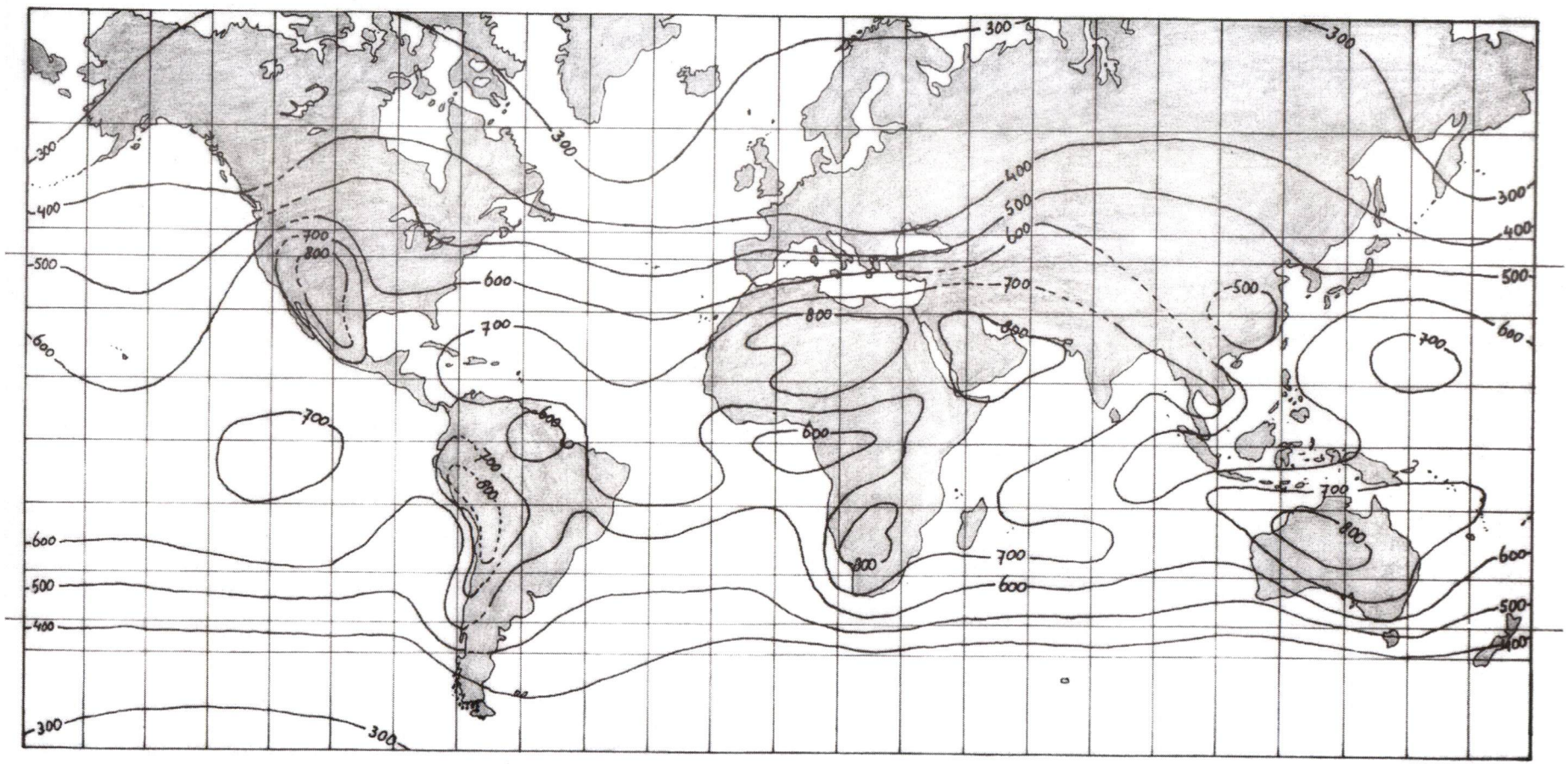
Pero en días muy despejados (aire seco, no hay polvo, no hay nubes) puede ser un poco más alta. La radiación no está distribuida equitativamente sobre la superficie de la tierra. Primeramente, debido a que las áreas alrededor del ecuador reciben más energía solar que en otras partes. En segundo lugar, debido a las diferencias en la humedad del aire y la nubosidad, hay variaciones de país a país, aún si se encuentran en la misma latitud. Por ejemplo, las áreas desérticas con climas muy secos y claros, reciben mayor radiación que las áreas tropicales donde la humedad es mucho mayor. Aún más, hay fluctuaciones debido a la rotación de la tierra alrededor de su eje (fluctuación diaria) y alrededor del sol (fluctuación estacionaria). En días claros, la energía solar está distribuida en el día en una especie de distribución de Gauss (forma de campana).
Todos estos diferentes efectos hace que la energía solar fluctúe fuertemente de región a región y de tiempo en tiempo. La distribución de la radiación solar alrededor del mundo se da en un Mapa Solar Mundial (World Sunshine Map) (vea la figura 2.3).

**Figura 2.2:** ***Balance energético de la radiación solar***




| **Algunos datos de la tierra:** | |
|---|---|
| Distancia media del sol | $1.5 \times 10^8$ km |
| Diámetro | 112,756 km |
| Superficie | $5.11 \times 10^8$ km$^2$ |
| Superficie continental | $1.49 \times 10^8$ km$^2$ (29%) |
| Superficie República Federal de Alemania | $2.48 \times 10^5$ km$^2$ (0.05%) |
| Superficie República del Perú | $12.85 \times 10^5$ km$^2$ (0.25%) |
| Densidad de radiación en el espacio cerca de la tierra (constante solar) | 1,400 W/m$^2$ |
| Potencia de radiación en la superficie terrestre | $1.76 \times 10^{11}$ MW |
| Energía de radiación en la superficie terrestre | $1.54 \times 10^{15}$ MWh/año |
| Densidad de radiación cerca de la superficie terrestre | 1,000 W/m$^2$ |
| Potencia de radiación en la superficie terrestre | $1.28 \times 10^{15}$ MW |
| Energía de radiación cerca de la superficie terrestre | $1.12 \times 10^{15}$ MWh/año |
| Energía de radiación en la República Federal de Alemánia | $2.48 \times 10^{11}$ MWh/año |
| Energía de radiación en la República del Perú | $19.52 \times 10^{11}$ MWh/año |

**Figura 2.3:** *Mapa Solar Mundial (Energía solar anual promedio en kJ/cm$^2$)*



Aún no existe un Mapa Solar del Perú, sin embargo, el Ministerio de Energía y Minas publica cada año el "Atlas de Minería y Energía en el Perú", en donde incorpora un mapa de horas de sol por año. Además, existe un cuadro del promedio de radiación solar diaria en el Perú, con la lista de los lugares en donde se realizan mediciones de radiación solar.

**Tabla 2.1:** ***Promedio de radiación solar diaria en el Perú***

| DEPARTAMENTOS | PROVINCIAS | DISTRITOS | LATITUD (°) | LONGITUD (°) | ALTITUD (metros) | IRRADIACION SOLAR DIARIA (kWh/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ICA | ICA | MANRIQUE | 13.7 | 76.0 | 4 | 4.52 |
| ICA | ICA | ICA | 14.0 | 75.7 | 390 | 4.89 |
| ICA | ICA | PARCON | 14.1 | 75.7 | 389 | 5.04 |
| ICA | NAZCA | HDA. MAYORO | 14.6 | 75.0 | 410 | 5.02 |
| ICA | NAZCA | MARCONA | 15.1 | 75.0 | 620 | 4.94 |
| AREQUIPA | CAILLOMA | SIBAYO | 15.5 | 71.5 | 3847 | 4.94 |
| AREQUIPA | AREQUIPA | AREQUIPA | 16.3 | 71.5 | 2.35 | 5.31 |
| AREQUIPA | AREQUIPA | CHARACATO | 16.4 | 71.5 | 2451 | 5.32 |
| AREQUIPA | AREQUIPA | PAMPA DE MAJES | 16.5 | 72.2 | 1.44 | 5.61 |
| MOQUEGUA | MARISCAL NIETO | MOQUEGUA | 17.2 | 70.8 | 1412 | 5.36 |
| TACNA | TARATA | PAUCARANI | 17.5 | 69.8 | 4541 | 5.41 |
| TACNA | TACNA | CALANA | 17.9 | 70.2 | 675 | 4.99 |
| CAJAMARCA | CAJAMARCA | CAJAMARCA | 7.1 | 78.5 | 2.64 | 4.47 |
| HUÁNUCO | LEONCIO PRADO | TINGO MARÍA | 9.1 | 76.0 | 640 | 4.02 |
| HUÁNUCO | HUÁNUCO | HUÁNUCO | 9.9 | 76.2 | 1895 | 4.52 |
| JUNÍN | CHANCHAMAYO | HUMAYA | 11.1 | 77.0 | 750 | 4.65 |
| JUNÍN | CHANCHAMAYO | SAN RAMÓN | 11.1 | 75.3 | 800 | 3.98 |
| JUNÍN | HUANCAYO | HUACHAC | 12.0 | 75.6 | 3.35 | 4.97 |
| HUANCAVELICA | CASTROVIRREYNA | ACONOCOCHA | 13.1 | 75.2 | 4.52 | 4.58 |
| AYACUCHO | HUAMANGA | AYACUCHO | 13.2 | 74.2 | 2.76 | 4.89 |
| APURIMAC | ABANCAYT | ABANCAY | 13.6 | 72.9 | 2376 | 4.75 |
| CUSCO | LA CONVENCIÓN | SANTA ANA | 12.9 | 72.7 | 920 | 4.01 |
| CUSCO | CUSCO | SAN JERÓNIMO | 13.6 | 71.9 | 3.22 | 4.69 |
| PUNO | HUANCANE | HUARAYA-MOHO | 15.4 | 69.5 | 3.89 | 5.16 |
| PUNO | PUNO | PUNO | 15.8 | 70.0 | 3875 | 5.19 |
| PUNO | CHUCUITO | JULI | 16.2 | 69.4 | 3852 | 5.05 |
| AMAZONAS | BAGUA | EL CENEPA | 5.1 | 78.4 | 240 | 2.89 |
| AMAZONAS | BAGUA | HDA. VALOR | 5.7 | 78.6 | 421 | 4.49 |
| SAN MARTÍN | SAN MARTÍN | JUAN GUERRA | 6.6 | 76.4 | 330 | 3.95 |
| LORETO | MAYNAS | IQUITOS | 3.8 | 73.3 | 125 | 3.73 |
| LORETO | REQUENA | REQUENA | 5.0 | 73.6 | 180 | 3.66 |
| LORETO | ALTO AMAZONAS/SANTA | MARÍA | 5.1 | 76.1 | 179 | 3.58 |
| LORETO | ALTO AMAZONAS | YURIMAGUAS | 5.9 | 76.1 | 185 | 4.14 |
| LORETO | UCAYALI | NESSHUYA | 8.0 | 75.1 | 340 | 2.51 |
| UCAYALI | PADRE ABAD | PADRE ABAD | 9.5 | 74.9 | 270 | 4.02 |
| UCAYALI | ATALAYA | YURAC-YURA | 9.0 | 75.0 | 320 | 3.14 |
| MADRE DE DIOS | TAHUAMANU | IBERIA | 11.4 | 69.6 | 350 | 3.68 |

Fuente: Ministerio de Energía y Minas/CENERGIA

***Ejercicio 2.1:***

Calcule qué área se requeriría para cubrir la demanda total de energía en el Perú. Primero, calcule la demanda de energía en el Perú, y luego, calcule el área de paneles fotovoltaicos.

***Ejercicio 2.2:***

La familia Flores desea comprar un sistema FV pero no está convencida de que el sol pueda proporcionar suficiente energía para cubrir sus necesidades. Piensan que quizás el sol está demasiado lejos. Explique en sus propias palabras qué tipo de energía proporciona el sol.

***Ejercicio 2.3:***

Explique por qué el nivel de radiación es mayor en las provincias de las zonas desérticas y del altiplano que en las de la selva.

## 2.2 Patrones estacionales y diarios

Además de las variaciones de lugar a lugar, hay variaciones en la intensidad solar de tiempo en tiempo. Las fluctuaciones estacionales en el Perú se dan en dos tablas con radiación solar por mes. De estas tablas se puede concluir que la radiación para Tumbes varía entre 3.0 kWh/m$^2$-día en julio a 5.1 kWh/m$^2$-día en marzo (vea la tabla 2.2 y 2.3).

## Tabla 2.2: *Cuadro de la radiación solar en el Perú*

| Lugar | Coordenadas | | Altura | Enero | Febr. | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Aug. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. | Año |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Abancay | 13.63 | 72.88 | 2398 | 5.42 | 4.89 | 5.03 | 4.94 | 4.72 | 4.56 | 4.81 | 5.11 | 5.08 | 5.86 | 5.97 | 5.33 | 5.14 |
| Angostura | 15.17 | 71.63 | 4155 | 5.47 | 4.92 | 4.89 | 4.97 | 4.83 | 4.78 | 4.89 | 5.36 | 5.42 | 6.06 | 6.14 | 5.64 | 5.28 |
| Atacocha | 10.58 | 76.22 | 4023 | 4.78 | 4.44 | 4.75 | 5.08 | 5.00 | 4.94 | 5.11 | 5.28 | 4.94 | 5.53 | 5.44 | 5.11 | 5.03 |
| Bambamarca | 6.68 | 78.52 | 2600 | 4.75 | 4.67 | 4.89 | 4.64 | 4.69 | 4.56 | 4.94 | 5.11 | 5.17 | 5.17 | 5.53 | 5.39 | 4.96 |
| Cajamarca | 7.17 | 78.52 | 2750 | 4.56 | 4.89 | 4.25 | 4.44 | 4.58 | 4.28 | 4.44 | 5.08 | 4.72 | 4.75 | 5.11 | 5.08 | 4.68 |
| Calana | 17.93 | 70.18 | 590 | 6.44 | 6.19 | 5.72 | 5.11 | 4.33 | 4.03 | 4.11 | 4.69 | 5.28 | 6.39 | 6.44 | 6.42 | 5.43 |
| Campo De Marte | 12.07 | 77.03 | 137 | 4.94 | 5.58 | 5.17 | 5.39 | 4.06 | 2.89 | 2.56 | 2.83 | 3.56 | 3.50 | 5.28 | 5.08 | 4.24 |
| Capachica | 15.63 | 69.83 | 3868 | 5.47 | 5.44 | 5.19 | 5.31 | 4.89 | 4.83 | 5.03 | 5.44 | 5.78 | 6.17 | 6.28 | 5.64 | 5.46 |
| Canete | 13.10 | 76.30 | 36 | 5.19 | 5.19 | 5.14 | 4.97 | 3.92 | 2.97 | 2.92 | 3.17 | 3.56 | 4.25 | 4.75 | 5.22 | 4.27 |
| Cartavio | 7.92 | 79.17 | 51 | 5.53 | 5.44 | 5.50 | 5.00 | 4.89 | 4.06 | 4.14 | 4.08 | 4.50 | 5.06 | 5.67 | 5.67 | 4.96 |
| Casa Grande | 7.77 | 79.17 | 158 | 5.39 | 5.33 | 5.39 | 5.00 | 5.19 | 3.92 | 4.06 | 4.28 | 4.42 | 4.97 | 5.14 | 5.53 | 4.88 |
| Caylloma | 15.18 | 71.77 | 4320 | 5.56 | 4.92 | 4.78 | 4.86 | 4.75 | 4.78 | 4.97 | 5.44 | 5.31 | 6.06 | 6.14 | 5.86 | 5.28 |
| Cayalti | 6.88 | 79.57 | 150 | 5.36 | 5.81 | 5.50 | 5.39 | 5.25 | 4.44 | 4.72 | 5.08 | 5.22 | 5.78 | 5.86 | 6.03 | 5.37 |
| Characato | 16.47 | 71.45 | 2461 | 6.14 | 5.33 | 5.56 | 5.50 | 5.22 | 4.81 | 5.19 | 5.64 | 6.11 | 6.92 | 7.06 | 6.58 | 5.84 |
| Conococha | 10.12 | 77.33 | 4020 | 4.86 | 4.33 | 4.44 | 4.72 | 4.78 | 4.89 | 5.17 | 5.42 | 5.25 | 4.89 | 5.53 | 5.08 | 4.95 |
| Cuenca Rio Verde | 15.48 | 70.67 | 4260 | 5.47 | 4.81 | 5.00 | 5.14 | 4.89 | 4.83 | 4.97 | 5.36 | 5.42 | 5.94 | 5.92 | 5.53 | 5.27 |
| Cuzco | 13.52 | 71.95 | 3365 | 5.19 | 4.69 | 4.92 | 5.03 | 4.81 | 4.78 | 5.06 | 5.11 | 5.17 | 5.64 | 5.75 | 5.22 | 5.11 |
| Desaguadero | 16.65 | 69.00 | 3850 | 5.72 | 5.56 | 5.58 | 5.53 | 4.92 | 4.67 | 4.81 | 5.39 | 5.47 | 6.17 | 6.06 | 5.67 | 5.46 |
| Don Martin | 11.03 | 77.68 | 50 | 5.33 | 5.06 | 5.06 | 4.86 | 4.00 | 3.25 | 3.36 | 3.58 | 3.97 | 4.36 | 5.03 | 5.44 | 4.44 |
| El Fraile | 16.15 | 71.18 | 4015 | 5.39 | 4.39 | 4.47 | 4.56 | 4.75 | 4.67 | 4.81 | 5.22 | 5.67 | 6.06 | 5.94 | 5.67 | 5.13 |
| Fundo Iberia | 11.35 | 69.57 | 180 | 4.81 | 4.67 | 4.64 | 4.31 | 4.25 | 4.31 | 4.69 | 5.25 | 5.03 | 5.00 | 5.06 | 4.61 | 4.72 |
| Granja M Sassape | 6.52 | 79.92 | 45 | 5.75 | 5.81 | 6.22 | 6.28 | 5.83 | 5.00 | 4.86 | 5.31 | 5.81 | 6.00 | 5.94 | 5.89 | 5.72 |
| Guayabamba | 3.75 | 73.23 | 122 | 4.44 | 4.22 | 4.25 | 4.36 | 4.28 | 4.14 | 4.36 | 4.64 | 0.00 | 5.33 | 4.78 | 5.22 | 4.17 |
| Hacienda Majoro | 14.83 | 74.97 | 620 | 5.56 | 5.72 | 5.81 | 5.06 | 5.03 | 4.28 | 4.53 | 5.06 | 5.81 | 6.58 | 6.36 | 5.94 | 5.48 |
| Haciendita | 17.02 | 71.62 | 450 | 6.42 | 5.58 | 5.92 | 5.33 | 4.39 | 4.06 | 3.94 | 4.50 | 4.78 | 6.08 | 6.42 | 5.56 | 5.25 |
| Huaraz | 9.53 | 77.52 | 3207 | 5.06 | 4.83 | 5.08 | 5.11 | 5.25 | 5.11 | 5.39 | 5.72 | 5.47 | 5.28 | 5.72 | 5.50 | 5.29 |
| Huancayo | 12.05 | 75.18 | 3350 | 5.25 | 4.86 | 4.94 | 4.64 | 4.92 | 4.83 | 5.00 | 5.11 | 5.11 | 5.33 | 5.83 | 5.39 | 5.10 |
| Huancayo | 12.12 | 75.33 | 3380 | 7.38 | 6.71 | 6.54 | 6.54 | 6.18 | 6.28 | 6.30 | 6.75 | 7.18 | 7.47 | 7.75 | 7.21 | 6.86 |
| Huanuco | 9.90 | 75.75 | 1912 | 4.67 | 4.53 | 4.64 | 4.64 | 4.78 | 4.58 | 4.81 | 5.14 | 4.86 | 5.08 | 5.33 | 4.89 | 4.83 |
| Huraya-Moho | 15.35 | 69.50 | 3890 | 5.25 | 4.69 | 5.00 | 5.31 | 4.83 | 4.83 | 5.14 | 5.56 | 5.69 | 5.86 | 6.03 | 5.31 | 5.29 |
| Ica | 14.08 | 75.73 | 398 | 5.86 | 5.00 | 5.42 | 5.11 | 4.78 | 5.75 | 4.17 | 4.81 | 5.25 | 6.17 | 6.44 | 6.14 | 5.41 |
| Imata | 15.82 | 71.07 | 4405 | 5.25 | 4.81 | 4.78 | 4.94 | 4.81 | 4.72 | 5.00 | 5.33 | 5.31 | 5.86 | 5.94 | 5.53 | 5.19 |
| Juli | 16.20 | 69.43 | 3862 | 5.50 | 4.81 | 4.47 | 5.25 | 5.11 | 4.78 | 4.97 | 4.97 | 5.47 | 6.06 | 6.06 | 5.33 | 5.23 |
| Kayra | 13.55 | 71.88 | 3219 | 5.00 | 4.47 | 4.61 | 4.86 | 4.64 | 4.78 | 4.89 | 5.03 | 5.08 | 5.33 | 5.56 | 4.89 | 4.93 |
| Lagunillas | 15.58 | 70.92 | 4280 | 5.67 | 5.22 | 5.11 | 5.03 | 4.67 | 4.53 | 4.89 | 5.53 | 5.58 | 6.28 | 6.39 | 5.75 | 5.39 |
| Lambayeque | 6.70 | 79.90 | 18 | 5.17 | 5.61 | 5.50 | 5.31 | 5.08 | 4.64 | 4.39 | 4.72 | 5.03 | 5.47 | 5.64 | 5.81 | 5.20 |
| La Molina | 12.08 | 76.95 | 251 | 5.03 | 5.17 | 5.25 | 5.00 | 3.97 | 3.33 | 3.31 | 3.56 | 3.75 | 4.36 | 4.83 | 5.08 | 4.39 |
| Lampas Alto | 10.08 | 77.28 | 4030 | 4.78 | 4.11 | 4.56 | 4.56 | 4.78 | 4.72 | 5.25 | 5.42 | 5.25 | 4.67 | 5.44 | 4.97 | 4.88 |
| Lampas Bajo | 10.07 | 77.37 | 3950 | 4.86 | 4.44 | 4.56 | 4.64 | 4.81 | 4.92 | 5.36 | 5.42 | 4.19 | 4.97 | 5.64 | 5.53 | 4.94 |
| La Punta | 12.07 | 77.17 | 13 | 4.50 | 5.08 | 4.94 | 4.72 | 3.89 | 2.94 | 2.89 | 3.00 | 3.17 | 3.61 | 4.28 | 4.86 | 3.99 |
| La Salle | 16.40 | 71.53 | 2330 | 6.14 | 5.33 | 5.58 | 5.33 | 5.22 | 4.72 | 5.11 | 5.64 | 5.94 | 6.58 | 7.06 | 6.58 | 5.77 |
| Llaucan | 6.68 | 78.52 | 2600 | 4.64 | 4.89 | 4.56 | 4.08 | 4.14 | 4.47 | 4.39 | 4.72 | 5.03 | 5.28 | 5.53 | 5.69 | 4.78 |
| Los Cedros | 3.13 | 80.67 | 5 | 4.78 | 5.39 | 5.44 | 5.25 | 5.28 | 4.53 | 4.61 | 4.67 | 4.39 | 4.58 | 4.86 | 5.39 | 4.93 |
| Moquegua | 17.20 | 70.93 | 1420 | 7.67 | 5.19 | 5.89 | 5.92 | 5.14 | 4.92 | 5.00 | 5.75 | 6.50 | 7.03 | 7.33 | 7.28 | 6.13 |
| Neshuya | 8.63 | 74.92 | 340 | 4.81 | 4.72 | 4.14 | 3.75 | 3.78 | 3.53 | 4.28 | 5.03 | 5.17 | 5.08 | 5.17 | 5.67 | 4.59 |
| Pampa Blanca | 17.10 | 71.75 | 455 | 5.28 | 4.75 | 5.19 | 4.78 | 3.67 | 3.11 | 3.42 | 3.42 | 3.28 | 4.42 | 4.86 | 5.11 | 4.27 |
| Pampa De Majes | 16.35 | 72.17 | 1433 | 6.58 | 5.97 | 6.08 | 5.69 | 5.22 | 4.86 | 5.36 | 5.81 | 6.22 | 7.03 | 7.31 | 6.92 | 6.09 |
| Pane | 15.42 | 71.07 | 4524 | 5.03 | 4.69 | 4.58 | 4.67 | 4.33 | 4.61 | 4.64 | 4.83 | 4.83 | 5.22 | 5.72 | 5.31 | 4.87 |
| Puno | 15.83 | 70.03 | 3875 | 5.69 | 5.22 | 5.28 | 5.28 | 4.97 | 4.78 | 5.00 | 5.61 | 5.78 | 6.39 | 6.61 | 5.67 | 5.52 |
| Punta De Coles | 17.68 | 71.38 | 15 | 6.67 | 6.36 | 6.61 | 5.19 | 4.14 | 3.25 | 3.00 | 3.67 | 3.42 | 4.58 | 6.36 | 6.28 | 4.96 |
| Querococha | 9.68 | 77.35 | 3935 | 4.33 | 4.22 | 4.56 | 4.83 | 4.72 | 4.61 | 5.00 | 5.25 | 5.17 | 4.67 | 5.31 | 4.64 | 4.78 |
| Quillabamba | 12.83 | 72.72 | 1660 | 4.44 | 4.33 | 4.72 | 4.25 | 4.33 | 4.22 | 4.44 | 4.44 | 4.50 | 4.89 | 4.97 | 4.56 | 4.51 |
| Salcedo | 15.32 | 70.02 | 3852 | 5.47 | 5.11 | 5.11 | 5.14 | 4.83 | 4.61 | 4.89 | 5.28 | 5.50 | 6.17 | 6.36 | 5.64 | 5.34 |
| San Jacinto | 9.17 | 78.32 | 283 | 5.06 | 4.33 | 5.17 | 4.94 | 4.75 | 4.00 | 4.33 | 4.50 | 4.97 | 5.72 | 5.83 | 5.83 | 4.95 |
| San Jorge | 8.53 | 74.87 | 270 | 4.81 | 4.61 | 4.67 | 4.50 | 4.42 | 4.36 | 4.92 | 5.39 | 5.00 | 5.19 | 4.53 | 4.61 | 4.75 |
| San Lorenzo | 9.75 | 77.47 | 3750 | 4.86 | 4.44 | 4.56 | 4.92 | 4.72 | 4.75 | 5.28 | 5.42 | 5.36 | 5.19 | 5.75 | 5.19 | 5.04 |
| San Ramon | 11.15 | 75.38 | 800 | 4.50 | 4.33 | 4.44 | 4.50 | 4.53 | 4.25 | 4.64 | 4.69 | 4.72 | 5.19 | 5.14 | 5.14 | 4.67 |
| Sibayo | 15.48 | 71.45 | 3847 | 5.36 | 4.69 | 4.69 | 4.94 | 4.81 | 4.75 | 4.89 | 5.00 | 5.22 | 5.86 | 5.94 | 5.53 | 5.14 |
| Tablazo | 5.37 | 81.78 | 147 | 4.19 | 5.28 | 5.61 | 5.17 | 5.33 | 4.64 | 4.83 | 5.44 | 5.64 | 5.89 | 5.78 | 6.14 | 5.33 |
| Tarapoto | 6.58 | 76.32 | 356 | 4.75 | 4.67 | 4.36 | 4.28 | 4.17 | 4.06 | 4.58 | 4.83 | 4.72 | 4.72 | 4.89 | 4.83 | 4.57 |
| Tejedores | 4.75 | 80.23 | 2500 | 4.47 | 4.75 | 5.08 | 4.81 | 5.28 | 4.86 | 5.06 | 5.39 | 5.64 | 5.75 | 5.78 | 5.58 | 5.20 |
| Tinajones | 6.67 | 79.47 | 220 | 5.44 | 5.61 | 5.39 | 5.58 | 5.72 | 5.06 | 5.75 | 5.86 | 6.00 | 6.22 | 6.50 | 6.64 | 5.81 |
| Tunelcero | 13.12 | 75.07 | 4600 | 4.97 | 4.67 | 5.14 | 4.97 | 4.67 | 4.81 | 5.08 | 5.42 | 5.28 | 5.86 | 5.97 | 5.44 | 5.19 |
| Yurac | 9.00 | 75.67 | 420 | 4.31 | 4.00 | 4.14 | 4.11 | 3.94 | 3.67 | 4.17 | 4.72 | 4.69 | 4.67 | 4.64 | 4.31 | 4.28 |
| Zorritos | 3.67 | 80.67 | 5 | 5.03 | 5.53 | 5.08 | 5.42 | 5.25 | 5.11 | 4.75 | 4.25 | 4.56 | 5.11 | 5.42 | 5.33 | 5.07 |

**Tabla 2.3:** ***Estimación de la media mensual de la radiación solar diaria en el Perú***

| DEPARTAMENTO | PROVINCIA | DISTRITO | LATITUD Grados | ALTITUD m | RADIACION DIARIA MEDIA MENSUAL EN KWh/m $^2$ | | | | | | | | | | | | MEDIA ANUAL kWh/m $^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC | |
| Tumbes | Tumbes | Corales | 3.6 | 85 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 4.5 | 4.1 | 3.0 | 3.9 | 4.2 | 4.2 | 4.6 | 4.9 | 4.5 |
| Piura | Talara | El Alto | 4.3 | 270 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.1 | 3.9 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.9 | 3.9 | 4.0 | 4.4 | 4.0 |
| Piura | Huancabamba | Huancabamba | 5.2 | 57 | 4.6 | 4.8 | 4.5 | 4.7 | 4.4 | 4.2 | 4.4 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 4.4 | 4.9 | 4.7 |
| Lambayeque | Lambayeque | Lambayeque | 6.7 | 10 | 5.4 | 5.4 | 5.2 | 5.0 | 4.6 | 3.9 | 3.8 | 4.3 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 5.3 | 4.9 |
| Lambayeque | Chiclayo | Cayalti | 7.1 | 150 | 5.9 | 5.9 | 5.5 | 5.5 | 5.0 | 4.4 | 4.5 | 4.9 | 5.6 | 5.8 | 6.1 | 6.2 | 5.5 |
| La Libertad | Ascope | Casagrande | 7.7 | 150 | 4.8 | 5.1 | 4.7 | 4.5 | 4.5 | 3.4 | 3.3 | 4.1 | 4.1 | 4.7 | 4.9 | 5.1 | 4.4 |
| La Libertad | Ascope | Cartavio | 7.9 | 51 | 5.0 | 6.1 | 5.0 | 4.7 | 4.8 | 3.8 | 3.6 | 4.4 | 4.3 | 4.9 | 5.3 | 5.5 | 4.8 |
| Ancash | Santa | Nepena | 9.2 | 203 | 5.5 | 6.4 | 5.9 | 5.3 | 5.5 | 3.5 | 3.7 | 4.6 | 4.5 | 5.6 | 5.7 | 5.7 | 5.2 |
| Ancash | Huaraz | Huaraz | 9.5 | 30 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 4.7 | 4.9 | 5.3 | 5.4 | 5.4 | 5.5 | 5.2 | 5.1 |
| Lima | Barranca | Paramonga | 10.7 | 15 | 5.3 | 4.4 | 5.1 | 4.7 | 2.7 | 1.9 | 2.3 | 2.1 | 2.7 | 4.3 | 4.9 | 5.5 | 3.0 |
| Lima | Lima | Jesus Maria | 12.1 | 10 | 5.5 | 5.3 | 5.2 | 5.0 | 5.6 | 2.3 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 3.3 | 4.0 | 4.8 | 3.8 |
| Lima | Lima | La Molina | 12.1 | 150 | 4.3 | 4.9 | 4.2 | 4.3 | 3.7 | 2.2 | 2.0 | 2.0 | 2.2 | 2.8 | 3.3 | 4.2 | 3.4 |
| Ica | Chincha | Chincha Alta | 13.4 | 94 | 5.3 | 4.7 | 4.9 | 5.0 | 3.5 | 2.7 | 2.6 | 3.2 | 3.9 | 4.8 | 5.6 | 4.9 | 4.2 |
| Ica | Inca | Caucato | 13.7 | 35 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 5.0 | 4.3 | 3.2 | 3.2 | 3.6 | 4.8 | 5.1 | 5.1 | 5.5 | 4.8 |
| Ica | Nazca | Marcona | 15.1 | 620 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | 4.9 | 4.3 | 3.8 | 3.8 | 4.4 | 5.1 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 4.9 |
| Arequipa | Arequipa | Arequipa | 16.3 | 2150 | 5.4 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 4.5 | 4.4 | 4.5 | 5.1 | 5.7 | 6.1 | 6.5 | 6.2 | 5.3 |
| Arequipa | Arequipa | Characato | 16.4 | 2451 | 5.2 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 4.6 | 4.4 | 4.6 | 5.2 | 5.7 | 6.6 | 6.5 | 5.9 | 5.3 |
| Arequipa | Arequipa | Pampa de Majes | 16.5 | 140 | 5.8 | 5.5 | 5.7 | 5.4 | 4.7 | 4.5 | 4.8 | 5.3 | 5.0 | 6.7 | 6.6 | 6.4 | 5.6 |
| Moquegua | Mariscal Nieto | Moquegua | 17.2 | 1412 | 5.5 | 5.2 | 5.8 | 5.2 | 4.6 | 4.3 | 4.4 | 4.8 | 5.7 | 6.4 | 6.6 | 6.3 | 5.4 |
| Tacha | Tarata | Paucarani | 17.5 | 4541 | 5.1 | 5.3 | 5.0 | 5.8 | 4.8 | 4.7 | 4.8 | 5.5 | 5.8 | 6.2 | 6.1 | 5.6 | 5.4 |
| Tacha | Tacna | Cajana | 17.9 | 875 | 5.6 | 5.5 | 5.2 | 4.8 | 4.2 | 3.8 | 4.0 | 4.4 | 4.9 | 5.7 | 6.0 | 5.9 | 5.0 |
| Cajamarca | Cajamarca | Cajamarca | 7.1 | 2640 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 4.2 | 4.2 | 4.1 | 4.8 | 4.5 | 4.4 | 4.6 | 4.9 | 4.7 | 4.5 |
| Huanuco | Leoncio Prado | Tingo Maria | 9.1 | 640 | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.9 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.2 | 3.9 | 4.0 |
| Huanuco | Huanuco | Huanuco | 9.9 | 1895 | 4.5 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.3 | 4.2 | 4.4 | 4.7 | 4.7 | 4.9 | 4.9 | 4.7 | 4.5 |
| Junin | Chanchamayo | Humaya | 1.1 | | 5.1 | 5.3 | 5.3 | 4.7 | 4.6 | 3.5 | 3.6 | 4.3 | 4.2 | 5.0 | 4.9 | 5.3 | 4.7 |
| Junin | Huanuco | Huachac | 12.0 | 1150 | 5.0 | 4.9 | 4.7 | 4.7 | 4.6 | 4.4 | 4.5 | 4.8 | 4.9 | 5.3 | 5.4 | 5.2 | 4.9 |
| Huancavelica | Castrovirreyna | Aconococha | 13.1 | 4520 | 4.9 | 3.7 | 4.1 | 4.3 | 4.2 | 4.6 | 4.3 | 4.6 | 4.9 | 4.9 | 5.2 | 4.9 | 4.8 |
| Ayacucho | Huamanga | Ayacucho | 13.2 | 2760 | 5.1 | 5.1 | 4.7 | 4.7 | 4.5 | 4.2 | 4.2 | 4.7 | 5.0 | 5.4 | 5.7 | 5.3 | 4.9 |
| Apurinac | Abancay | Abancay | 13.6 | 2378 | 4.8 | 4.7 | 4.7 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.2 | 4.7 | 5.0 | 5.5 | 5.4 | 5.0 | 4.7 |
| Cuzco | La Convencion | Santa Ana | 12.9 | 920 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.3 | 4.3 | 4.9 | 4.0 |
| Cuzco | Cuzco | San Jeronimo | 13.6 | 320 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.4 | 4.3 | 4.4 | 4.6 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 4.8 | 4.7 |
| Puno | Puno | Puno | 15.8 | 3875 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 4.6 | 4.4 | 4.6 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.0 | 5.6 | 5.2 |
| Amazonas | Bagua | Had Valor | 5.7 | 421 | 4.1 | 4.2 | 4.4 | 4.4 | 4.1 | 4.2 | 4.1 | 4.6 | 4.8 | 4.9 | 5.3 | 4.8 | 4.5 |
| San Martin | San Martin | Juan Guerra | 6.6 | 30 | 3.9 | 4.0 | 3.8 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.9 | 4.2 | 4.2 | 4.3 | 4.2 | 4.1 | 4.0 |
| Loreto | Maynas | Iquitos | 3.8 | 125 | 3.4 | 3.7 | 3.5 | 3.7 | 3.0 | 3.1 | 3.7 | 4.2 | 4.7 | 3.8 | 4.2 | 3.8 | 3.7 |
| Loreto | Requera | Requena | 5.0 | 180 | 3.9 | 4.0 | 3.7 | 3.5 | 3.4 | 3.4 | 3.7 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.2 | 3.8 | 3.9 |
| Ucayali | Padre Abad | Padre Abad | 8.5 | 270 | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 3.5 | 3.7 | 3.5 | 4.0 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.2 | 4.1 | 4.0 |
| Ucayali | Atalaya | Yurac-Yurua | 9.0 | -1 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 3.0 | 3.3 | 3.8 | 4.0 | 3.5 | 3.4 | 3.2 | 3.1 |
| Madre de Dios | Tahuamanu | Iberia | 1.4 | 150 | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.5 | 3.5 | 3.8 | 4.3 | 4.3 | 4.1 | 4.2 | 3.9 | 3.9 |

Estos datos son calculados en base a mediciones de horas de sol, horas por dia, usando la formula de Angstrom. Es una adaptacion propia a partir de la fuente original, Vasques, J.W. & Lloyd, P, Estimacion de la energia solar en el Peru en Revista Energetica, OLADE, AÑO 11 N° 1, abril de 1987.

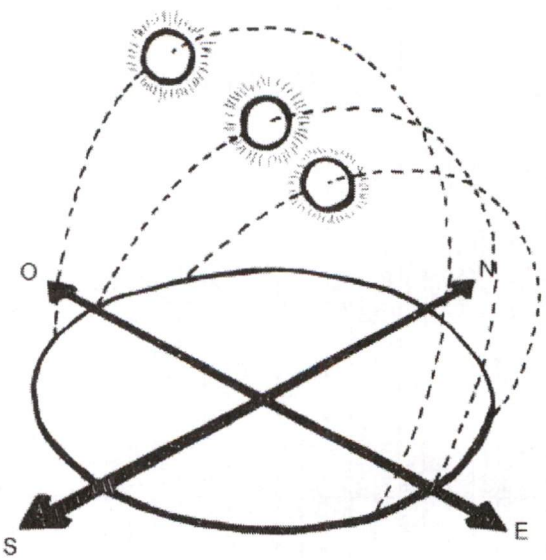
Este es un problema común con muchas de las fuentes de energías renovables (es por eso que algunas veces son llamadas fuentes intermitentes y es también una de las mayores limitaciones de estas fuentes) y se hace necesario usar algún tipo de capacidad para almacenamiento. Siempre es costoso almacenar energía y disminuye la eficiencia del sistema. Debería, en lo posible, evitarse el almacenar energía y minimizarse en otras circunstancias.

Almacenar electricidad por un corto tiempo (horas o un par de días) es posible utilizando las baterías. Las baterías son descritas detalladamente en una sección aparte, en este módulo. Por tanto, las fluctuaciones diarias pueden manejarse con baterías. Una gran cantidad de energía es recibida tan sólo un par de horas antes y después del mediodía. La mayor demanda de energía ocurre es generalmente durante la tarde o noche cuando el sol ha desaparecido. En estaciones lluviosas el sol puede desaparecer por varios días. Si se requiere de un suministro ininterrumpido de energía, la capacidad de almacenamiento (y también el tamaño de los paneles) debería aumentar. Normalmente el sistema debe estar diseñado de tal manera que unos cuantos días sin brillo solar puedan ser cubiertos sin problema.

No es posible almacenar electricidad por un período más largo (meses) sin el uso de baterías y otras opciones que son muy costosas. El almacenamiento a largo plazo para una pequeña generación de electricidad deberá entonces considerarse como no factible.

Por lo tanto, a veces se utiliza otra forma para nivelar fluctuaciones de estación. Los paneles solares se colocan, no en el ángulo que da el mayor rendimiento anual, pero sí en el ángulo en que las diferencias entre estaciones se minimizan. Tal vez esto disminuya la eficiencia del sistema pero aumenta la fiabilidad y también el comportamiento por dólar invertido.

**Figura 2.4:** ***Recorrido del sol***




***Ejercicio 2.4:***
Luego de observar las variaciones de la radiación solar por día y por estación, ¿cuáles son las consecuencias de dichas variaciones sobre los sistemas fotovoltaicos?

***Ejercicio 2.5:***

En la tabla 2.2 (Cuadro de la Radiación Solar en el Perú), observe cuál es la radiación solar anual promedio en dos distritos de Lima: Jesús María y La Molina. Aunque ambos se encuentran próximos, su nivel de radiación no es el mismo. Explique por qué.

## 2.3 Unidades

La radiación solar, la potencia solar, así como muchas otras variables pueden darse cualquier tipo de unidades. A pesar de muchos acuerdos para lograr una estandarización, aún se utilizan muchas unidades. En la siguiente tabla se da una visión general de las diferentes unidades comúnmente utilizadas y se dan sus factores de conversión.

Con frecuencia, la potencia de salida de un panel o sistema solar se expresa en Watt Pico ($W_p$). En condiciones estándar, la radiación solar es de 1,000 $W/m^2$ y la temperatura, 25 grados Celsius. Ésta es más o menos la radiación que se registra a medio día, en un día despejado y soleado. Entonces, un panel de 50 $W_p$ produce 50 W a plena luz solar.

**Tabla 2.4:** ***Unidades utilizadas en energía solar fotovoltaica***

| Unidad | Explicación | Conversión |
|---|---|---|
| **Potencia Solar** | | |
| $W_p$ | Watt pico | - |
| W | Watt | - |
| kW | Kilowatt (1000 W) | - |
| $W/m^2$ | Watt por metro cuadrado | - |
| **Energía solar** | | **a kWh/m²** |
| $KWh/m^2$/día | kWh por metro cuadrado por día | 1 |
| $KJ/cm^2$ | kJ por centímetro cuadrado | 2.778 |
| $MJ/m^2$ | MJ por metro cuadrado | 0.2778 |
| $KCal/cm^2$ | 1000 Calorías por centímetro cuadrado | 11.67 |
| $Btu/ft^2$ | Unidades termales británicas por pie cuadrado | 0.0428 |
| Langley | Caloría por centímetro cuadrado | 0.0116 |

***Ejercicio 2.6:***

El uso de diferentes unidades siempre ocasiona errores y confusión. Practique con las diferentes unidades para radiación solar que están actualmente en uso (vea la tabla 2.4).

1. ¿Cuánta energía expresada en MJ recibe por metro cuadrado la ciudad de Arequipa en un año?
2. ¿A cuántos $kWh/m^2$ equivalen 1,800 $kJ/cm^2$?

***Ejercicio 2.7:***

En el mapa solar mundial, observe cuál es la radiación solar tanto en Amsterdam, como en Lima. Exprésela en kWh/m$^2$ – año (vea la figura 2.3)

***Ejercicio 2.8:***

Calcule el requerimiento diario total de energía que registran los siguientes artefactos:

- Dos lámparas de 8 W cada una, encendidas durante cuatro horas.
- Una lámpara exterior de 12 W, encendida durante doce horas.
- Un televisor de 40 W, encendido durante tres horas.

## 2.4 Radiación solar en el Perú

En el Perú la radiación promedio es una de las más altas del mundo. Comparado con Holanda, el Perú recibe más del doble de energía solar. La fluctuación por estaciones en el Perú es mucho menor que la de las regiones nórdicas. En Holanda por ejemplo, la radiación promedio en invierno puede ser tan baja como 0.5 kWh/m$^2$–día, mientras que en el verano pueden darse valores como 5 kWh/m$^2$–día (como en el Perú).

Las tablas registran el promedio mensual la radiación solar para muchas de las estaciones en el Perú.

***Ejercicio 2.9:***

¿Cuál es la ciudad del Perú que recibe mayor radiación solar (en promedio)? Emplee ambas tablas de radiación solar y explique la diferencia.

## 2.5 Radiación solar en un lugar específico (inclinación, orientación)

Tome en cuenta que las cifras utilizadas en la sección anterior dan cantidades de energía por metro cuadrado en una superficie horizontal. Muchos de los paneles solares están inclinados para recoger mayor radiación solar. La cantidad óptima de energía se recoge cuando el panel está inclinado en el mismo ángulo que el ángulo de latitud. El ángulo debería ser de por lo menos 15° para asegurar que el agua de las lluvias drene fácilmente, lavando el polvo al mismo tiempo. A latitudes mayores (> 30° norte o sur) los paneles a veces están más inclinados sobre el ángulo de latitud para tratar de nivelar las fluctuaciones por estaciones.

Si los paneles solares están inclinados para optimizar la recolección de energía, o debido a que circunstancias locales rigen cuál debe ser el ángulo óptimo, la radiación promedio recibida debería ser corregida con un factor de inclinación.

La tabla que aparece en la página siguiente contiene los factores de inclinación establecidos para la situación del Perú.

**Tabla 2.5:** ***Factores de inclinación para Perú***

| Latitud | Factores de inclinación | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° |
| 0 – 5° | 0.99 | 0.97 | 0.94 | 0.92 | 0.88 | 0.84 |
| 5 – 10° | 1.01 | 1.00 | 0.98 | 0.96 | 0.93 | 0.89 |
| 10 – 15° | 1.03 | 1.02 | 1.02 | 1.00 | 0.98 | 0.96 |
| 15 – 20° | 1.06 | 1.07 | 1.06 | 1.05 | 1.04 | 1.02 |

**Ejemplo**

Para un lugar en el norte del Perú (latitud 0-5°) el factor de inclinación para un sistema mirando hacia el norte a un ángulo de 15°N es 0.98 y está un poco por debajo de 1. Esto es debido a que el ángulo óptimo sería de 5°, pero para evitar que el polvo se asiente y permitir el adecuado drenaje del agua, el ángulo mínimo debe ser de 15°.

Por tanto, la energía real recibida sobre los paneles en el lugar es de 0.99 veces la radiación sobre la superficie horizontal. Para otros lugares y otros ángulos de inclinación el factor inclinación puede diferir sustancialmente de 1 y entonces jugará un papel en la determinación del tamaño y optimización del sistema

Tome en cuenta que en estas tablas se supone que los paneles están mirando hacia la dirección correcta. Esto significa: en el hemisferio sur los paneles están mirando exactamente hacia el norte y en el hemisferio norte los paneles están mirando hacia el sur. Si éste no es el caso uno debe utilizar factores de corrección similares a las de desviación de un ángulo óptimo de inclinación. Se pueden utilizar compases o mapas de la ciudad para determinar la orientación correcta.

Por supuesto, algunas veces hay circunstancias locales que impiden la correcta colocación de los paneles. Por ejemplo, los paneles deben acoplarse sobre un techo inclinado que no tiene la inclinación adecuada y que no está mirando exactamente al sol.

En países cercanos al ecuador las consecuencias de desviaciones de las inclinaciones óptimas son poco importantes. El ángulo de inclinación es pequeño así que los paneles fotovoltaicos normales (normal = línea haciendo ángulo de 90° con panel fotovoltaico) nunca se desvían mucho del ángulo promedio de incidencia sobre la radiación solar (que está cercana a la normal sobre la superficie de la tierra). Aún así, de ser posible, es mejor dejar que los paneles miren al sol.

***Ejercicio 2.10:***
En una casa de Arequipa Ud. puede instalar un sistema FV d e 50 $W_p$, cuyo costo es de US$ 1,000. El panel puede ser instalado en el techo, el cual está orientado al norte y tiene una inclinación de 40°. La otra posibilidad es instalarlo en un sitio independiente (con un costo adicional de US$ 200), con el fin de colocarlo en una posición óptima. ¿Qué haría en este caso?

***Ejercicio 2.11:***
¿Por qué un módulo no debe ser fijado directamente sobre un techo de hojalata, sino al menos 10 centímetros por encima?

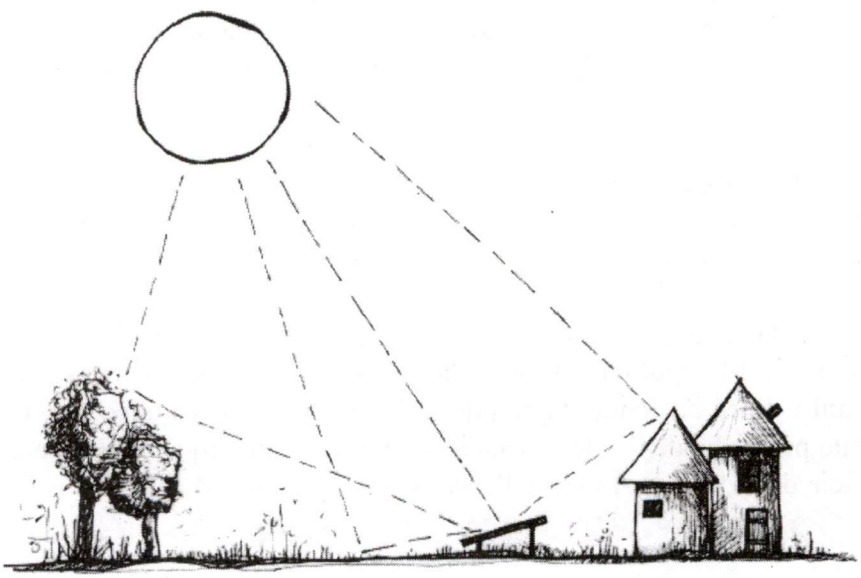
## 2.6 Sombras y reflejos

Es obvio que deben evitarse las sombras lo más posible. ¿Pero cuál es exactamente la influencia de un pequeño árbol al este de un panel fotovoltaico?, ¿Un edificio alto a 100 metros?, ¿O una pared detrás de los paneles fotovoltaicos?

Primero uno debe considerar que la sombra puede crear problemas con puntos calientes. Suponga, que de una serie de celdas, una está en la sombra y las otras están en el sol. Las celdas que están en el sol producen corriente que debe correr también por la célula que está en la sombra, la cual está actuando como una gran resistencia. Esta célula puede calentarse mucho por ese efecto.

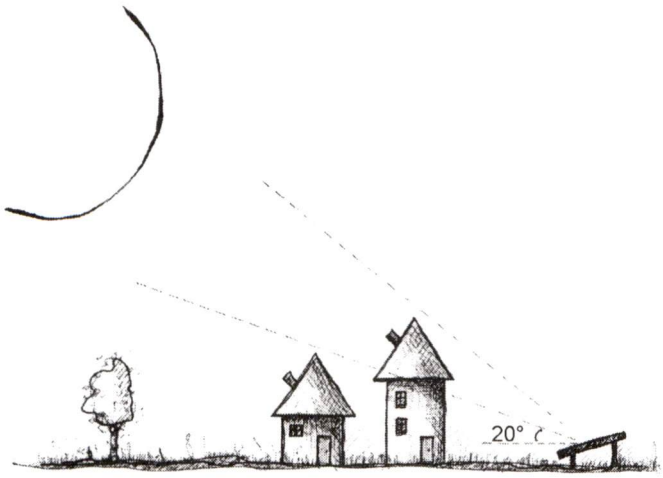
En segundo lugar, cualquier sombra tiene su influencia negativa sobre el rendimiento de un sistema solar. Así que aún un árbol pequeño (además del hecho de que muchos de los árboles pequeños eventualmente se convierten en árboles grandes) puede tener una influencia sustancial sobre el rendimiento si está justo en el lugar equivocado (figura 2.5).

**Figura 2.5:** ***Sistema solar y algunos obstáculos bajos***



Como regla la influencia de objetos en los alrededores puede descuidarse cuando el ángulo de la línea, desde el panel fotovoltaico hasta la cima del objeto, con la horizontal es menor a 20° (figura 2.6)

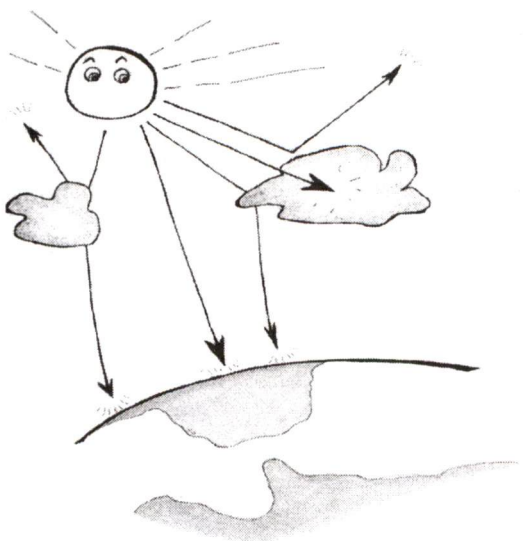
**Figura 2.6:** ***Angulo mínimo que no afecta al panel fotovoltaico***




Otro efecto, frecuentemente olvidado, es el de los reflejos de la radiación solar desde la superficie de la tierra u objetos en los alrededores. Diferentes materiales tienen distintos coeficientes de reflexión. Por ejemplo, un edificio blanco refleja casi toda la radiación. Un edificio oscuro absorbe mucha de la radiación. El césped o los árboles reflejan parte de la radiación, mientras que la tierra oscura absorbe mucho más.

Si uno tiene la oportunidad de escoger el color de las paredes en el vecindario directamente relacionado con un sistema fotovoltaico, es aconsejable elegir el blanco. O de lo contrario, si uno tiene la oportunidad de escoger el lugar, uno puede tomar en consideración este reflejo. Bajo ciertas circunstancias la reflexión puede ser de un 10% del total de la radiación o más.

**Figura 2.7:** ***Reflejos de obstáculos, edificios y de la superficie terrestre***



Entonces la influencia de los obstáculos cercanos es importante, aunque no tan importante como en el caso de molinos de viento. Lo que también es importante es que las circunstancias locales pueden cambiar: se construye nuevos edificios, árboles y arbustos crecen, nuevas fábricas se construyen botando humo y polvo, etc. Al escoger el lugar para un sistema fotovoltaico todos estos futuros cambios deben tomarse en cuenta, obviamente si es que pueden predecirse.

***Ejercicio 2.12:***

¿Por qué afecta al sistema si una de las partes del sistema FV recibe sombra mientras está operativo, aún si se trata de una sola celda?

***Ejercicio 2.13:***

¿Por qué no se debe fijar directamente un panel a un techo de hojalata, sino que se debe dejar un espacio de unos 10 centímetros encima del techo?

***Ejercicio 2.14:***

Una buena forma de estimar la influencia de los obstáculos en un vecindario que cuenta con un sistema de energía solar es calcular la trayectoria del sol durante el día, tanto en verano (cuando el sol sigue una trayectoria más alta) como en invierno (cuando el sol está más bajo). Escoja un lugar que presente obstáculos (algún lugar cerca del salón de clase) donde le gustaría instalar un sistema de energía solar, e imagine cuál sería la trayectoria del sol en verano y en invierno. Observe cuidadosamente y calcule con qué frecuencia los obstáculos sombrearán los paneles.

## 2.7 Mediciones

### 2.7.1 Instrumentos de medición

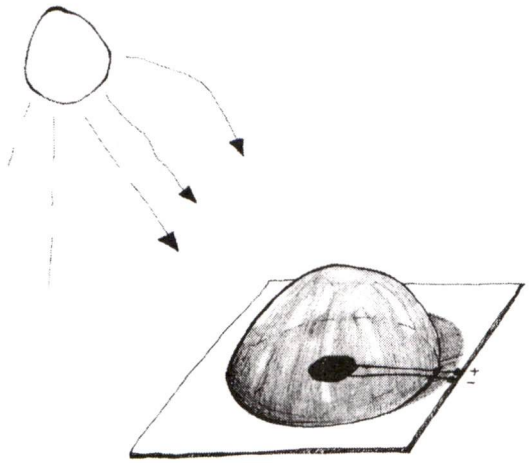
Para efectos de determinar el tamaño del sistema, para los estudios de factibilidad por ejemplo, usualmente no es necesario medir la radiación solar porque los valores promedios se conocen para muchos de los lugares sobre la tierra. No es así para los estudios de factibilidad o ubicación para generadores de viento, donde las condiciones meteorológicas son más importantes que para el caso de sistemas fotovoltaicos. Los valores promedios pueden usarse, si es necesario corregirse por los factores de orientación o inclinación, y esto es suficientemente exacto para los estudios de factibilidad. Sólo se deben considerar mediciones in situ cuando se realizan estudios de factibilidad para sistemas muy grandes que demandan grandes inversiones.

Podría ser necesario sin embargo tener una toma exacta de datos de la radiación en cierto lugar para simulaciones o para monitoreos detallados. En esta sección se discutirán las diferentes maneras de medir la radiación solar.

El nombre del instrumento que sirve para medir la energía solar es el **solarímetro**. Básicamente hay dos tipos de solarímetros: el **piranómetro** y el **medidor fotovoltaico.** Ambos tipos miden la radiación solar tanto directa como indirecta (difusa).

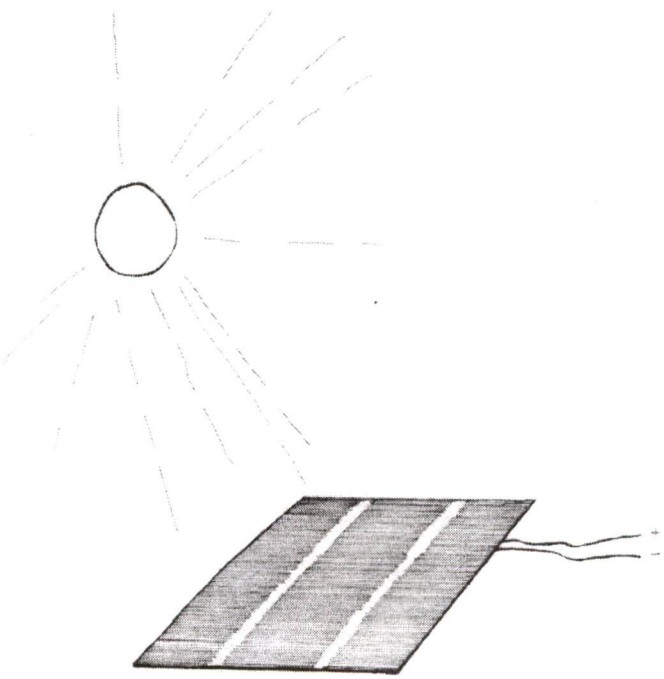
El **piranómetro** tiene dentro una pequeña plancha de metal negro con una termocupla unida a ella. Esta plancha negra se calienta al sol y con la termocupla el aumento en temperatura se puede medir. La plancha y la termocupla están cubiertas y aisladas por una cúpula de vidrio. La salida de la termocupla es medida para la radiación instantánea total en un momento dado.

**Figura 2.8:** *El piranómetro*



El **solarímetro fotovoltaico** no es nada más que una pequeña célula fotovoltaica que genera electricidad. La cantidad de electricidad es nuevamente medida para conocer la radiación instantánea. Los solarímetros fotovoltaicos son mucho más económicos que los piranómetros pero menos exactos.

**Figura 2.9:** *El solarímetro fotovoltaico*



### 2.7.2 Inexactitud

¿Qué tipo de solarímetro debe utilizarse y cuándo? Esto depende del propósito de las mediciones. Para una revisión instantánea durante una inspección al término de la instalación, no tiene sentido utilizar piranómetros costosos y exactos. El comportamiento real del sistema está sujeto de todos modos a fluctuaciones a corto plazo. La revisión es sólo para darse una idea del funcionamiento, no para medir el comportamiento en detalle. Si eso se requiere, deben medirse más variables durante un período de tiempo más largo y entonces tiene sentido utilizar equipos más exactos. Aún así, en esas circunstancias uno debe tomar en cuenta la exactitud de todo equipo de medición. Todas las inexactitudes deben ser del mismo orden.

### 2.7.3 Midiendo la radiación total

La radiación instantánea es útil sólo para determinar el comportamiento de una instalación en cierto momento. Por ejemplo, al término de una inspección. La mayor parte del tiempo sin embargo, uno está más interesado en la radiación durante un período más largo; por día, por mes o por año.

Especialmente si uno desea monitorear el comportamiento de un sistema en detalle, entonces será necesario medir la entrada y salida del sistema por un período más largo (varios meses, un año). Sólo en esa forma los disturbios o problemas a corto plazo pueden reglamentarse y hacerse evaluaciones más exactas del comportamiento.

Así, la radiación total a lo largo de períodos de tiempo fijos (total por hora o día) tendrán que medirse. Una ventaja de los solarímetros fotovoltaicos es que también están disponibles con un integrador para que la radiación total diaria u horaria puedan ser medidas sin dificultad. Si se utilizan los piranómetros, esto no puede realizarse automáticamente. Si la insolación total por hora o por día es requerida, tendrán que utilizarse los data loggers para almacenar y agregar las mediciones instantáneas.

Los data loggers son costosos y por lo tanto, sólo se utilizan para monitoreos detallados de sistemas grandes o para estudiar sistemas experimentales (ver también la sección en el módulo de energía eólica sobre data loggers y capacidad de almacenamiento). Se tratará en detalle cómo armar el monitoreo de un sistema fotovoltaico en la última parte de este módulo en "Monitoreo y Retroalimentación".

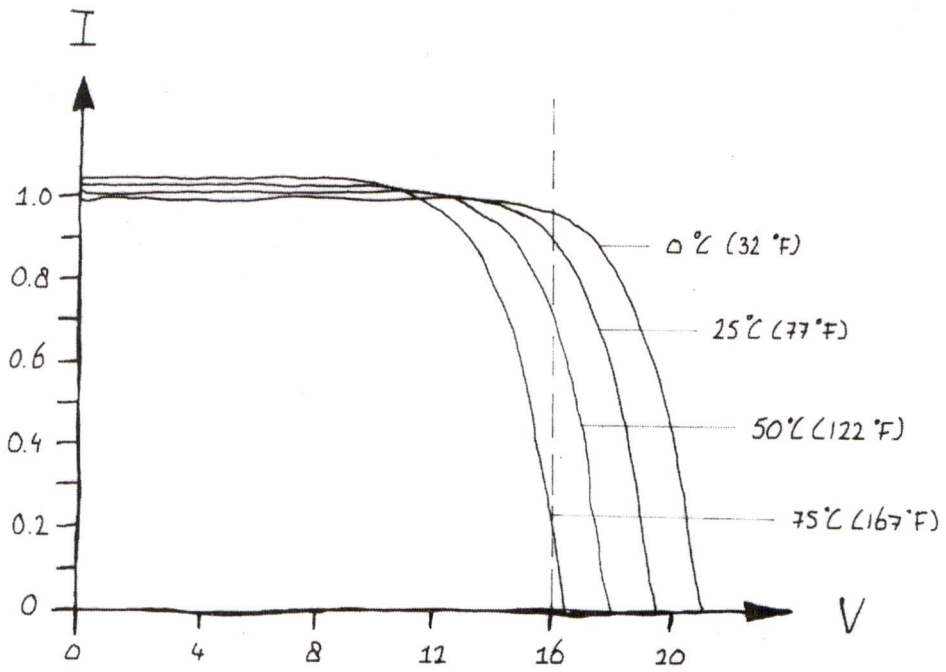
**NOTA:** ¡En un proyecto de monitoreo, la insolación debe medirse bajo el mismo ángulo en que están colocados los paneles!

### 2.7.4 Midiendo temperatura

Sólo será necesario contar con datos de temperatura para proyectos de monitoreo específicos. La eficiencia de los paneles fotovoltaicos está influenciada por la temperatura de los paneles. A más baja temperatura, mayor eficiencia. Por lo tanto, si se hace una evaluación detallada del funcionamiento del sistema fotovoltaico, será necesario medir la temperatura de los paneles. También el aire ambiental puede medirse para tener un indicador de la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y los paneles fotovoltaicos.

Estas temperaturas pueden medirse con un termómetro estándar como las termocuplas o termómetros infrarrojos (que funcionan bajo el principio que la radiación de un cuerpo es proporcional a su temperatura) (ver figura 2.10).

**Figura 2.10:** ***Efecto de la temperatura de la célula en la curva I – V de un panel solar***




El gráfico que muestra la influencia de la temperatura en la eficiencia de celdas fotovoltaicas demuestra que el efecto de la temperatura es pequeño pero no debe menospreciarse. En el gráfico, las eficiencias del módulo se dan para un rango de temperaturas desde 0 –75°C (o 32 – 167°F). El voltaje cae con el aumento en temperatura mientras que la corriente aumenta ligeramente. Para obtener la salida máxima a un voltaje de operación de 16 V, es mejor mantener la temperatura de las celdas lo más baja posible.

Tome en cuenta que la temperatura dada es la temperatura de la célula y no la temperatura del aire ambiente. Las celdas, por ser azules, absorben una considerable cantidad de radiación que provoca un aumento en la temperatura de la célula (sólo una parte de la radiación es convertida en electricidad, el resto es convertida en calor o reflejada). En promedio, las celdas estarán 30° más calientes que la temperatura del aire ambiente. Para mantener las celdas frías, éstas deberían ser acopladas de tal manera que sea posible la libre circulación de aire.

***Ejercicio 2.15:***

Como técnico, Ud. tiene que instalar medidores para monitorear el funcionamiento de un gran proyecto de demostración en el que se instalará un sistema fotovoltaico de 100 kW para abastecer de electricidad al Ministerio de Energía y Minas en Lima. ¿Qué tipo de medidores instalaría y dónde?

## 2.8 Conclusiones

Para determinar y usar la radiación solar de manera óptima deben seguirse los siguientes pasos:

1. Calcular el promedio diario de radiación en el lugar, utilizando los mapas de radiación del mundo o (mejor aún) los datos de radiación de una estación meteorológica cercana. Para sistemas solares costosos o a gran escala, la radiación debería medirse preferentemente por varios años.

2. Determine el ángulo de inclinación óptimo y la orientación para el lugar:
   Inclinación = latitud, o inclinación = latitud + $5^{o}$ para optimización
   orientación norte

3. Si se aplica, (cuando la inclinación u orientación difieren mucho de la óptima) corregir el rendimiento de los paneles con los factores de inclinación y orientación.

4. Calcule la influencia de sombras y reflejos. Si es necesario corrija el rendimiento de los paneles o busque una mejor ubicación.

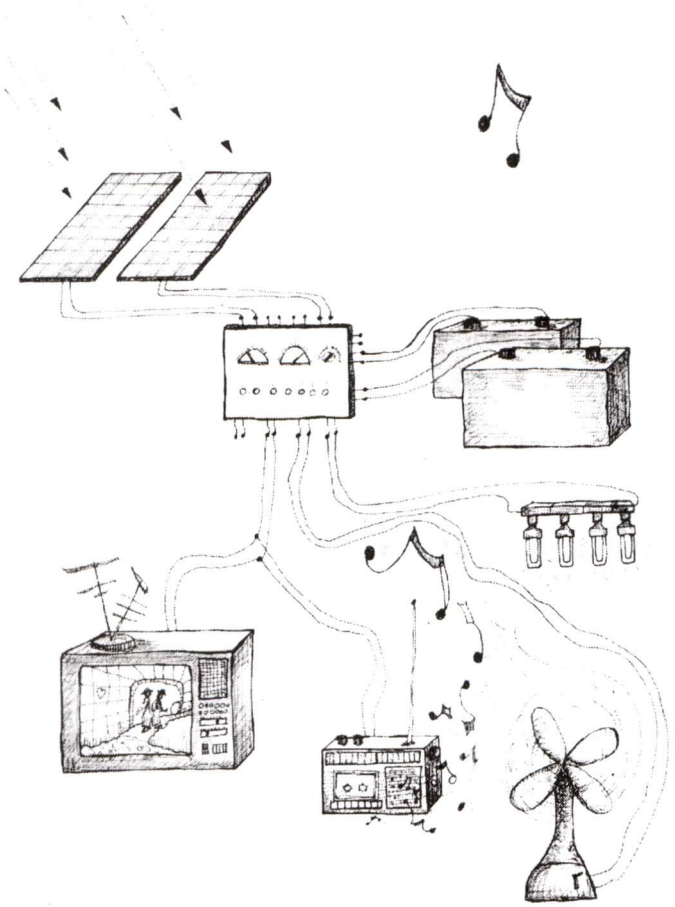
## 3. ¿CÓMO OPERAN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS?

### 3.1 Distribución del sistema

Un sistema fotovoltaico convierte la radiación solar en energía eléctrica. Los componentes de los sistemas solares FV pueden ser muy distintos pero en general la disposición del sistema y los principios de funcionamiento son siempre los mismos.

Un sistema fotovoltaico consiste de un panel o módulo, una unidad de control, una batería de almacenamiento (opcional) y la carga eléctrica. El panel fotovoltaico convierte la radiación solar en corriente continua con un nivel de voltaje fijo. Muchos de los paneles surten potencia a un voltaje de 12V. La corriente depende de la intensidad de la radiación solar.

**Figura 3.1:** ***Esquema de la disposición de un sistema fotovoltaico***



La unidad de control está en el centro del sistema y dirige a la corriente desde el panel fotovoltaico ya sea directamente a la carga eléctrica (uso final) o a la batería de almacenamiento. Si hay una carga eléctrica cuando no hay sol, la unidad de control dirigirá energía desde las baterías a la carga. Las baterías se necesitan para almacenar la energía que se utilizará después, por ejemplo durante la noche o días nublados.

El uso final de la electricidad puede ser cualquier aplicación eléctrica, desde una simple bombilla de luz hasta pequeñas máquinas o bombas. Los sistemas fotovoltaicos grandes pueden también utilizarse para generación eléctrica a gran escala y en esos casos los sistemas fotovoltaicos serán conectados a la red.

Como se mencionó, los módulos fotovoltaicos generarán potencia a un voltaje CC de 12 V (o a veces 24V). Si se utilizan artefactos eléctricos estándar, es necesario cambiar este bajo voltaje CC a un voltaje mayor CA (110 ó 220 V) con 50 ó 60 Hz de potencia. Para esta conversión de CC a CA se utiliza un inversor. Esto se hace antes del uso final y después de las baterías porque no puede almacenarse electricidad CA.

Los cables que se utilizan en el transporte de electricidad desde los paneles a los controles, baterías y uso final deben diseñarse para corriente CC de bajo voltaje. Esto significa que, si la misma cantidad de energía debe transportarse, deberán ser más gruesos que los cables que generalmente se usan para 220 V.

***Ejercicio 3.1:***
¿Por qué los cables para distribuir energía solar son más gruesos que los utilizados para los sistemas de 220 V, de uso común en los hogares?

## 3.2 Celdas fotovoltaicas, proceso de producción

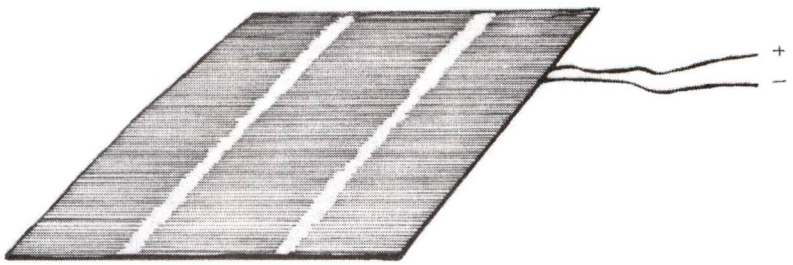
El proceso de producción de las celdas fotovoltaicas es una actividad complicada de alta tecnología que requiere de inversiones gigantescas. Desde el punto de vista económico no es interesante armar una pequeña planta de fabricación en países en desarrollo porque el precio de las celdas que se fabrican es proporcionalmente inverso al tamaño de la planta manufacturera fotovoltaica. Por lo tanto una planta pequeña nunca podrá competir con las grandes y ya existentes plantas en los EE.UU., Europa y Japón. Aún en un país como India, con bajos costos de mano de obra y bajos precios de energía, pocas plantas están produciendo celdas fotovoltaicas aproximadamente por 5 US$/$W_p$, mientras que los precios internacionales hoy en día están en el orden de los US$ 3 por $W_p$ (éstos son precios de producción).

Básicamente el proceso de producción de celdas cristalinas consiste en producción de obleas y fabricación de celdas a partir de éstas.

Las obleas (láminas muy delgadas de silicio cristalino) se cortan de un bloque sólido de silicio. Se produce un silicio policristalino enfriando un contenedor de silicio derretido. El cristalino puro se produce sacando un lingote del silicio derretido. También es posible hacer crecer cristal directamente sobre una placa de metal, eliminando así el proceso de corte (que es el costoso). Es más barato producir silicio policristalino que el monocristalino y también puede utilizarse materia prima menos costosa. Sin embargo la eficiencia es un poco menor. Los costos del silicio crudo son algo más caros y con la demanda creciente de celdas fotovoltaicas y otros semiconductores los precios tienden más a subir que a bajar. Para bajar el precio de las celdas fotovoltaicas se están utilizando nuevas técnicas de corte que producen menos desperdicio al

serrucho y que pueden cortar láminas más delgadas. Otra posibilidad es, por supuesto, crear los cristales directamente sobre una superficie; las capas pueden hacerse muy delgadas y no hay pérdidas en el corte.

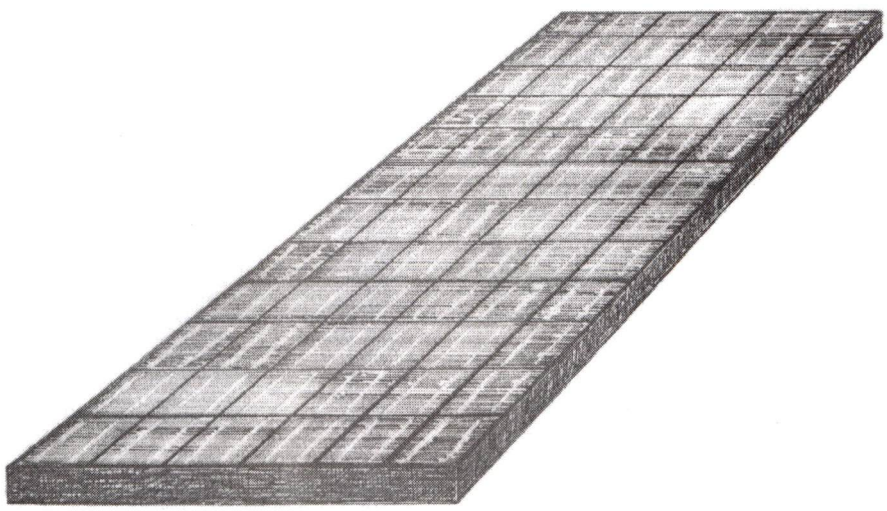
**Figura 3.2:** ***Una celda fotovoltaica***




## 3.3 Paneles fotovoltaicos, módulos

Generalmente las celdas hechas en forma redonda o cuadrada son del orden de los 100 $cm^2$. El voltaje de una célula es aproximadamente de 0.5 V CC. Para tener un voltaje mayor, como de 12 ó 24 V, un número de celdas se conecta en serie. Para el cargado de baterías el voltaje de salida de un módulo debería siempre ser un poquito más alto que el voltaje de la batería. Esto significa que un módulo FV diseñado para cargar batería de 12 V debería producir alrededor de 17 – 18 V, dicho módulo puede hacerse, por ejemplo, de 36 celdas de silicio en serie (36 × 0.5 = 18 V).

**Figura 3.3:** ***Panel fotovoltaico***



Todas las características básicas de un panel fotovoltaico están señaladas bajo condiciones estándar (radiación = 1,000 $W/m^2$, T = 25 °C):

Potencia Pico [$W_p$] = Máxima salida de potencia en Watts pico (por ejemplo 36 $W_p$)
Corriente de cortocircuito [A] = Corriente entre los polos conectados de un módulo (por ejemplo, 2.31 A para un módulo de 36 $W_p$)
Voltaje abierto [V] = Voltaje entre los polos de un módulo sin carga (por ejemplo, 20.5 V para un módulo de 36 $W_p$)

Generalmente, el voltaje de un panel fotovoltaico es constante, sin importar la radiación. Sin embargo, la corriente es directamente proporcional a la radiación. Por lo tanto, la salida de potencia de un panel es también directamente proporcional a la radiación.

Ejemplo: Salida de un panel típico de 60 $W_p$:

| Radiación [$W/m^2$] | Condiciones climáticas | Voltaje en circuito abierto [V] | Corriente de cortocircuito [A] | Salida de Potencia [W] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | Nublado | 15 | 0.5 | 6 |
| 500 | Pocas nubes | 19 | 2.5 | 30 |
| 1,000 | Despajado | 20 | 5 | 60 |

A altas temperaturas, la salida de un panel disminuye. En promedio, disminuirá un 0.5% por cada grado Celsius por encima de la temperatura estándar.

Ejemplo: A 50 grados Celsius, la salida de un panel de 60 $W_p$ disminuirá en: $60 \times 0.5\% \times (50 - 25) = 7.5$ Watt

El tamaño usual de los módulos es alrededor de 0.5 $m^2$ que es el tamaño más pequeño para un panel de 12V cuando se utilizan celdas de 100 $cm^2$. Un factor importante que determina la salida de un panel solar es el factor de empaque. Algunos módulos se hacen de tal manera que relativamente gran parte del panel permanece vacío, mientras que en otros módulos las celdas se empacan de manera bastante densa. Esto aumenta la salida neta por metro cuadrado de un módulo, aún si las mismas celdas fotovoltaicas se usan. La salida usual de los módulos fotovoltaicos es alrededor de 100 $W_p$ por metro cuadrado.

Como se mencionara anteriormente, no tiene sentido comenzar a producir celdas fotovoltaicas a pequeña escala. Es posible sin embargo importar las celdas fotovoltaicas para ensamblar los paneles, más que importar los paneles completos. Esto puede hacerse con herramientas relativamente sencillas y se practica a pequeña escala en los países en desarrollo.

***Ejercicio 3.2:***
¿Cuáles son los voltajes de operación típicos de los sistemas solares de energía?

***Ejercicio 3.3:***
A continuación incluimos un ejemplo de las especificaciones técnicas para un módulo solar:

Potencia: 53 $W_p$ Bajo condiciones de prueba estándar de 1,000 W/m$^2$,
Voltaje en circuito abierto: 21.8 V 25 °C de temperatura de celda y 1.5 de masa de aire
Corriente de cortocircuito: 3.27 A
Voltaje en carga: 17.4 V
Corriente en carga: 3.05 A
Número de celdas en serie: 36
Tamaño de celda: 4.05 pulgada cuadrada (102.9 mm$^2$)
Tipo de celda: silicio monocristalino

¿Qué parámetro es el más apropiado para calcular el tiempo que demorará el módulo en cargar una batería?

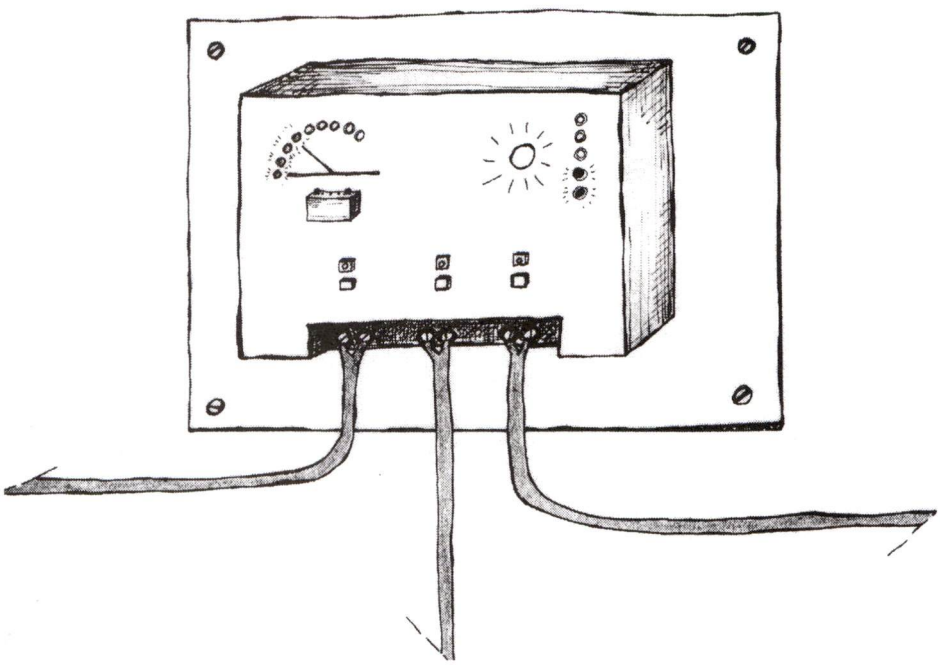
¿Cuánto tiempo tomará cargar una batería vacía, cuya capacidad nominal es de 90 Ah, en una localidad con seis horas diarias de radiación solar a 1,000 W/m$^2$?

## 3.4 Componentes eléctricos

### 3.4.1 Unidad de control

Como puede deducirse de la disposición del sistema, la unidad de control es un dispositivo localizado en el centro del sistema fotovoltaico.

**Figura 3.4:** ***Ejemplo de una unidad de control***



Sus funciones son las siguientes:

i. Dirigir la electricidad generada en los paneles fotovoltaicos hacia el uso final si el tiempo de demanda de electricidad coincide con las horas de sol.

ii. Dirigir la electricidad generada en los paneles fotovoltaicos hacia la batería en caso que haya un exceso de potencia solar (la potencia generada > demanda de potencia).

iii. Dirigir la electricidad de la batería al punto de uso final cuando la demanda exceda la generación de potencia del panel fotovoltaico.

iv. Impedir que la batería se sobrecargue y descargue.

v. Impedir daños en los cables para evitar cortocircuitos.

vi. Indicar el funcionamiento del sistema fotovoltaico y el estado de carga.

Para elegir una unidad de control, deberá estar al tanto de varios aspectos. Las características principales de la unidad son:

- Máxima corriente aceptada, proveniente de los módulos fotovoltaicos (por ejemplo 5 A)
- Máxima corriente de suministro a la batería (por ejemplo 5 A)
- Indicador de bajo voltaje de la batería (por ejemplo LED)
- Indicador de carga solar (por ejemplo LED)
- Voltaje de entrada de carga de batería (Depende del tipo de batería. Para una batería sellada, será de 13.3 – 14.0 V)
- Voltaje de entrada de descarga (para una batería sellada entre 11.4 y 11.9 Volt)
- Tipo de regulación (estado sólido y con un relay)
- Dispositivo de reseteo (automático o manual)
- Protección eléctrica (fusibles para cortocircuito o iluminación)
- Protección contra polaridad inversa (fusible o diodo bloqueador)
- Voltajes de entrada regulables

Las unidades de control pueden venderse como un todo o pueden ensamblarse localmente. Unidades de control confiables y probadas están disponibles pero en los países en desarrollo puede resultar difícil o muy costoso comprarlas.

Una unidad de control puede fabricarse localmente pero uno debe tener mucho cuidado al diseñar su propio controlador. Como el controlador es el corazón de un sistema fotovoltaico su funcionamiento determina el comportamiento y tiempo de vida del sistema completo. Una unidad de control que extrae demasiada electricidad de la batería causará la falla temprana de ésta y tal vez incluso pueda dañar los cables y dispositivos. Un controlador que apaga los paneles antes de tiempo influye en la eficiencia del sistema. Por lo tanto es aconsejable usar sólo diseños probados.

Aún con diseños ya probados uno debe tener cuidado al construir sus propios diseños. Errores con la tolerancia correcta y la calidad de las partes electrónicas se cometen fácilmente. Debe haber suficiente enfriamiento y ventilación del circuito electrónico para evitar el recalentamiento de los componentes pero la caja que alberga esto, debe también ser a prueba de agua. Las conexiones a la unidad de control deben hacerse de tal manera que los usuarios menos capacitados no puedan cometer errores fatales, etc.

Estas son algunas observaciones y hay muchos otros temas prácticos que el fabricante de unidades de control ha tenido que solucionar, a través de años de dificultades, experiencias prácticas de investigación y desarrollo tecnológico (I + D).

Las unidades de control pueden diseñarse para realizar más tareas y no simplemente la de controlar las corrientes y la carga/descarga de la batería. También puede controlar diferentes usos finales (como darle prioridad a grupos de aplicaciones en caso de falta de fluido) y puede monitorear el comportamiento de todo el sistema (aunque la mayoría de los controladores sólo dan un indicador de estado).

Otro aspecto de las unidades de control modernas es el MPPT o *máxima potencia del punto de tracción*. Esto significa que el controlador determina el punto óptimo de trabajo de la curva FV; ¿qué voltaje operativo da la mayor eficiencia?

***Ejercicio 3.4:***
¿Por qué es necesario contar con unidades de control en los sistemas fotovoltaicos?

***Ejercicio 3.5:***
¿Qué significa "polaridad inversa" y por qué es un problema?

### 3.4.2 Cables

Los cables utilizados en un sistema fotovoltaico están cuidadosamente diseñados. Como el voltaje en un sistema fotovoltaico es voltaje CC bajo, 12 ó 24 V, las corrientes que fluirán a través de los cables son mucho más altas que las de los sistemas con voltaje CA de 110 ó 220 V. La cantidad de potencia en W producida por la batería o panel fotovoltaico está dada por la siguiente fórmula:

$$P = U \times I$$

Donde U es la tensión en V e I es la corriente en A. Para suministrar una potencia a 12 V, significa que la corriente será casi 20 veces más alta que en un sistema de 220 V. Esto quiere decir que cables mucho más gruesos deben usarse para impedir el recalentamiento e incluso la quema de los cables.

**Figura 3.5:** ***Cable***

El tamaño de los cables lo mostramos en la siguiente tabla, la corriente máxima que puede fluir sin recalentar el cable y la cantidad de potencia que puede producirse a diferentes voltajes.

**Tabla 3.1:** ***Tamaño de los cables, corriente máxima y potencia***

| Tamaño del cable, corte de área seccional ($mm^2$) | Corriente Máxima [A] | Potencia generada [W] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 12 V | 24 V | 220 V |
| 1.0 | 10 | 120 | 240 | 2200 |
| 1.5 | 15 | 180 | 360 | 3300 |
| 2.5 | 20 | 240 | 480 | 4400 |
| 4.0 | 30 | 360 | 720 | 6600 |
| 6.0 | 35 | 420 | 840 | 7700 |
| 10.0 | 50 | 600 | 1200 | 11000 |
| 16.0 | 70 | 840 | 1680 | 15400 |
| 25.0 | 90 | 1080 | 2160 | 19800 |

*Fuente: [1]*

De esta tabla se deduce claramente que a voltajes bajos, sólo bajas demandas de potencia pueden abastecerse o cables muy gruesos deben utilizarse. Para alcanzar una potencia de 1 kW a 12 V un cable de 25.0 $mm^2$ debe utilizarse para suministrar tanto como 20 kW a 220 V. Esto aumenta el precio del sistema drásticamente debido a que los cables más gruesos son más costosos.

Tome en cuenta que estos tamaños sólo se aplican para cables cortos. Se utiliza otro enfoque en lo que se refiere a un módulo de energía eólica donde el punto de partida es la máxima caída permisible de voltaje sobre el cable, dado el largo, voltaje y corriente.

Cuando se utilizan fusibles, para proteger la unidad de control o dispositivos contra corrientes altas, el tamaño de los fusibles no debería ser mayor a la proporción de corriente máxima del cable. Los fusibles son útiles sólo en el extremo de uso de la batería pues en el lado FV de la batería la corriente de cortocircuito es sólo 10% mayor que la corriente máxima durante brillo solar completo.

Cuando se diseñan sistemas más grandes, uno debe realizar un análisis de costo/eficiencia para elegir el voltaje operativo más adecuado. Más aún sería mejor reunir pequeños grupos de paneles y de ser posible hacer el voltaje de operación más alto que 12 ó 24 V.

***Ejercicio 3.6:***
Los sistemas FV pequeños operan a 12 V. ¿Por qué los sistemas medianos y grandes trabajan a 24 V?

***Ejercicio 3.7:***
¿Qué tipo de cables usaría para los siguientes sistemas:

1. 50 Watt, 12 Voltios
2. 10,000 Watt, 220 Voltios
3. 2,000 Watt, 12 Voltios

### 3.4.3 Adaptadores, convertidores

Los adaptadores pueden utilizarse para graduar el voltaje de un sistema solar. Por ejemplo cuando la salida es 24 V y la aplicación de 12 V ó 6 V, el voltaje debe disminuir. Esto puede hacerse con un adaptador cualquiera que se fabrican y venden en cantidad y son muy comunes. Usualmente sólo los contactos y enchufes deben ajustarse. ¡Tenga cuidado de que el adaptador sea lo suficientemente grande para la aplicación!

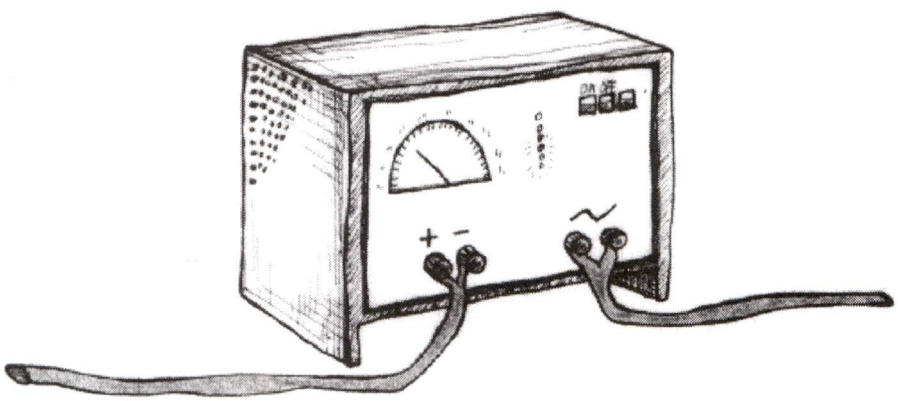
Los adaptadores puede hacerlos usted mismo. La eficiencia de los adaptadores sencillos no es muy alta por lo que, en lo posible, debería evitarse su uso.

Un conversar es un aparato que también puede graduar el voltaje. Es un diseño un poco más complicado y no está siempre disponible en todos los lugares. La eficiencia es mucho más alta que la de un adaptador.

### 3.4.4 Inversor

En muchos casos el cliente desea usar aplicaciones convencionales, generadas por sistemas fotovoltaicos. Aunque ésta no es siempre la mejor opción desde el punto de vista de la eficiencia energética, implica que la salida de un sistema fotovoltaico sea cambiada de bajo voltaje CC a 220 ó 110 V CA, 50 ó 60 Hz.

**Figura 3.6:** ***Inversor de voltaje***




Un inversor puede parecer una solución fácil para convertir toda la salida del sistema solar a una potencia CA estándar pero tiene varias desventajas. La primera es que aumenta el costo y complejidad de sistema. Para muchas aplicaciones no es necesario en lo absoluto utilizar un inversor. Por ejemplo para el alumbrado es mejor invertir en luces de bajo voltaje de eficiencia en lugar de invertir en un inversor. ¡Más aún, en algunas aplicaciones, por ejemplo para radios, la primera cosa que se hace con la potencia que ingresa es convertirla en bajo voltaje CC!

Un inversor también consume energía y por tanto disminuye la eficiencia general del sistema. La ventaja del inversor es que el voltaje de operación es mucho más alto y por tanto puede evitarse el uso de cables gruesos, especialmente cuando deben usarse cables largos podría ser económicamente viable utilizar un inversor.

***Ejercicio 3.8:***
Examine el esquema de distribución de un sistema fotovoltaico y explique los flujos de energía en el sistema.

***Ejercicio 3.9:***
Observe el diagrama de una unidad de control y determine su funcionamiento (vea la figura 3.4).

***Ejercicio 3.10:***
¿Por qué se recomienda el uso de artefactos que operan con corriente continua de bajo voltaje, en lugar de aquellos que lo hacen con corriente alterna y que requieren de un inversor de voltaje?

## 3.5 Acumuladores (baterías)

### 3.5.1 Introducción

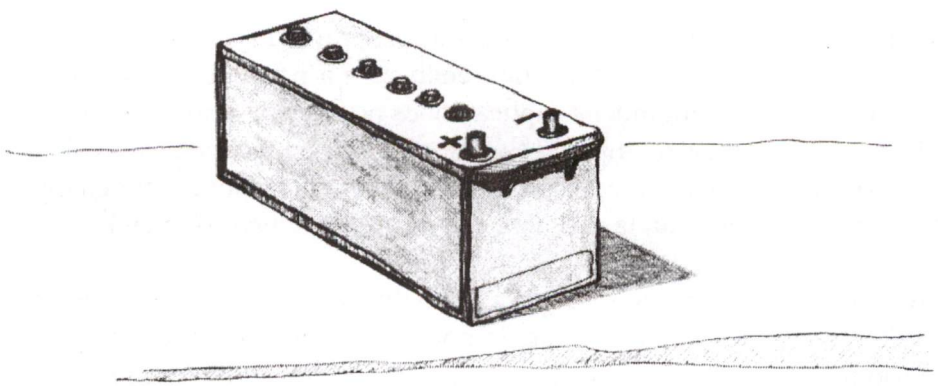
Los acumuladores son parte esencial de las instalaciones FV y deben dimensionarse, instalarse y mantenerse adecuadamente si se desea que la instalación funcione de forma óptima.

Un acumulador se distingue de una simple pila eléctrica en que éste es susceptible de ser recargado muchas veces. En el estado actual de desarrollo de la técnica de los acumuladores eléctricos estos resultan aún demasiado voluminosos, pesados, y más pesados, y más caros de lo que sería deseable, teniendo en cuenta la limitada cantidad de energía eléctrica que pueden acumular, es decir, el trabajo útil que se puede obtener.

Los acumuladores, al igual que las pilas, son sistemas electroquímicos que se basan en reacciones químicas reversibles que ocurren en su interior y en las que entran en juego electrones procedentes de los átomos que interaccionan.

Dos electrodos inmersos en una disolución electrolítica (electrolito + agua) y compuestos por sustancias conductoras adquieren, como resultado de las mencionadas reacciones, un potencial diferente, es decir, se establece entre ellos una diferencia de potencial capaz de generar una corriente eléctrica que puede fluir a través de un circuito externo que una ambos electrodos.

**Figura 3.7:** ***Batería***



### 3.5.2 Capacidad estimada de almacenamiento

Se denomina *capacidad* a la cantidad de energía que una batería puede almacenar. Por ejemplo, un tanque de agua con una capacidad de 8,000 litros puede almacenar como máximo 8,000 litros. Del mismo modo, una batería sólo puede almacenar una cantidad fija de energía eléctrica que por lo general figura en la parte exterior de la batería.

La capacidad de una batería se mide en amperios horas (Ah). Esto indica la cantidad de energía que puede generar una batería antes de descargarse completamente (observe que la unidad amperios horas no es realmente una medida de energía; para convertir amperios horas a energía en watts–hora, multiplíquelos por el voltaje de la batería). Teóricamente, una batería de 100 Ah deberá generar una corriente de 2 A para 50 horas (es decir, 2 amperios por 50 horas es igual a 100 amperio–horas). Sin embargo, la capacidad de almacenamiento estimada es un parámetro general, y no una medida exacta, del tamaño de la batería; ya que la capacidad cambia según la antigüedad y estado de la batería, así como según la velocidad a la que se sustrae la potencia. Si la corriente se extrae rápidamente de la batería, su capacidad se reduce.

### 3.5.3 Carga, descarga y estado de carga

La *corriente de carga* es la corriente eléctrica de la que está provista una batería, y que está almacenada en ella. Así como toma más o menos tiempo llenar un tanque de agua, dependiendo de la velocidad con que ingrese el agua; el tiempo requerido para cargar completamente una batería depende de la magnitud de la corriente con la cual se carga. Las baterías se cargan utilizando módulos solares, energía de la red conectada a un cargador de batería, diesel, petróleo o un motor de auto conectado a un alternador del tamaño adecuado o a un generador.

Se puede determinar aproximadamente la cantidad de energía recibida por una batería (Q, en amperios horas), multiplicando la corriente de carga (I, amperios) por el tiempo de carga (T, en horas):

*Q (cantidad de carga en amp–horas) = I (corriente de carga en amperios) x T (tiempo en horas)*

Si se multiplica esta fórmula (Q) por el voltaje de batería, se obtendrá la cantidad de energía suministrada a la batería, expresada en Wh.

No se debe cargar baterías a una corriente mayor de un décimo de su capacidad estimada. Por lo tanto, una batería de 70 Ah no deberá ser cargada a una corriente de más de 7 amperios.

*Descarga* es el estado de la batería cuando su energía está usada por una carga (por ejemplo, luces, radio, televisión, o bombas de agua). La corriente de descarga representa la velocidad a la que se sustrae corriente de la batería. Si desea, puede calcular la cantidad de energía extraída de una batería durante un periodo de tiempo (como en el caso del cargado de energía), multiplicando la corriente de descarga por el tiempo de uso de la carga. Por ejemplo, una lámpara que consume 1.2 A utiliza, para cuatro horas, 4.8 A–hora de energía de una batería (1.2 A × 4 h = 4.8 Ah).

El estado de carga representa la cantidad de energía restante en la batería. Éste indica si una batería está completamente cargada, cargada a medias o completamente descargada. En el caso de una batería de plomo–ácido, es posible medir su estado de carga utilizando un higrómetro o un voltímetro (ver ejercicios en la parte del módulo dedicada a los ejercicios prácticos).

***Ejercicio 3.11:***
¿Por qué se produce una baja en el nivel de electrolito de las baterías selladas y qué líquido se emplea para llenarlas nuevamente?

### 3.5.4 Ciclo, Ciclo de vida y Profundidad de descarga

En un sistema solar de iluminación eléctrica, una batería se carga diariamente mediante un módulo de celda solar y luego, se descarga debido al uso durante la noche y la madrugada. Un periodo de carga junto con su correspondiente periodo de descarga conforman lo que llamamos un *ciclo*. Por ejemplo, en un ciclo, una batería de 100 Ah podría cargarse hasta un 95% de su capacidad durante el día, y luego descargarse a un 75% de su estado de carga durante la noche, debido al uso de las luces y de la televisión.

El *ciclo de vida* de una batería es el número estimado de ciclos de duración de una batería. La mayoría de baterías tienen un ciclo de vida de varios miles de ciclos; las baterías de níquel–cadmio tienen un ciclo de vida más largo que el de las baterías de plomo–ácido. El *ciclo de vida promedio* de una batería (el cual debe ser especificado por el fabricante o el distribuidor) es el número estimado de ciclos de duración de una batería antes de que su capacidad disminuya a un 80% de su capacidad original estimada. El ciclo de vida real se acorta debido a descargas profundas, alta temperatura, falta de mantenimiento, y demasiadas descargas a alta velocidad. Esto es típico durante largos periodos nublados, o cuando la carga es mucho mayor que la entrada de sol.

### 3.5.5 Autodescarga

Si permanecen constantemente descargadas, las baterías perderán su carga lentamente mediante un proceso llamado *autodescarga*. La autodescarga es el resultado de una reacción química ocurrida dentro de las celdas de la batería. El porcentaje de descarga de una batería depende de la temperatura del ambiente y del tipo de batería (es decir, aquellas baterías con gran acumulación de ácido en la superficie tienden a tener un porcentaje de autodescarga más alto). El clima cálido aumenta el porcentaje de autodescarga. Por lo general, las baterías nuevas no se descargan más de un 5% al mes. Sin embargo, en climas cálidos, las baterías de plomo-ácido usadas pueden perder hasta un 40% de su capacidad al mes, si no se les carga regularmente. Por lo tanto, para evitar altos porcentajes de descarga, Ud. deberá:

- guardar la batería en una caja de madera, o en una bandeja no metálica
- mantenga limpia la parte superior de la batería
- mantenga los terminales limpios y engrasados

### 3.5.6 Tipos de baterías

Existen varios tipos de acumuladores, pudiéndose establecer diversas clasificaciones de acuerdo a su morfología y a su construcción interna, o a razón del uso a que van destinados. De esta manera se habla frecuentemente de acumuladores estacionarios, de tracción o de otros tipos específicos.

Los dos tipos de baterías más comunes en el actual mercado mundial son las baterías de plomo–ácido y baterías de níquel–cadmio. En Perú, las más comercializadas son las baterías de plomo–ácido. Ambos tipos de baterías contienen diferentes electrodos y diferentes soluciones de electrolito.

***Tipos de baterías de plomo–ácido:***

*Baterías para autos*
Las baterías para autos son de plomo–ácido de descarga ligera, utilizadas mayormente para poner en marcha los motores de autos. Su porcentaje de autodescarga es bajo (1-4% al mes cuando son nuevas), con un ciclo de vida largo, compuesto de ciclos cortos. No son la mejor opción para almacenar energía destinada a generar electricidad FV. Sin embargo, muchos hogares peruanos las usan para encender radios, televisores y luces, puesto que se fabrican localmente, son baratas y están al alcance de todos.

*Baterías de plomo antimonio (Motriz)*
Las baterías de plomo antimonio son de ciclo profundo, originalmente diseñadas para poner en marcha vehículos eléctricos. Añadir antimonio al electrodo permite a la batería resistir ciclos profundos de entre 50%-80% de descarga. Sin embargo, sus porcentajes de autodescarga son más altos, por lo requieren adiciones más frecuentes de agua destilada.

*Baterías Selladas (Gel)*
Las baterías selladas cuentan con un electrolito no líquido, que termina con los problemas de pérdida de agua a través de gasificación. Las baterías son selladas en la fábrica, por lo que no gotean ni derraman líquido, y a su vez, son de fácil transporte y requieren menor mantenimiento. Además, soportan ciclos profundos y tienen larga vida. Sin embargo, su rendimiento es muy deficiente a altas temperaturas, por lo que no deben ser utilizadas en lugares calientes. Este tipo de baterías es uno de los más caros.

*Baterías solares*
Las baterías solares han sido especialmente diseñadas para usos eléctricos solares, con el fin de superar los problemas del uso de baterías convencionales. Entre sus características podemos mencionar:
- un buen ciclo de vida, es decir, entre 1,000 y 2,000 ciclos (entre 3 y 6 años), en caso de que las baterías no pasen por ciclos profundos muy a menudo;
- un porcentaje de autodescarga bajo, entre 2% y 4% al mes;
- un gran depósito de electrolito para evitar daños por causa de exceso de gasificación, y para disminuir la necesidad de agregar agua ionizada;

mucho mayor tolerancia a los ciclos profundos que las baterías para autos. Sometida a una descarga diaria de 40%, la batería solar durará mucho tiempo. Incluso, una descarga diaria del 10% le otorga un periodo más largo de vida.

**Medidas de seguridad para el uso y mantenimiento de baterías**

Las baterías contienen ácido sulfúrico. Asimismo, generan mezclas explosivas de gases de hidrógeno y oxígeno en cada celda. Un cortocircuito en los terminales de la batería puede generar corrientes muy altas. Para estar en capacidad de manipular baterías con un riesgo mínimo, deberán tomarse algunas medidas de seguridad muy simples.

**No deje que objetos de metal conecten ambos terminales, positivo y negativo, de la batería.**

*Hacer cortocircuito en los terminales de la batería provocará chispas. Si el cortocircuito dura cierto tiempo, tanto el cableado como la batería se calentarán considerablemente. Esto puede producir fuego, o puede hacer que la batería explote.*

**Sea muy cuidadoso al echar agua a una batería**

*Las baterías contienen ácido. Si este ácido cae en los ojos, puede ser muy peligroso. Esto se evita utilizando lentes de protección. En caso de que caiga ácido en los ojos, manténgalos abiertos y enjuáguelos inmediatamente con mucha agua. Luego, consulte a un médico.*

*El ácido también es dañino para la piel y la ropa. En caso de que caiga ácido en la piel o la ropa, enjuáguese inmediatamente con mucha agua. Finalmente, lávese siempre las manos después de haber manipulado una batería.*

**Sea cuidadoso al cargar una batería**

*Al cargar una batería, coloque sus manos debajo de ella para evitar que se resbale o se caiga. Una caída puede provocar daño en los electrodos y ocasionar cortocircuitos internos. Esto puede provocar que la batería explote. Al cargar una batería, levántela firmemente.*

**No haga chispas cerca de una batería**

*Las baterías producen una mezcla de gases de oxígeno e hidrógeno que explota cuando se enciende. Evite hacer chispas y no fume o haga soldaduras cerca de una batería*

**Riesgos para el medio ambiente**
Las baterías usadas, al igual que las lámparas fluorescentes, constituyen un riesgo para el medio ambiente. Sea cuidadoso al desecharlas; no las coloque junto con la basura normal. Por lo general, pueden ser devueltas al fabricante o distribuidor para ser recicladas.

***Ejercicio 3.12:***
¿Qué tipo de batería usaría en una instalación donde ésta será sometida a ciclos profundos frecuentes y donde estará vacía por largos periodos?

***Ejercicio 3.13:***
¿Por qué resulta imposible hablar en términos generales del tiempo de vida de una batería?

***Ejercicio 3.14:***
¿La autodescarga de una batería aumenta o disminuye a lo largo del verano?

## 3.6 Estructuras de soporte

Como los paneles solares deben mirar al sol sin interferencia de obstáculos en los alrededores, los paneles generalmente están colocados en una posición alta, sobre un techo o un poste.

Cuando los paneles se colocan sobre un techo hay varias soluciones. En primer lugar el panel puede ser montado sobre una estructura inclinada ya existente, si la orientación de la caída del techo es cercana a la óptima. El techo debe ser lo suficientemente fuerte para soportar el peso extra de los paneles, o más importante, el peso extra del viento. Las penetraciones para cables deben ser impermeables.

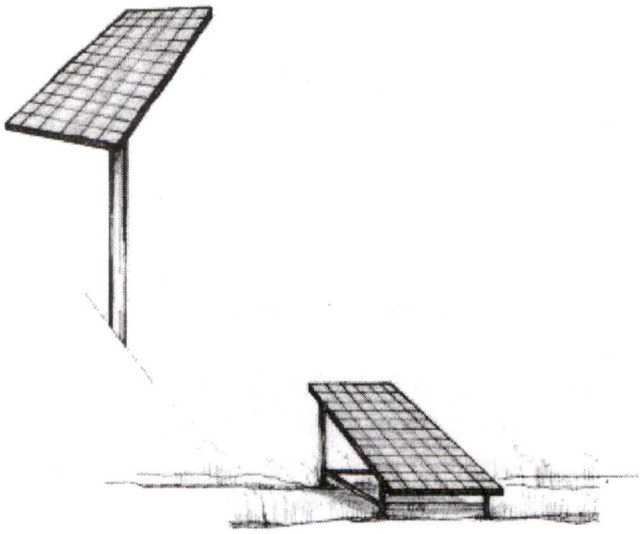
En segundo lugar existe la posibilidad de integrar paneles al techo. Esto significa que los paneles actuarán como parte del tejado y que los materiales del techo como las tejas se ahorran. Los paneles ya son bastante fuertes y a prueba de agua, entonces para qué desperdiciar materiales de construcción. Otra ventaja es que la carga del viento se disminuye cuando los paneles están colocados en el techo más que sobre el techo.

En tercer lugar, los paneles puede colocarse en un techo plano sobre un marco que lo soporte. El marco está hecho de metal y fijado al techo (con pernos grandes) o se hacen lo suficientemente pesados utilizando concreto. La ventaja es que se puede escoger cualquier dirección e inclinación pero, claro, el marco aumenta los costos del sistema. Estos marcos también se utilizan en instalaciones en áreas planas sobre el piso.

Si no hay un techo adecuado disponible, será necesario elevar el panel a cierto nivel a fin de evitar las sombras; pudiéndose hacer con postes. Esto sólo se logra con paneles pequeños utilizando construcciones parecidas a la de los postes de alumbrado público. También se utilizan los postes para evitar daños potenciales en los paneles causados, por ejemplo, por ganado o niños que juegan en los alrededores.

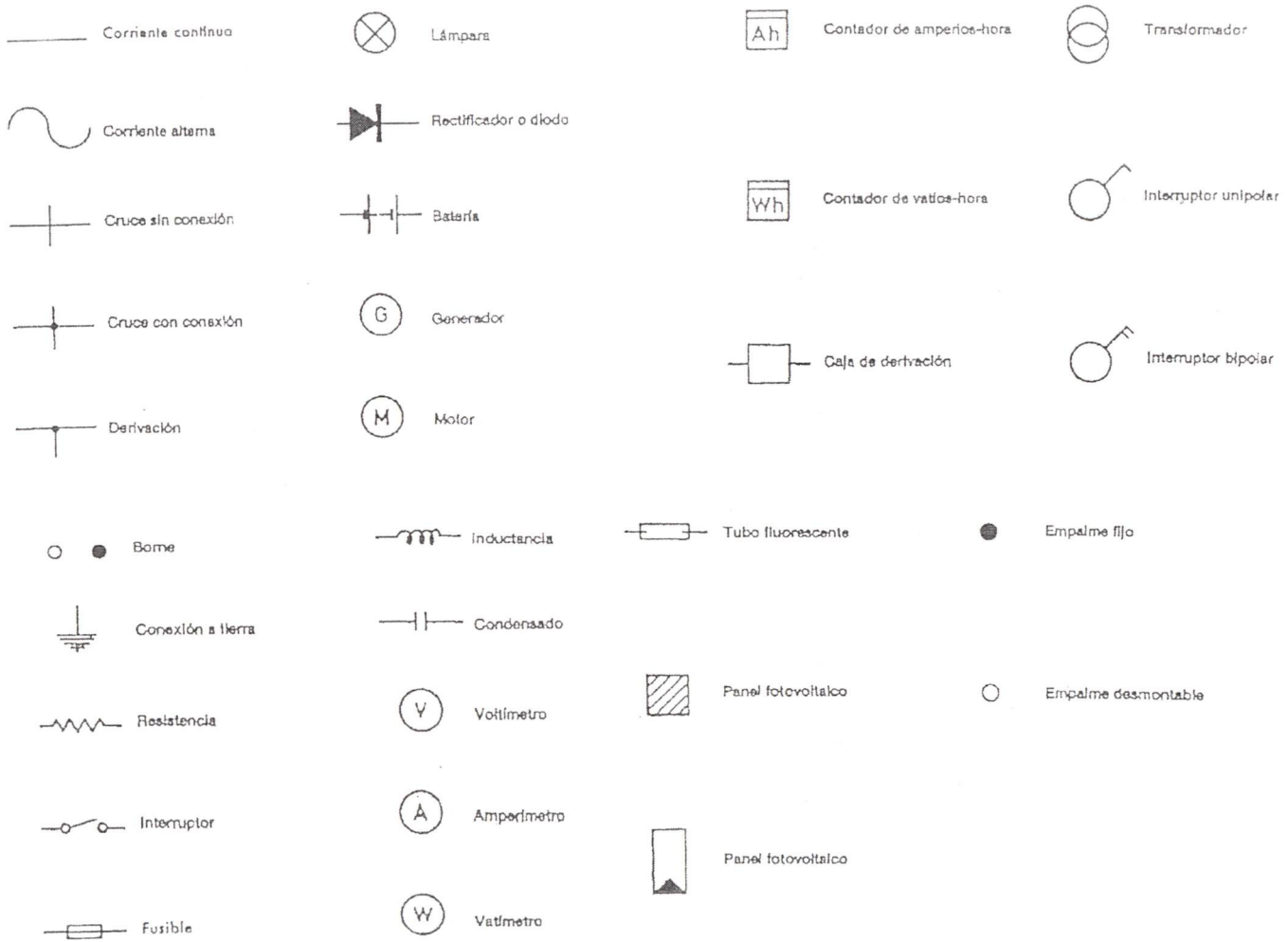
Los módulos fotovoltaicos sobre marcos o postes pueden equiparse con mecanismos de tracción que ajustan los paneles de tal manera que estén siempre mirando al sol. Estos sistemas son muy costosos y complicados, generando numerosos desperfectos, y por lo tanto no se utilizan comúnmente. Para sistemas más grandes podría ser atractivo utilizar los mecanismos de tracción, pero para sistemas pequeños las inversiones no pueden justificarse por un mayor rendimiento.
Bajo todas circunstancias los paneles deben colocarse de tal manera que estén a la mano para realizar trabajos de limpieza y mantenimiento.

**Figura 3.8:** ***Ejemplos de soportes***



***Ejercicio 3.15:***
¿Cuántas estructuras de soportes distintas se describen en esta sección?
Ilustre las diferentes estructuras de soporte antes descritas.

## 3.7 Simbología utilizada con más frecuencia en instalaciones fotovoltaicas (Figura 3.9)

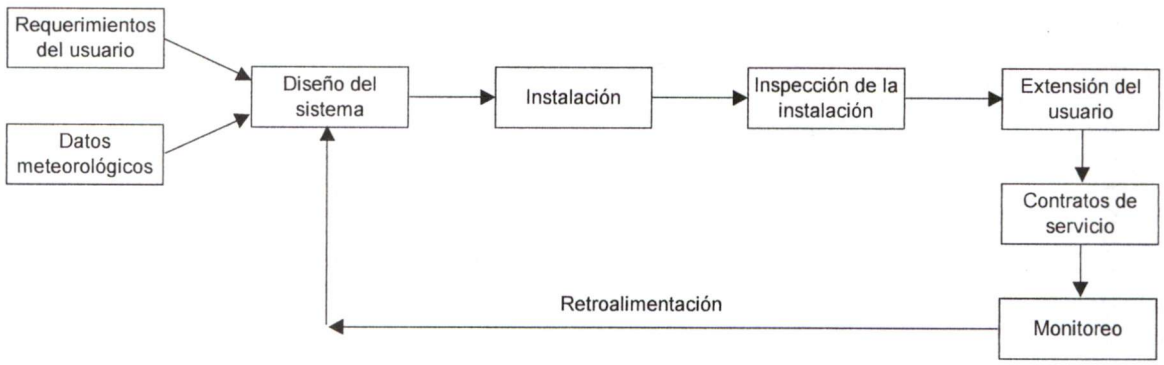


# 4. DISEÑO DEL SISTEMA E INSTALACIÓN

## 4.1 Vínculo entre el producto y el usuario

El capítulo anterior básicamente trataba con el producto, con el sistema fotovoltaico en sí. En los módulos de mercadeo y desarrollo del mercado, se explicó que realmente el cliente es el factor más importante, no el producto. En este capítulo veremos los vínculos entre el producto y el usuario. En el mercadeo, satisfacer al cliente es crucial. ¿Cómo puede utilizarse el producto, diseñarse, alternarse y ofrecerse de manera que satisfaga mejor las necesidades del cliente?

Es útil darle una mirada al ciclo del producto dentro del sistema de energías renovables. Básicamente todo producto realiza este ciclo.




***El ciclo de ventas de un equipo de energía renovable***

Los requerimientos del usuario son el punto de partida de todo ciclo. En el caso de le energía renovable esto no es diferente. Junto con las condiciones climáticas, que ya han sido discutidas con detenimiento en la sección de recursos de energía solar, un sistema puede diseñarse exactamente para satisfacer las necesidades del cliente a los más bajos costos. Además de las necesidades técnicas para diseñar un sistema fotovoltaico de acuerdo a los requerimientos del cliente, es también una muy buena herramienta de promoción. El usuario se siente atendido con especial interés y que siente que se está tomando mucho empeño en diseñar el mejor producto para él.

Después que el sistema se ha diseñado y se ha determinado su tamaño, el usuario sólo debe ser instruido en cómo funciona y mantiene su sistema. Para ello debe dársele un entrenamiento rápido pero sencillo y completo junto con un manual, con texto y diagramas fáciles de comprender.

El usuario es quien paga por un sistema fotovoltaico y lo maneja; por ende, influirá en el alto o bajo rendimiento del mismo. Del mismo modo en que un buen conductor maneja con cuidado y da mantenimiento a su auto, con el fin de extender su tiempo de uso, el usuario de un sistema fotovoltaico debe cuidarlo y mantenerlo.

Aún allí, la venta no ha terminado. Si se requiere debe elaborarse un contrato de servicios que deben firmar ambas partes. Dicho contrato determina qué servicios pueden esperarse del proveedor y bajo qué condiciones. Aún cuando no haya dinero de por medio en el contrato es aconsejable establecer claramente cuáles son las responsabilidades del usuario y las del fabricante o instalador.

No, aún hay una actividad importante que los buenos empresarios deben tener en mente: monitoreo y retroalimentación del cliente. Para mantener a un cliente satisfecho es importante darle atención continua. Para mejorar el producto es beneficioso estar informado acerca de las experiencias prácticas de los usuarios. Es muy importante que ambas partes se mantengan en contacto, aún cuando el cliente está satisfecho y esté utilizando el producto sin mayores dificultades.

***Ejercicio 4.1:***
Compare este ciclo de venta con la venta de un producto más convencional; un televisor, por ejemplo. ¿Siguen el mismo proceso?

## 4.2 Diseño del sistema, requerimientos del usuario

Al diseñar un sistema debe determinarse, en primer lugar, cuáles son los requerimientos del usuario. En este manual explicaremos cómo hacerlo y cómo reducir al máximo el uso final.

Cuanto usted diseña un sistema, las necesidades de su cliente son el punto de partida. Deberá hacerlo de tal manera que satisfaga tales requerimientos. Algunos de los aspectos más importantes que deberá considerar son:

- Informar al cliente potencial acerca de las ventajas y limitaciones de los sistemas fotovoltaicos, con el fin de evitar malentendidos y desacuerdos.
- Establecer una buena relación con el cliente. Conocer sus necesidades y deseos.
- Explicar al cliente las tareas realizadas durante el proceso de instalación y el servicio técnico o de reparación. Un usuario capacitado es de gran ayuda para mantener el sistema en buenas condiciones.

***Ejercicio 4.2:***
La salida diaria promedio de un sistema FV instalado en el Perú está calculada en 130 Wh diarios a 12V. ¿Cuántos de estos paneles deberá adquirir un cliente cuyo requerimiento diario de energía es de 900 Wh, para un sistema que trabaja a 12 V? Se usará una batería de plomo-ácido con una eficiencia de carga de 80%.

### 4.2.1 Consumo de energía de los artefactos eléctricos

Un sistema fotovoltaico puede abastecer a cualquier artefacto eléctrico. Vea la tabla 4.1 para conocer el consumo promedio de energía que registran los más utilizados.

**Tabla 4.1:** ***Requerimiento típico de potencia de algunos artefactos***

| ARTEFACTO | REQUERIMIENTO DE POTENCIA [W] |
|---|---|
| Tubo fluorescente e inversor | 8 – 40 |
| Foco de filamento | 8 – 40 |
| Tocacassette | 2 – 30 |
| Televisor pequeño B/N | 12 |
| Televisor pequeño a color | 50 |
| Computadora pequeña | 10 |
| Refrigerador | 100 – 400 |
| Horno microondas | 1,000 |
| Calentador eléctrico | 1,500 |
| Unidad de aire acondicionado | 1,500 |

La tabla presenta valores promedio. En lo posible, utilice los valores registrados en los mismos aparatos.

Es importante usar los artefactos de más alta eficiencia; la forma más económica de producir energía es ahorrándola. Por ejemplo, se debe usar tubos fluorescentes en vez de focos de filamento, pues producen más luz por la misma cantidad de energía. De preferencia, evite gastar energía en sistemas de calefacción o de aire acondicionado.

### 4.2.2 Patrón de consumo de energía, demanda promedio

El hallar el consumo de energía de un artefacto es sólo cuestión de multiplicar y sumar. Supongamos que una radio utiliza 10 W y permanece encendida por 5 horas, entonces su consumo de energía durante ese tiempo es 10 W por 5 horas = 50 Wh = 0.050 kWh. Vea la tabla 4.2 como ejemplo.

**Tabla 4.2:** ***Cálculo del consumo de energía diario***

| ARTEFACTO | POTENCIA [W] | TIEMPO [h/d] | ENERGÍA [Wh/d] |
|---|---|---|---|
| Lámpara de tubo para el comedor | 8 | 4 | 32 |
| Lámpara de tubo para la cocina | 8 | 2 | 16 |
| Foco para la lavandería | 10 | 1 | 10 |
| Foco para el dormitorio | 20 | 1 | 20 |
| Televisión a color | 50 | 4 | 200 |
| Tocacassette | 5 | 4 | 20 |
| Refrigerador | 100 | 12 | 1,200 |
| | | | 1,498 |

Un refrigerador consume 100 W. Sin embargo, no permanece encendido todo el tiempo gracias a que posee un termostato (interruptor de temperatura). Si la temperatura máxima permitida es de 4° C, el termostato pondrá al refrigerador en funcionamiento al alcanzar dicha temperatura y lo desconectará, por ejemplo, a 1° C, para evitar que permanezca encendido más de lo necesario. Una vez más, la temperatura se elevará poco a poco hasta alcanzar los 4° C, y así sucesivamente. Por lo tanto, se estima que un refrigerador permanece encendido sólo la mitad del tiempo.

En el ejemplo anterior, el requerimiento de energía es de 1,498 Wh por día = 1.5kWh. Esto equivale a una potencia de consumo promedio de (dividir entre 24 h):

$$P = \frac{1{,}498\ \text{Wh}}{24\ \text{h}} = 62\text{W} \qquad (4.1)$$

### 4.2.3 Observaciones

El calculo de la demanda promedio es algo necesario. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que cuando hay energía disponible, la demanda aumenta.

En el caso de los sistemas más grandes, es posible separar la demanda en "esencial" y "no esencial". Cuando las baterías están bajas, los artefactos "no esenciales" pueden ser desconectados automáticamente. Si examinamos con cuidado qué es lo "esencial", podremos reducir los costos de inversión.

Una pregunta importante sería: ¿Es necesario usar electricidad?. Por ejemplo, el uso de kerosene o gas licuado podría ser una alternativa.

***Ejercicio 4.3:***
Tome como ejemplo su propia casa, y calcule el consumo de energía total por día y por año. Compare esos cálculos con los recibos de luz. ¿Acertó en sus cálculos? Explique la diferencia. Si desea, puede hacer el mismo ejercicio para toda la escuela.

## 4.3 Diseño del sistema, aspectos financieros

Cuando se conocen los requerimientos del usuario y también el patrón en la demanda y el suministro de energía solar, se puede diseñar el tamaño mínimo del sistema.

Determinar el tamaño de un sistema es bastante sencillo y directo a pesar de que el diseño en detalle de un sistema fotovoltaico es complejo. Los métodos para determinar el tamaño son fáciles de usar pero tienen sus limitaciones. Debido a que se asumen la entrada y demanda de energía solar, el resultado de aplicar el método para determinar el tamaño puede no ser confiable en un 100%. La radiación solar varía de año en año y también el consumo de electricidad tiende a ser fluctuante. Por lo tanto, aún cuando se haya calculado cuidadosamente el tamaño del sistema, pueden surgir ciertas carencias de tiempo en tiempo.

La manera más simple de determinar el tamaño de un sistema fotovoltaico es una regla sencilla:

$$A_r = \frac{1{,}200 \times E_d}{I_d} \qquad (4.2)$$

Donde:

| | | |
|---|---|---|
| $A_r$ | Tamaño del panel [$W_p$] |
| $E_d$ | Demanda de electricidad [kWh/día] |
| $I_d$ | Radiación [kWh/m$^2$/día] |

El tamaño de un sistema fotovoltaico está dado por el Watt Pico ($W_p$). Esta es la salida máxima de un panel fotovoltaico bajo condiciones estándar que son: temperatura ambiente de 25 °C y 1,000 W/m$^2$ de radiación. Durante el medio día, en días despejados, se puede esperar una radiación de 1,000 W/m$^2$. Esto significa que un panel de 50 $W_p$ generará, durante las horas más soleadas del día, 50 W.

En promedio los paneles fotovoltaicos están en aproximadamente 100 $W_p$ por m$^2$. Eso significa que un panel solar de 100 $W_p$ convierte la radiación de 1,000 W en electricidad de 100 W. O, para decirlo de una manera diferente, los paneles solares tienen una eficiencia promedio del 10%.

En la fórmula anterior, el factor para calcular el tamaño del sistema no es 1,000 sino 1,200 porque la eficiencia del sistema es siempre un poco más baja que la eficiencia del panel (~85%). El tamaño de la batería de almacenamiento depende del número de días que deben pasarse sin brillo solar. Si el usuario desea tener luz ininterrumpida bajo cualquier circunstancia, la batería deberá ser bastante grande. En general un período **puente** de dos o tres días es el que se requiere. Esto significa que la batería debe tener (por lo menos) una capacidad de dos o tres veces el consumo diario de electricidad.

En el siguiente ejemplo se muestra cómo se puede realizar un estimado sencillo del tamaño y del precio.

**Ejemplo**

Para una casa pequeña con 3 focos de 10 W, que funcionan 4 horas al día, la demanda de electricidad será de 3 × 10 × 4 = 120 Wh/día = 0.12 kWh/día.
La radiación solar promedio se tocará en detalle en el siguiente capítulo pero por el momento supondremos, para el caso del Perú, una radiación promedio de 5.0 kWh/m$^2$.
Esto significa que para esta casa el tamaño de panel que se requiere es:

$$A_r = 1{,}200 \times 0.12 / 5 = 29\ W_p$$

Este es un panel pequeño de por ejemplo 30 × 100 cm que, incluyendo una pequeña batería, podría costar alrededor de 600 US$.

Este método supone una demanda de electricidad constante e radiación también constante. Por supuesto, que se comete un error de esta manera porque ni el consumo de electricidad ni la radiación son las mismas durante el año. Esto significa que es casi seguro que en varios días cada año habrá una escasez de potencia. La pregunta es si esto es un problema. Por ejemplo, si los sistemas se usan sólo para prender algunas luces puede ser posible apagar algunas de las luces cuando hay escasez.

La radiación dada en la fórmula es la radiación que cae sobre el panel. Como se discutiera anteriormente, esto no es lo mismo que la radiación total que cae sobre una superficie horizontal. El valor de la radiación horizontal debe corregirse con un factor de orientación e inclinación.

Si la radiación solar y la demanda de electricidad no varían mucho (en muchos de los casos) este método sencillo funciona bien. Si la radiación solar fluctúa fuertemente de estación en estación debe usarse un método diferente. La salida del sistema solar puede calcularse para cada mes en lugar de una vez. Si se hace esto, se puede tener una mejor aproximación de la demanda de electricidad. Por ejemplo en invierno hay probablemente más necesidad de usar energía para alumbrado pero menos para refrigeración.

Básicamente los cálculos quedan igual pero ahora sabemos en qué períodos será más difícil cubrir los requerimientos. Este mes es también conocido como el mes crítico; alta demanda y poco brillo solar. Depende de los requerimientos del usuario si es aceptable o no tener escasez de potencia en un mes crítico. En algunos casos sería muy costoso cubrir la demanda completa todo el tiempo, así que es usuario se acomoda a cierta escasez.

### 4.3.1 Costo del sistema

El precio de los paneles solares y los sistemas fotovoltaicos se expresa en dólares por Watt Pico (US$/$W_p$). Al negociar, asegúrese de saber acerca de qué está hablando: **"precio del panel"** o **"precio del sistema"**. Un sistema fotovoltaico completo encierra mucho más que un panel; pero el costo de ambos se expresa en $W_p$, por lo que resulta fácil confundirse. Asimismo, debe tener en cuenta que el precio para compradores individuales (precio minorista) es mucho más alto que el del mercado internacional (precio mayorista). La diferencia se atribuye a los arenceles de importación, impuestos locales y márgenes de ganancia de la compañía importadora. En este capítulo hablaremos del **precio para el cliente**.

Para sistemas pequeños completos, se considera un precio de 20 US$/$W_p$ como parámetro de referencia. Sin embargo, éste depende mucho del tipo y tamaño del sistema. La tabla a continuación presenta algunos ejemplos.

**Tabla 4.3:** ***Precios para sistemas fotovoltaicos completos***

| SISTEMA | POTENCIA [$W_p$] | PRECIO [US$] | PRECIO [US$/$W_p$] |
|---|---|---|---|
| Radio | 1 | 70 | 70 |
| Linterna portátil | 10 | 300 | 30 |
| Sistema doméstico de iluminación (1 módulo, 3 luces, batería, regulador, conectores) | 50 | 1,000 | 20 |
| Radiotransmisor | 30 | 1,000 | 33 |
| Cerco eléctrico | 200 | 5,000 | 25 |
| Refrigerador para vacunas | 80 | 2,000 | 25 |
| Bomba sumergible | 1,400 | 12,000 | 9 |

Fuente: Power Guide

Por supuesto, éstos son sólo ejemplos basados en experiencias alrededor del mundo. Los costos en el Perú varían mucho debido a que los aranceles de importación son altos, el costo del transporte es otro y el de mano de obra es más alto, en comparación con países como la India o Bolivia.

**Regla importante:**

Para calcular el costo **real** de un sistema fotovoltaico, consulte **siempre** con los distribuidores y asegúrese de obtener precios **reales**. Las cantidades registradas en este manual son sólo ejemplos y promedios.

### 4.3.2 Análisis del sistema de costos

El costo total de un sistema fotovoltaico está compuesto por el costo de sus componentes más el de instalación.

**Paneles:**

El precio de un panel solar monocristalino fluctúa entre US$ 6 y US$ 10 por $W_p$. Un precio promedio adecuado sería, por lo tanto, 8 US$/$W_p$. Si asumimos que un panel solar de 0.5 $m^2$ suministra 50 Wp (tamaño estándar de un panel), entonces el precio puede convertirse de 8US$/$W_p$ a US$ 800 por $m^2$.

**Batería:**

El costo de las baterías solares especiales, con un tiempo de vida de 3 a 5 años (le recomendamos no usar baterías para carro), es de aproximadamente US$ 100 por kWh, lo que equivale a:

- para baterías de 12 V: US$ 1.2 por Ah
- para baterías de 24 V: US$ 2.4 por Ah.

**Unidad de Control:**

El precio de la unidad de control está determinado, por supuesto, por su tamaño, calidad y número de funciones. En el caso de las unidades simples y más pequeñas (5 – 30 A), el precio es de US$5 – 15 US$/A, aproximadamente.

**Inversor:**

El costo de un inversor depende de la potencia; sin embargo, podemos dar un estimado: US$ 700 por kW.

**Costo de Instalación:**

Con frecuencia, equivale a un porcentaje del costo capital del sistema completo, un 10 – 20%, que incluye el gasto en materiales como cables, interruptores, conectores, etc..

Influye también del gasto de transporte; por lo que habrá diferencias entre una instalación en la selva y otra cerca de una gran ciudad.

**Costos de Mantenimiento y reemplazo:**

Se estima que el costo de mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos bordea el 1 – 2% del costo de inversión anual. El tiempo de vida de los paneles solares oscila entre 15 y 20 años o más.
El cambiar una batería resulta mucho más caro. Las baterías solares duran de 3 a 5 años aproximadamente; por ende, durante el tiempo de vida de un sistema fotovoltaico, éstas deberán ser reemplazadas varias veces.

**Ejemplo**

Un granjero Holandés está usando una bomba FV para agua de bebedero para su ganado. Durante el invierno (los meses de Diciembre – Febrero) su ganado no pasta fuera pero se queda en los establos. En los meses calurosos la demanda de agua es mayor y el granjero calcula los siguientes requerimientos:

Para bombear hasta 1,000 litros de agua de una cuneta no profunda (2 metros) con una eficiencia de bombeo del 50%, la siguiente cantidad de energía se necesita:

$E = MgH/e = (1{,}000 \times 9.81 \times 2)/0.50 = 40{,}000$ J/día = 11 Wh/día

Esto da los siguientes requerimientos por mes:

| Mes | Requerim. agua [lt/día] | Requerim. energ. [kWh/día] | Insolación a 30°Sur [kWh/m$^2$.d] | Tamaño del panel [Wp] |
|---|---|---|---|---|
| Enero | 0 | 0 | 0.72 | 0 |
| Febrero | 0 | 0 | 1.43 | 0 |
| Marzo | 10000 | 0.11 | 2.52 | 52 |
| Abril | 10000 | 0.11 | 3.97 | 33 |
| Mayo | 12500 | 0.14 | 5.22 | 32 |
| Junio | 12500 | 0.14 | 5.74 | 29 |
| Julio | 15000 | 0.17 | 5.08 | 40 |
| Agosto | 15000 | 0.17 | 4.49 | 45 |
| Setiembre | 12500 | 0.14 | 3.25 | 52 |
| Octubre | 12500 | 0.14 | 1.88 | 89 |
| Noviembre | 10000 | 0.11 | 0.86 | 153 |
| Diciembre | 0 | 0 | 0.56 | 0 |

Para cubrir la demanda completa en todos los meses se requiere un panel de 153 $W_p$ pero esto sería demasiado grande para todos los meses. De la tabla se puede ver que el panel de 52 $W_p$ sería suficiente para todos los meses, excepto para Octubre y Noviembre.

Incrementando el ángulo de inclinación el sistema puede optimizarse un poco porque hay aún sobre capacidad en el verano.

Si la demanda de electricidad es crucial este método para determinar el tamaño es siempre crudo. En algunos casos, por ejemplo alumbrado de emergencia o estación de comunicaciones, un suministro confiable de potencia, es absolutamente necesario. En esos casos, es necesario una determinación detallada del tamaño, y simulación del sistema completo, incluyendo el controlador, la batería y el uso final. Para dichos cálculos y simulaciones programas de computación se utilizan. Una desventaja es que estos programas requieren de datos meteorológicos detallados y confiables.

***Ejercicio 4.4:***

Determine cómo se obtuvo el factor 1,200 en la fórmula $A_r = 1{,}200 \times E_d/I_d$. ¿Esta fórmula es aplicable a todo tipo de paneles, con eficiencias diferentes?

***Ejercicio 4.5:***

El Sr. Tafur desearía usar energía solar fotovoltaica en su hogar, en la villa San Carlos. En San Carlos la radiación global media es:

| | |
|---|---|
| Enero | 24 MJ/m$^2$.día |
| Abril | 20 MJ/m$^2$.día |
| Julio | 18 MJ/m$^2$.día |
| Octubre | 24 MJ/m$^2$.día |

La demanda de electricidad de la casa es la siguiente:

- 3 luces de 13 W; 4 horas al día
- un televisor, 40 W; 4 horas al día
- una radio de 10 W; 3 horas al día

Aconseje al Sr. Tafur acerca de la compra de un sistema fotovoltaico.

***Ejercicio 4.6:***

Un hospital pequeño en las montañas de Irian Jaya recibió una donación de US$ 10,000 de una fundación Americana para comprar e instalar un sistema fotovoltaico. Quieren usar el sistema para alumbrar el hospital y refrigerar medicinas y vacunas. En total necesitan una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 50 litros y quieren usar un refrigerador energéticamente eficiente y bien aislado que consume solo 1,000 Wh/día. Para alumbrar el hospital actualmente se usa unos 10 focos de luz de 60 W para los corredores y salas durante la tarde (en promedio desde las 18:00 hasta las 22:00 horas) y 5 luces de emergencia (20 W) que están encendidas toda la noche. Aún más, ellos desean usar un sistema de aire acondicionado (500 W por 4 horas al día) en la sala de operaciones y desean instalar una bomba FV para sustituir la actual bomba manual (capacidad de 10,000 litros al día desde una profundidad de 25 m).

Diseñe un sistema fotovoltaico que pueda cubrir todos los deseos del hospital. Diseñe la batería de almacenamiento, de manera que puedan abastecerse 5 días sin sol sin estropear las medicinas. ¿Es la donación suficiente? Aconseje al hospital cómo ahorrar energía y cómo minimizar costos.

## 4.4 Dimensiones de la batería de almacenamiento

El tamaño de la batería de almacenamiento también depende de la importancia de la fiabilidad del suministro de potencia. En el ejemplo anterior no se requería de almacenamiento alguno porque la cuneta de agua actuaba como almacén. En muchos de los casos es suficiente un almacenamiento en baterías de 2 ó 3 días. Esto significa que la capacidad de la batería debería ser de por lo menos 2 ó 3 veces el consumo de energía diario para poder suplir durante 2 ó 3 días sin brillo solar.

Pero esto es sólo suficiente cuando las baterías funcionan a un 100% de eficiencia y cuando las baterías pueden descargarse al 100%. Ambos no son los casos. Por ejemplo para una batería común de plomo–ácido la eficiencia puede ser algo de 80% pero depende mucho del uso de la batería. Cuando se carga y se usa constantemente, la eficiencia será alta. Cuando la batería sea poco utilizada la autodescarga provocará una baja eficiencia. Las baterías no pueden ser descargadas en más del 50% de lo contrario su tiempo de vida disminuirá demasiado (vea también la sección sobre baterías). Por lo tanto el tamaño de la batería de almacenamiento aumenta considerablemente.

**Ejemplo**

Para cubrir un período de tres días sin sol se requiere una batería de la siguiente capacidad:

Suponemos que:

Eficiencia de batería = 80%

Descarga de batería =50%

Consumo eléctrico = 5kWh/día

Tamaño de la batería: 3 × 5 kWh / 0.8 /0.5/= 37.5 kWh

Que equivale a 31 baterías de 12 V con una capacidad de 100 Ah cada una.

***Ejercicio 4.7:***

Una batería tiene una capacidad nominal de 90 Ah y un ciclo de vida de 1,200 ciclos, para una profundidad de descarga del 60%. Calcule lo siguiente:

- La capacidad útil durante un ciclo
- La capacidad útil total durante el ciclo de vida

## 4.5 Dimensiones de la unidad de control

El tamaño de la unidad de control está determinada por la máxima corriente que puede esperarse del sistema fotovoltaico. Esta puede ser tanto la corriente de los paneles a la batería y/o uso final,

o la corriente de la batería hasta el uso final. Ambas corrientes máximas deben calcularse para determinar la capacidad de la unidad de control.

La corriente más alta determina la capacidad. Por ejemplo un panel de 12 V y 50 $W_p$ suministra una corriente máxima de 4.2 A, mientras que 4 luces de 11 W y una radio de 15 W, alumbrando y funcionando simultáneamente, extraen más o menos 5 A. No se espera que la corriente máxima en el sistema exceda estos 5 A entonces la unidad de control y fusibles deben dimensionarse a este valor.

## 4.6 Selección del lugar de ubicación, requerimientos

A pesar de que los sistemas fotovoltaicos no son muy exigentes hay algunos requerimientos para determinar un lugar de ubicación adecuado para el sistema. También deben tomarse en consideración todos los lugares para todos los componentes del sistema porque algunos deben estar fuera (del panel) mientras que otros componentes deberían estar de preferencia dentro (baterías y unidad de control).

i. Ubicación de los paneles: debe haber suficiente espacio sobre el techo o poste para colocar el panel. Debe evitarse las sombras, ver método en la sección de recursos solares para determinar la sombra de obstáculos alrededor.
ii. Optimice el ángulo de inclinación y orientación de los paneles; mirando al sol y en una caída igual a la de la latitud (mínimo 15°) ó 15° más del nivel de fluctuaciones por estación.
iii. La estructura del techo o marco de soporte deben ser lo suficientemente fuertes para soportar la carga extra del viento (especialmente en áreas donde se dan tormentas esto es un requerimiento importante).
iv. Los paneles deberían ser montados de tal manera que estén al alcance para los servicios de limpieza y mantenimiento. Esto también se aplica a la batería y al controlador.
v. La ubicación de los paneles debe estar cerca de los lugares donde se ubican la unidad de control, la batería y el uso final para evitar cables largos que son costosos y originan pérdidas. Mantenga los cables que van desde la unidad de control a los puntos finales de uso lo más cortos posibles.
vi. Los paneles deberán ser protegidos contra robos o cualquier posible fuente de daño (vandalismo, niños que juegan, cocos que caen de árboles, etc.).
vii. Los paneles no deben colocarse cerca de fuentes contaminantes como chimeneas industriales de combustión, carreteras polvorientas, etc.
viii. La unidad de control y batería de almacenamiento deben instalarse dentro o en una caja que pueda soportar todas las inclemencias del clima (piense en suficiente ventilación para enfriar los componentes electrónicos y para ventilación de las baterías ventiladas);
ix. Mantenga la batería a temperatura moderada (10-35°C) para aumentar el comportamiento y tiempo de vida de la batería. Evite los lugares expuestos directamente a la luz del sol.

## 4.7 Mantenimiento y extensión al usuario

Es bien sabido que el mantenimiento (preventivo) evita fallas o averías y, por tanto, aumenta la disponibilidad técnica de un instrumento. Por ejemplo, es mejor limpiar y aceitar una máquina

antes de que se trabe; los costos del cambio de aceite y limpieza son, por lo general, mucho menores a los de la reparación de una máquina atorada (costo de mantenimiento correctivo).

Por supuesto, el mantenimiento preventivo tiene un costo. Toma tiempo y algo de dinero realizar actividades de mantenimiento (limpieza, cambio de aceite, reparaciones menores, etc.). Por lo general, hay una medida óptima de mantenimiento. Los costos de mantenimiento preventivo aumentan en proporción al grado de mantenimiento que se lleve a cabo. Cuando ha habido poco o ningún mantenimiento, los costos por reparaciones, son altos; cuando el mantenimiento aumenta, los costos por reparaciones disminuyen drásticamente. ¡Por lo tanto, las primeras actividades de mantenimiento son las más baratas!

Por ejemplo:

> No se acostumbra limpiar el vidrio de un sistema solar diariamente, pero limpiarlo una vez cada dos años no es suficiente. Lo óptimo sería limpiar el panel solar con una frecuencia de varias veces al año a una vez al mes, dependiendo de las condiciones locales (polvo, lluvia, etc.). Por lo tanto, el fabricante deberá establecer qué tipo de mantenimiento se requiere, cómo debe llevarse a cabo, y con qué frecuencia.

Para el caso de los sistemas solares FV domiciliarios, prácticamente todas las actividades de mantenimiento serán realizadas por los usuarios. Por lo tanto, es muy importante instruir a los usuarios cuidadosamente. Para ello, es esencial contar con un manual del usuario o un manual de mantenimiento, con el fin de enseñar a los usuarios acerca de cómo operar y dar mantenimiento a sus sistemas. En el caso de sistemas más complicados (alumbrado público, sistemas fotovoltaicos más grandes, instalaciones de bombeo FV), el usuario no podrá realizar todas las actividades de mantenimiento por sí mismo. En esos casos, se necesitará la ayuda de un técnico experimentado.

Existen dos tipos de manuales: un manual de mantenimiento para sistemas fotovoltaicos y un manual para alumbrado público. El primero es bastante simple y contienen un gran número de ilustraciones; el segundo es un poco más complicado, pero también explica cómo opera el sistema e incluye una guía bastante detallada de resolución de problemas.

***Ejercicio 4.8:***

Una tarea importante de los técnicos es explicar al usuario de un sistema fotovoltaico cómo debe operarlo y darle mantenimiento. Practique esta tarea. Divida la clase en grupos de 4 personas. En cada grupo deberá contar con 2 "usuarios" y 2 "técnicos". Los usuarios desconocen el tema y no saben nada acerca de asuntos técnicos. Los técnicos deberán explicarles cómo opera el sistema y qué es lo que tienen que hacer. Para este ejercicio se puede hacer uso del primer manual de mantenimiento. Practique este ejercicio de 10 a 15 minutos.

## 4.8 Contratos de servicio

Además de los procedimientos simples de mantenimiento que pueden ser llevados a cabo por los usuarios, las compañías pueden ofrecer un servicio para realizar las tareas más difíciles, bajo forma de garantía. Los fabricantes acuerdan reparar cualquier falla del sistema, durante un

periodo de garantía establecido, sin cargo adicional. Pasado este periodo de garantía, el mantenimiento y servicio puede concretarse mediante contratos de servicio prolongados.

Existen muchas razones para ofrecer contratos de servicio a los clientes. En primer lugar, los clientes apreciarán la asesoría y el servicio, el cual significará que no tendrán que hacerlo ellos mismos. En segundo lugar, garantiza que el sistema funcionará adecuadamente durante el periodo del contrato. Finalmente, el riesgo de que el sistema sufra una avería se reparte entre un gran número de personas. Cada usuario paga una pequeña suma de dinero, pero nadie pagará por la reparación de un sistema completo.

Por lo general, un aparato o sistema (o partes del sistema) nuevo está cubierto por un periodo de garantía de varios años. Pasado este periodo, o en el caso de las partes del sistema que no estén cubiertas por la garantía, se puede constituir un contrato de servicio prolongado. Los contratos de servicio pueden ser constituidos bajo una gran variedad de modalidades:

(1) Un pago fijo anual (prima) por un extenso periodo (10 – 20 años), durante el cual estarán cubiertas todas las visitas del fabricante para reparar el sistema averiado, así como los costos adicionales, en caso de que el reclamo sea justificado. En todos los casos, el cliente paga una pequeña suma pero se eliminan los riesgos, ya que la garantía cubre cualquier problema de funcionamiento. El fabricante toma el riesgo pero, a su vez, este riesgo se reparte entre un gran número de clientes.

(2) Una suma fija (pequeña) por visita que el fabricante haga al cliente, pero el cambio de las partes y la mano de obra son servicios gratuitos. Este contrato es más barato para el cliente, sin embargo implica un pequeño riesgo. El fabricante también corre cierto riesgo, ya que, aunque se recibe cierta suma por concepto de la visita, el servicio de repuestos y mano de obra se brinda en forma gratuita.

Los siguientes puntos son relevantes al momento de constituir un contrato prolongado:

- Describa muy claramente cuáles son los puntos cubiertos por la garantía y cuáles quedan exentos de ella;
- Describa en detalle las condiciones del contrato, de preferencia con la ayuda de un abogado;
- Verifique todos los aspectos legales del contrato, de preferencia con la ayuda de un abogado.

***Ejercicio 4.9:***

Una vez más, divida la clase en grupos de 4 personas. En esta oportunidad, dos de ellos serán "vendedores" de una compañía de sistemas fotovoltaicos y los otros dos son "compradores" potenciales y muy difíciles. Dé inicio a las negociaciones para la compra de un sistema de FV y, especialmente, discuta acerca de qué garantías o contratos de servicio puede ofrecer la compañía de sistemas fotovoltaicos. Como es de suponerse, los clientes desean un máximo servicio y garantías, de preferencia sin costo alguno, y la compañía de sistemas fotovoltaicos no desea correr grandes riegos. El tiempo establecido para este ejercicio es de 10 minutos.

# 5 LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA A ESCALA NACIONAL

## 5.1 Introducción

Los datos de recurso solar son escasos en todo el territorio, lo cual merecería mayor atención por parte de los organismos responsables. De otro lado, la aceptación social de la tecnología sólo puede lograrse cuando se ha demostrado su capacidad de atender con eficiencia y continuidad las expectativas de sus usuarios. En consecuencia, se consideran prioritarias para la diseminación de esta tecnología, las zonas detalladas a continuación.

**Tabla 5.1:** ***Zonas aptas para aplicar la energía solar fotovoltaica***

| | LUGARES DE APLICACIÓN | USOS |
|---|---|---|
| Sistemas fotovoltaicos | Toda la región andina, desde 500 msnm en el lado occidental de la cordillera, hasta 1,000 msnm en el lado oriental.<br>Toda la costa, exceptuando la zona nubosa de Lima.<br>En la selva, con preferencia en telecomunicaciones y en lugares muy aislados.<br>Debería trabajarse con mayor intensidad en Puno y Arequipa, en una primera etapa amplia de diseminación | Iluminación<br>Bombeo de agua<br>TV y radio<br>Telecomunicaciones<br>Refrigeración<br>Cercos eléctricos<br>Electrodomésticos<br>Motor chico |

Fuente: Universidad Nacional de Ingeniería (Centro de Energías Renovables)

## 5.2 Capacidad de potencia fotovoltaica instalada en el país

El presente cuadro resume la potencia instalada en energía solar fotovoltaica hasta en año 1996, tomado como referencia.

**Tabla 5.2:** ***Potencia instalada estimada al año 1996***

| LUGAR | N° INSTALACIONES DOMICILIARIAS O COMUNALES |
|---|---|
| Puno | 500 |
| Arequipa | 500 < N < 1,500 |
| Selva (Bagua, Parinacochas, etc.) | 350 |
| Otros lugares | 150 |
| **TOTAL** | **1,500 < N < 2,500** |
| **POTENCIA** | **75kW < P < 125 kW** |

Fuente: Universidad Nacional de Ingeniería (Centro de Energías Renovables)

Otros usuarios de estos sistemas son:

- Telefónica del Perú 1,000 kW
- Fuerzas Armadas y Policía Nacional 300 kW

**Potencia total instalada promedio:** 1,500 kW

## 5.3 Referencias de proyectos nacionales

### 5.3.1 Convenio GTZ – CORPUNO: Electrificación fotovoltaica en Puno (1986-1988)

En marzo de 1986 la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) promovió este proyecto, como parte integrante del proyecto "Aprovechamiento del Potencial Eólico en el Altiplano de Puno", con la finalidad de conocer las condiciones técnicas requeridas y las condiciones socioeconómicas locales para usar esta tecnología.

Con el apoyo económico del Gobierno, se adquirieron 200 sistemas fotovoltaicos y se elaboró un estudio. Este proyecto se dividió en dos fases: en la primera (marzo – septiembre 1986) se compraron 50 sistemas y se distribuyeron a familias seleccionadas según criterios de distribución geográfica y de actividad económica. Estos costaron US$ 300 y debían ser cancelados en tres años. En la segunda fase (octubre 1986 – abril 1987) se instalaron 191 a un costo de US$ 600 por sistema.

En esta segunda fase se creó un fondo rotatorio, con la condición de un pago inicial de 20% y la devolución a plazos del 80% restante en un periodo de cinco años, con un interés anual de 17%.

**Tabla 5.3:** ***Información sinóptica sobre las comunidades seleccionadas***

| COMUNIDAD | ZONA ECOLÓGICA | ACTIVIDAD PRINCIPAL | ALTURA (m.s.n.m.) | DISTANCIA A PUNO (km) |
|---|---|---|---|---|
| Jorata | Intermedia | Agricultura | 3850 | 120 |
| Carhualla | Intermedia | Agricultura | 3830 | 40 |
| Huayrapata | Montañosa | Ganadería | 4200 | 184 |
| Coachico | Montañosa | Piscicultura | 4800 | 110 |
| Putina | Ceja selva | Cultivo café | 1500 | 380 |
| Anapia | Lacustre | Pesquería | 3830 | 175 |
| Chinchera | Lacustre | Artesanía | 3830 | 19 |
| Millojachi | Lacustre | Trab. asalariado | 3830 | 7 |

Fuente: Programa Especial de Energía CONCYTEC-CORPUNO-GTZ

### 5.3.2 Segundo Convenio GTZ – Región Mariátegui: 1991 – 1995

El proyecto se denomina "Programa de Promoción de la tecnología solar con fines sociales" y se propuso fomentar una estructura comercial para la difusión de sistemas fotovoltaicos en la Región Mariátegui.

Se compraron 250 sistemas como base para implantar un modelo comercial de fondo rotatorio. Hasta el año 1996 se vendieron 63 sistemas a un costo de US$ 1,200. Debido a la situación de extrema violencia, la GTZ decidió retirar en 1991 a sus expertos y entregó 100 sistemas adicionales. De los 350 sistemas, 147 fueron instalados en locales comunales y domicilios rurales, habiendo quedado 203 en stock al terminar el proyecto. En total, el proyecto ha instalado cerca de 500 sistemas en la Región Mariátegui.

Posterior a la conclusión del proyecto, se han instalado cinco bombas fotovoltaicas de agua; una de ellas está en el Centro Experimental ILLPA de la Universidad Nacional del Altiplano en Puno. En telecomunicaciones, se han vendido diez paneles para Telefónica del Perú, ubicados en las comunidades de Moho (Huancané), isla Anapia (Yunguyo) y en la ciudad de Puno. Un comunero de Huancané ha adquirido un cargador de baterías para prestar servicio. Un tercer programa experimental fue el de refrigeración solar; se colocaron cinco refrigeradores solares en centros médicos comunales de la Región Mariátegui: uno en Putina (Sandia), uno en Quiaca (Sandia) y tres en Moquegua, aunque su costo era muy alto (US$ 5,000 c/u).

### 5.3.3 Dirección Ejecutiva de Proyectos (DEP-MEM): Proyecto Piloto San Francisco

El proyecto abarca el área de la localidad de San Francisco, en la provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali, Región Ucayali. La comunidad nativa de San Francisco de Asís cuenta con 134 usuarios potenciales, considerando cinco locales públicos.

En este proyecto se utilizaron los siguientes sistemas:

- Un panel fotovoltaico de 53 Watts
- Una batería sellada de 100 Ah
- Un controlador de carga
- Tres lámparas de 9 Watts de alta eficiencia
- Caja de conexiones
- Interruptores, conductores y otros.

El componente de inversión por cada módulo adquirido por la DEP se desagrega de la siguiente manera[2]:

| | | |
|---|---|---|
| • Inspección preliminar y estudio | US$ 24.22 | 1.2 % |
| • Suministro de los equipos | US$ 484.35 | 84.7 % |
| • Transporte | US$ 29.06 | 1.1 % |
| • Montaje | US$ 33.90 | 5.9 % |
| **TOTAL** | **US$ 571.53** | **100.0 %** |

En este caso, la DEP financió en forma de subsidio 114 módulos y la empresa local formada, 20 módulos a precios de mercado (US$ 840.00), lo que significó el 15% de los módulos y el 20% de la inversión total. Es bueno recalcar que la empresa local asume los costos de operación, mantenimiento y reposición de baterías del 100% de los módulos. Los costos de operación y

[2] La adquisición se realizó con exoneración tributaria, hecho que se podría repetir de instalarse módulos masivamente.

mantenimiento anuales se estimaron en 2% del costo de los equipos y los costos de comercialización en 1%. Esto significa mínimo dos revisiones técnicas al año.

El compromiso de inversión se ejecutó en un 30% al contado, mediante la adquisición de 6 módulos y el otro 70% mediante un préstamo otorgado por una entidad financiera con un plazo de pago de tres años y medio, con un periodo de gracia de seis meses. Los fondos requeridos para el pago al contado fueron obtenidos a través de cuotas iniciales aportadas por los usuarios de NS/ 125 c/u.

El monto del crédito fue de US$ 12,000 y ha sido otorgado con fondos del Programa de Energías Renovables – PROER[3], administrado por COFIDE. Los ingresos del proyecto se formaron de la cobranza de las tarifas que cubre la operación y mantenimiento del servicio eléctrico y la reposición de las baterías. Se asumió por incobrable el 10% del monto facturado. El costo de reposición de la batería fue de US$ 1.67 mensual o US$ 20 anual. Se planteó una tarifa total mínima de US$ 4.50 o su equivalente en Nuevos Soles al cambio.

### 5.3.4 Proyecto para Ahorro de Energía (PAE-MEM)[4]: Electrificación fotovoltaica insular

El proyecto abarcó las islas Taquile, Soto y Uros del Lago Titicaca en Puno. Fue ejecutado entre enero de 1996 y mayo de 1997 y se han instalado 147 sistemas. Se asumió que, para satisfacer las necesidades básicas de iluminación, esparcimiento e información de una familia, su requerimiento energético era de 180 Wh/día.

Los sistemas presentan las siguientes características técnicas:

| SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 50 $W_p$ | SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 35 $W_p$ |
|---|---|
| Un módulo fotovoltaico de 50 $W_p$ | Un módulo fotovoltaico de 35 $W_p$ |
| Una batería de 100 Ah | Una batería de 60 Ah |
| Un controlado de carga 8 x 10 A | Un controlado de carga 5 x 6 A |
| Tres fluorescentes compactos de 11 W | Dos fluorescentes compactos de 11 W |
| Tablero de conexión | Tablero de conexión |
| Cables de conexión | Cables de conexión |
| Accesorios | Accesorios |
| Instrucción | Instrucción |
| Servicio post venta | Servicio post venta |

La propuesta económica tuvo las siguientes alternativas de pago expresadas en US$:

[3] El PROER está orientado a impulsar el uso de las energías renovables, otorgando créditos a las instituciones financieras de primer piso a una tasa igual al TIPMEX, para su respectiva canalización a los clientes finales que vienen a ser las pequeñas empresas. La tasa al cliente resulta de la tasa cobrada por COFIDE al intermediario financiero (TIPMEX) más la tasa de comisión que cobra dicho intermediario.

[4] El PAE-MEM tiene también estaciones piloto demostrativas de energía solar en las siguientes comunidades: Locuto (Piura), Espital (Amazonas), Chetilla (Cajamarca), Chungui y Tambocucho (Ayacucho) y Huaytiri (Tacna)

| CUOTA | Primera | Segunda | Tercera | Cuarta | Quinta | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Pago a:** | la venta | 05 meses | 12 meses | 24 meses | 36 meses | – |
| Modo A | 675.00 | — | – | – | – | 675.00 |
| Modo B | 500.00 | 200.00 | – | – | – | 700.00 |
| Modo C | 249.00 | 167.00 | 167.00 | 167.00 | – | 750.00 |
| Modo D | 150.00 | 150.00 | 150.00 | 150.00 | 150.00 | 750.00 |

El programa correspondiente a los primeros 150 sistemas duró 40 meses y en los 15 primeros se amortizó el 65% de su costo total. En cuanto al costo de la energía por habitante, se ha llegado a la conclusión de que antes se gastaba 263.5 ¢ US$ para satisfacer sus necesidades energéticas, hoy lo consiguen con 84 ¢ US$. El ahorro por cada kWh es igual a 179.5 ¢ US$.

### 5.3.5 Conclusiones

Como un resumen de las experiencias expuestas, se puede afirmar que esta tecnología tiene sus ventajas comparativas como opción de electrificación rural. Sin embargo, existen aún obstáculos para su difusión a escala larga; le corresponde al gobierno, a través de sus organismos de gestión y promoción, fortalecer la capacidad económica y financiera de los pobladores rurales, o sea, del consumidor final.

Debe cerrarse o achicarse la brecha entre el costo de un sistema y la capacidad de pago del cliente, con mecanismos apropiados que no distorsionen el mercado de libre competencia, el cual garantiza la calidad tecnológica.

Tampoco debe olvidarse el refuerzo de las instituciones involucradas en este campo, como las financieras, las educativas y las promotoras y gestoras.

## 5.4 Directorio de empresas e instituciones

**Proveedores de equipos de energía solar fotovoltaica**

**SISTELEC CONTROL S.A.**
Calle Redón 382 - Lima 41
Tel: 435-7437, 437-7407

**FERREYROS S.A.**
Av. Industrial 675
Tel: 336-7070

**3HC S. A.**
Av. Bolivia 780 - Of. 202 - Lima 5
Tel: 424-0875

**SERVICIOS ENERGÉTICOS Y CONSULTORÍA S. R. L.**
Jr. Loreto 246 - Of. 205 - Pueblo Libre
Tel: 463-6941

**CORTED Ingenieros S.R.L.**
Av. Guzmán Blanco 240 - Of. 1002 A - Lima 1
Tel: 433-3245

**SERVICIOS TECNOLÓGICOS DE INGENIERÍA (S. T. I.)**
Av. Manco Kapac 1020 - A Wanchac - Cusco
Tel: 084-240 251

**KUTI S.A.**
Parque Industrial G-1 - Cusco
Tel: 084-239 610

**ENERGÍA SOLAR S.R.L. - ENERSOL**
Los Arrayanes 110 - Sachaca - Arequipa
Tel: 054-258 990, 213 991

**CIME COMERCIAL S. A.**
Av. Libertadores 757 – San Isidro
Tel: 222-6083

**Instituciones en el campo de la energía solar**

**CENTRO DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA Y DEL AMBIENTE (CENERGIA) – Asociación civil**
Calle Deraín 198 – San Borja - Lima 41
Tel: 475-9671, 476-1527

**PROYECTO DE AHORRO DE ENERGÍA (PAE-MEM) - Proyecto**
Justo Vigil 456 – Magdalena
Tel: 460-4040, 460-4060

**CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES (CER-UNI) - Institución Académica**
Av. Túpac Amaru s/n - Rímac
Tel: 481-8395, 481-1070

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ - Institución Académica**
Av. Universitaria Cdra. 18 - San Miguel
Tel: 460-2870, Anexo 285

**UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO (G. E. S.)**
**Institución Académica**
Av. de la Cultura s/n - Cusco
Tel: 084-271 160

**CASA CUSCO - ONG Nacional**
Mesón de la Estrella 156 - Cusco
Tel: 084-226 951

**CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES DE TACNA (CERT) - Institución Académica**
Universidad Nacional Jorge Basadre G. de Tacna
Tel: 054-712 865

**ENERGÍA, DESARROLLO Y VIDA – EDEVI**
José María Plaza 364 – Lima 11
Tel: 423-6500

**FONDO DE PROMOCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES (PROER) – Institución crediticia**
COFIDE – HOLANDA
Augusto Tamayo 160 – San Isidro
Tel: 442-2550

# ANEXO A

## ASPECTOS FINANCIEROS Y ECONÓMICOS

# A. ASPECTOS FINANCIEROS Y ECONÓMICOS

## A.1 Introducción

Es importante hacer un buen cálculo del capital y gastos de operación de los sistemas de energías renovables antes de comprarlos e instalarlos. En particular, el precio de la electricidad generada con diferentes sistemas (eólicos, solares, diesel, extensiones de la red) debe predecirse. Para hacer esto se necesitan ciertos conocimientos de métodos económicos.

Sin embargo, la economía no lo es todo. En primer lugar, otros factores además de los económicos son importantes, como la fiabilidad del sistema, experiencias previas con energías renovables, con equipos diesel o sólo la posibilidad de poder contar con electricidad.

En segundo lugar, la información de entrada (input data) para el análisis económico, como las tasas de interés e inflación, y muy importante el tiempo de vida de los sistemas, nunca se conoce con precisión, ni siquiera en economías muy estables. Y si la economía está plagada de índices de inflación muy altos, uno podría preguntarse si el análisis tiene valor alguno. Los análisis económicos muy detallados no son útiles si no se ofrece mayor información que la que los simples y robustos métodos ofrecen.

En este módulo algunos indicadores de precios son dados para los sistemas solares y diesel, y se discutirán algunos conceptos básicos del análisis económico. Luego se hará un cálculo del precio de la electricidad con las diferentes opciones.

## A.2 Cálculo del costo de inversión

En este capítulo se darán cifras promedio que podrán usarse para calcular los costos de un sistema en el análisis económico. Estas cifras sólo darán un indicador. Al comprar un sistema el costo exacto deberá ser siempre evaluado solicitando a varios proveedores una opinión. Los precios que se detallan aquí son para 1995. Los precios se han obtenido de publicaciones y ha sido verificada con información proveniente de los fabricantes.

### A.2.1 Paneles solares

Los precios para los paneles solares es de US$ 6 – 10 por $W_p$ [3], pero los precios pueden bajar hasta US$ 3 por $W_p$. Algunas revisiones indican que el precio de US$ 8 parece ser un buen promedio.

Si asumimos que 1 $m^2$ de panel solar tiene 55 $W_p$, entonces el precio se convierte de US$ 8 por $W_p$ a US$ 440 por metro cuadrado. A este precio se le debe adicionar el precio de la estructura de soporte, que es de US$ 1 – 2 por $W_p$ (US$ 55 – 110 por $m^2$).

Una cifra de US$ 2,700 por $m^2$ es usada generalmente como punto de referencia para instalaciones completas. Véase la tabla siguiente para algunos ejemplos.

**Tabla A.1:** ***Costos de algunos artefactos eléctricos***

| SISTEMA | POTENCIA [$W_p$] | PRECIO [US$] |
|---|---|---|
| Radio | 1 | 70 |
| Linterna portátil | 10 | 200 |
| Sistema de alumbrado doméstico (1 módulo, 2 luces, regulador, conectores) | 40 | 500 |
| Radiotransmisor | 20 | 3,000 |
| Activador de cerco eléctrico | 30 | 1,000 |
| Refrigerador de vacunas | 200 | 5,000 |
| Bomba de pozo profundo | 80 | 2,000 |

Los costos de instalación del sistema solar son tomados casi siempre como un porcentaje del costo de capital: 10 – 20 %. Naturalmente estos costos también dependen del transporte.

El costo de mantenimiento de un sistema solar está calculado en 1 – 2 % del costo de inversión por año. El tiempo de vida de los paneles solares puede ser de 15 a 20 años o más.

### A.2.2 Baterías

Gipe [1] da la cifra de US$ 1 por Ah lo que es igual a US$ 83 por kWh (para baterías de 12V). Esto parece ser demasiado optimista ya que la información de los proveedores indica un precio de 100 – 110 por kWh. US$ 100 por kWh es probablemente un buen promedio, lo que significa un precio de:

- US$ 1.2 por Ah, para baterías de 12V
- US$ 2.4 por Ah, para baterías de 24V

### A.2.3 Componentes electrónicos

**Controlador de carga:**
Existen controladores de diferentes capacidades de amperaje, desde 4 hasta 24 A. Los precios fluctúan entre los 40 hasta los 120 US$.

**Inversor:**
El precio de un inversor depende de su potencia. Puede calcularse en US$ 700 por kW. Los precios para los dispositivos varían mucho y deberían obtenerse de los proveedores.

### A.2.4 Sistema

Si uno desea hacer una evaluación global de los diferentes sistemas es conveniente tener algunos cálculos de los costos de instalación, además de los paneles solares y las baterías.

Un cálculo de estos costos puede obtenerse como sigue:

- Los paneles cuestan alrededor de US$10 por $W_p$ (incluyendo la estructura de apoyo)
- Con 5.5 kWh/$m^2$ de radiación diaria el rendimiento es aproximadamente de 0.5 kWh por $m^2$. Asuma que cuatro días de almacenamiento son necesarios para hallar 2 kWh por 1 $m^2$ de panel solar.
- Las baterías cuestan US$ 100 por kWh, por lo tanto se necesitan US$ 200 para gastar en 2 kWh.
- Estos 2 kWh provienen de 1 $m^2$ de panel solar, lo que representa 100 $W_p$. Por tanto la batería cuesta US$ 200/100 = US$ 2/ $W_p$.
- Finalmente el resto del sistema cuesta (25 – 10 – 2)= US$ 13/ $W_p$.

Resumiendo:

- Paneles + estructura de apoyo: US$ 10 por $W_p$
- Baterías: US$ 2 por $W_p$
- El resto (cables, controladores, dispositivos) US$ 13 por $W_p$.

### A.3 Generadores Diesel

Algunos costos de equipos diesel se detallan más adelante. De la tabla es claro que los costos pueden variar mucho y que uno debería siempre conseguir los precios exactos del proveedor.

Note que los tiempos de vida especificados son bastante altos. Note también que en ausencia de buen mantenimiento éstos pueden ser tan bajos como 2 años (si el diesel está operando 1/3 del tiempo, entonces la vida es solo de 5,800 horas).

**Tabla A.2:** ***Costos de los equipos para generadores diesel***

| POTENCIA (salida) | COSTO DE CAPITAL [US$/kW] | TIEMPO DE FUNCIONAM. [hrs op.] | CONSUMO DE COMB. [l/kWh] | COSTOS UNIDAD [US$/kWh] |
|---|---|---|---|---|
| 10 kW | 700 | 7,000 | 0.53 (n=0.18) | 0.41 |
| 20 kW | 500 | 10,000 | 0.42 (n=0.23) | 0.28 |
| 30 kW | 400 | 12,000 | 0.35 (n=0.27) | 0.19 |
| 100 kW | 250 | 25,000 | 0.29 (n=0.33) | 0.12 |
| 40–200kW | 500–800 | | | |
| 0.5–5<br>20–200<br>>1,000 | 2,000<br>1,000–1,500<br>750–1,000 | | | |

La instalación puede costar alrededor del 10% del costo de capital.

El mantenimiento: US$ 200 por año.
Operación: US$ 1 por día–hombre
Uso de Combustible: 0.2–0.4 litros/kWh de salida (litro/h por kW)
Costos de combustible: US$ 0.50–2.00 por litro.

## A.4 Conexión a la red

Algunos de los datos para la conexión a la red son los siguientes:

**Tabla A.3:** ***Algunas cifras para conexiones a la red***

| RUBRO | COSTO | OBSERVACIONES |
|---|---|---|
| (Líneas)<br>230 Kv<br>115, 138 kV<br>13.2, 34 kV<br>120, 220 V | (US$/km)<br>30,000<br>20,000<br>8,000–14,000<br>5,000–8,000 | Ejemplos de<br>América Latina |
| (Sub estaciones)<br>120/20 kV<br>70/20 kV<br>transformadores<br>interruptores | (US$/unidad)<br>2'000,000<br>866,000<br>15,000 | Ejemplos de<br>Indonesia |
| Distribución<br>Conexión | (US$/unidad)<br>200–3650 | Dependiendo de la densidad<br>del consumidor. |

Los costos de una conexión a la red son algo que debe revisarse con la utilidad. Dependerá de las circunstancias qué tan caro resulte la red adicional (terreno) y cuántas subestaciones se requieran.

Por ejemplo en Holanda (densamente poblada) el costo de una conexión a la red (para un usuario) es de aproximadamente US$ 7,600 (calculado para 20 años).

## A.5 Cifras económicas

Por simplicidad todos los métodos económicos en esta sección asumen qué el capital está disponible y que no debe prestarse de otro lado. Podría decirse que este es el punto de vista de una persona adinerada que cuenta con fondos para algún proyecto en energías renovables. Por tanto el costo para la adquisición de dinero (que depende de las condiciones del préstamo) no se ha tomado en cuenta en los cálculos.

### A.5.1 Tiempo de recuperación de la inversión

La cifra económica más sencilla es la del tiempo de recuperación de la inversión. Es el costo de inversión dividido por la ventaja anual ganada de la inversión. ¿Después de cuántos años recuperaré mi dinero?

***Ejemplo***
En Holanda se ha comprado un sistema solar de US$ 8,000 (aprox. 10 $m^2$ o 100 $W_p$). ¿Cuántos años tomará en recuperar el dinero?

En Holanda la radiación solar es en promedio de 110 $W/m^2$, asumiendo 10% de eficiencia, resulta 11 W de electricidad por $m^2$ de 110 W del sistema completo de $10m^2$. Esto nos da una cantidad de energía igual a $365 \times 24 \times 110 = 964$kWh/año. Como el precio de la electricidad solar en Holanda es de US$ 0.16 por kWh el ahorro anual es de $964 \times 0.16 =$ US$ 154. Por lo tanto el tiempo de recuperación de la inversión es de 8,000/154 = 52 años.

Si la vida de los paneles es de 20 años, entonces el precio de 1 kWh de electricidad es de $8,000/(20 \times 964)$ que es igual a US$ 0.41. Esto muestra que en Europa Occidental, o al menos en Holanda, los sistemas solares están lejos de ser económicos cuando hay una red (al menos sin subsidios estatales), especialmente cuando se sabe que el tiempo de vida de un panel solar es sólo de 20 años.

Para hacer el ejemplo un poco más razonable, asuma que existe una instalación solar de baja calidad en el mercado que sólo cuesta US$ 5,000 y que tiene un tiempo de vida de 10 años, y que se paga de utilidad US$ 1 por kWh. Entonces el tiempo de recuperación de la inversión se convierte en 5,000/964 = 5.2 años.

Esto también puede verse en una tabla (cuando los beneficios acumulados se vuelven cero se alcanza el tiempo de recuperación de la inversión).

**Tabla A.4:** ***Tiempo de recuperación de la inversión***

| AÑO | COSTO | BENEFICIO | BENEFICIO ACUMULADO |
|---|---|---|---|
| 0 | - 5000 | 0 | - 5000 |
| 1 | 0 | 964 | -4036 |
| 2 | 0 | 964 | -3072 |
| 3 | 0 | 964 | -2108 |
| 4 | 0 | 964 | -1144 |
| 5 | 0 | 964 | -180 |
| 6 | 0 | 964 | 784 |
| 7 | 0 | 964 | 1748 |
| 8 | 0 | 964 | 2712 |
| 9 | 0 | 964 | 3676 |
| 10 | 0 | 964 | 4640 |

### A.5.2 Método del descuento

**Descuento o Interés**

El descuento se basa en la observación de que cien dólares ahora valen más que cien dólares de aquí a un año.

Esto es así porque a las personas les gusta más tener US$ 100 ahora que de aquí a 12 meses, pero el concepto puede volverse objetivo según el siguiente razonamiento: si tenemos US$ 100 ahora, podemos ponerlos en el banco y ganar intereses; si el interés es de 10% anual, tendremos US$ 110 de aquí a un año. Si obtenemos los US$ 100 de aquí a un año, no tendremos la oportunidad de ponerlos en el banco hoy.

Con un 10% de descuento US$ 100 de aquí a un año valdrán US$ 100/1.1 = US$ 91 hoy (puesto que US$ 91 puestos en el banco hoy serían US$ 100 de aquí a un año).

El efecto del descuento está contrarrestado por la inflación. Suponga que la inflación es de 20%, entonces los US$ 125 que se tienen ahora habrían bajado a US$ 125/(1 + 0.20) = US$ 100 de aquí a un año.

Lo anteriormente expuesto puede resumirse como sigue. Los beneficios y costos en **n** años deben multiplicarse por un factor **D**, que resulta de:

$$D = ((1 + i)/(1 + d))^n \qquad (5.1)$$

Donde:

| | | |
|---|---|---|
| D | factor [–] |
| d | porcentaje de descuento (o interés) [–]<br>(si el porcentaje de descuento es de 11%, entonces d= 0.11) |
| i | Indice de inflación [–]<br>(si la inflación es de 25%, entonces i = 0.25) |

**Ejemplo**

El mismo ejemplo ha sido recalculado con descuento e inflación.

| | |
|---|---|
| Costo de inversión | 5,000 |
| Descuento | 0.2 |
| Inflación | 0.1 |

| | | | | Después del descuento | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Año | Costo | Bene-ficio | Benef. Acum. | D | Costo | Bene-ficio | Benef. Acum. |
| 0 | -5,000 | 0 | -5,000 | 1.00 | -5,000 | 0 | -5,000 |
| 1 | 0 | 964 | -4,036 | 0.92 | 0 | 884 | -4,116 |
| 2 | 0 | 964 | -3,072 | 0.84 | 0 | 810 | -3,306 |
| 3 | 0 | 964 | -2,108 | 0.77 | 0 | 743 | -2,564 |
| 4 | 0 | 964 | -1,144 | 0.71 | 0 | 681 | -1,883 |
| 5 | 0 | 964 | -180 | 0.65 | 0 | 624 | -1,259 |
| 6 | 0 | 964 | 784 | 0.59 | 0 | 572 | -687 |
| 7 | 0 | 964 | 1,748 | 0.54 | 0 | 524 | -163 |
| 8 | 0 | 964 | 2,712 | 0.50 | 0 | 481 | 318 |
| 9 | 0 | 964 | 3,676 | 0.46 | 0 | 441 | 758 |
| 10 | 0 | 964 | 4,640 | 0.42 | 0 | 404 | 1,162 |

Valor presente neto = 1,162

Tome nota que el tiempo de recuperación (donde los beneficios acumulados menos los costos resultan en cero) ha cambiado a 7 años, pues los beneficios en el futuro no cuentan mucho como beneficios hoy. Los costos de inversión no se afectan por el descuento, porque está en el año cero.

En realidad el descuento convencional siempre da resultados negativos en sistemas de energías renovables, porque las inversiones (en el año cero) cuentan mucho, mientras que los beneficios (a lo largo de algunos años en el futuro) no cuentan mucho. Hay un buen argumento en contra del uso del método del descuento: por ejemplo el petróleo ahorrado en el futuro es muy importante, porque hay un abastecimiento limitado de él. Una solución es utilizar altos índices de inflación (que tienen resultados positivos en los beneficios a futuro).

**Valor Presente Neto (VPN)**

El valor presente neto es el valor de la suma de todos los beneficios descontados y costos, es decir lo que la empresa en total vale en dólares hoy. En el ejemplo el VPN es de US$ 1,162.

**Factor acumulativo de descuento, método anual**

Si los beneficios y costos son los mismos cada año, el factor de acumulación de descuento se usará para hallar el VPN rápidamente:

$$D_{acum} = \frac{((1 + i)/(1 + d))^{n+1} - 1}{((1 + i)/(1 + d)) - 1} - 1 \qquad (5.2)$$

Entonces:

$$VPN = I - D_{acum} (B - C) \qquad (5.3)$$

Donde:

| | | |
|---|---|---|
| B | beneficio anual | [US$] |
| C | costo anual | [US$] |
| d | porcentaje de descuento | [–] |
| $D_{acum}$ | factor de descuento acumulado | |
| I | costos de inversión | [US$] |
| i | tasa de inflación | [–] |
| n | tiempo de vida | [años] |

**Ejemplo**

El factor de descuento acumulado en el ejemplo es (10 años):

$$D_{acum} = \frac{(1.1/1.2)^{11} - 1}{(1.1/1.2) - 1} - 1 = 6.39$$

Esto puede significar que los beneficios de 10 años, sólo cuentan para 6.39 años. Ahora utilice la fórmula (5.3) para determinar el VPN. Este es el valor en la tabla de la página anterior.

$$VPN = -5{,}000 + 6.39\ (964 - 0) = US\$\ 1{,}162$$

Este método sirve bien para los primeros cálculos. Aunque los costos y beneficios varíen a lo largo de los años, uno debería siempre remitirse a cálculos por medio de las tablas. Programas de hojas de cálculo son ideales para estas tareas.

**Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Si tenemos una gran cantidad de dinero disponible tenemos la opción de pŏnerlo en un banco (y obtener intereses) o invertirlo en un proyecto de energías renovables. Si sólo nos fijamos en el dinero, ¿dónde deberíamos poner el dinero? ¡Naturalmente donde vamos a ganar más!

El Indice de Descuento **d** y la Inflación **i** podrían verse como la opción que representa al banco. Por tanto el PNA de **poner nuestro dinero en el banco** es exactamente cero.

La Tasa interna de retorno (TIR) es el Indice de descuento en el que el VPN se convierte en cero. El TIR es el interés que el proyecto da. Si el TIR de un proyecto es más bajo que el índice de interés debería poner su dinero en el banco (esto es, si sólo se interesa en el máximo beneficio). En la práctica el TIR es utilizado mejor para comparar los diferentes proyectos y no como un indicador absoluto de los cálculos de costos y beneficios.

## A.6 Costos de la electricidad

### A.6.1 Energía solar fotovoltaica

En este capítulo se harán algunos cálculos de los costos de la electricidad. Las cifras dadas son indicativas, pues deben hacerse los cálculos exactos de costos para cada proyecto de

electrificación, incluyendo los costos de instalación, mantenimiento, transporte, guardianía, etc. Los precios se refieren a los costos de la obtención de electricidad para viviendas, es decir para sistemas solares: paneles y baterías

Todos los cálculos de precios se hacen con el método del tiempo de recuperación de la inversión y con la renta vitalicia (método del descuento). El descuento se hace con **d** = 10% y la inflación **i** = cero.

**ADVERTENCIA: Los precios calculados anteriormente dependen mucho de suposiciones hechas y no tienen valor en absoluto. Para evitar cálculos complicados sólo se incluyen los costos elevados y se asume un suministro promedio de sol.**

El costo de la electricidad de los paneles solares depende de la cantidad de radiación, la cual difiere a lo largo de la tierra y con las estaciones. El costo de una instalación solar es casi proporcional al área del panel solar.

**Energía**

En 20 años, con 5.5 kWh de energía solar por día, un panel solar de 1 $m^2$ tendrá una radiación **I** de:

$$I = 20 \times 365 \times 5.5 \times 1 = 40{,}150 \text{ kWh}$$

Esta radiación es parcialmente convertida en energía útil. Asumamos una eficiencia del panel del 10% y una eficiencia general (incluyendo las baterías) de 8%, entonces la energía será:

$$E = 0.08\ I = 0.08 \times 40{,}150 = 3{,}212 \text{ kWh}$$

**Costo**

El precio de un sistema (paneles solares y estructura de apoyo) es aproximadamente de US$ 10 por $W_p$ ó US$ 1,100 por $m^2$. Supongamos que se requieren baterías para 5 días de energía. En 5 días la energía almacenada será de aproximadamente (8% de eficiencia): $5 \times 5.5 \times 0.08$=2.2 kWh. Con un ciclo de 70%, la capacidad que debe comprarse es de 2.20/0.70 = 3.1 kWh. Por tanto 1 grupo de baterías cuesta (US$ 100 por kWh): US$ 310.

Asumamos el tiempo de vida de una batería en 5 años (1,800 ciclos), por tanto 4 grupos son necesarios en 20 años, y el costo total asciende a 4 × US$ 310 = US$ 1,240. ¡Esto es mayor al costo del panel! El costo total asciende a 1,100 + 1,240 = US$ 2,340.

Finalmente el precio de la electricidad es 2,340/3,212 = US$ 0.73/kWh.

Con el descuento el cálculo se vuelve un poco más complicado. Nuevamente la electricidad debe descontarse, para obtener 8.51/20 × 3,212 kWh = 1,367 kWh.

La suma de los costos es calculada en la tabla A.5. En el año cero los paneles y el primer grupo de baterías se compran, en el año 5, 10 y 15 se reemplazan estas baterías.

**Tabla A.5:** ***Costos descontados de paneles solares y baterías (10% de descuento)***

| AÑO | FACTOR DE DESCUENTO D | COSTO [US$] (Recuperación de la inversión) | COSTO DESCONTADO [US$] |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1,100 + 310 | 1,410 |
| 5 | 0.62 | 310 | 192 |
| 10 | 0.39 | 310 | 121 |
| 15 | 0.24 | 310 | 74 |
| **TOTAL** | | **2,340** | **VPN = 1,797** |

El VPN (Valor Presente Neto) del proyecto es US$ 1,797 (negativo) y el precio de la electricidad es US$ 1,797/1,367 = US$ 1.31.

El mismo cálculo para la radiación de 3 kWh/m$^2$/día da un precio de la electricidad de US$ 1.02 por kWh (sin descuento) y de US$ 1.99 (con 10% de descuento)

### A.6.2 Equipos Diesel

Un problema al comparar equipos diesel con equipos solares y eólicos es que los diesel tienen un tamaño mínimo. Sin embargo este tamaño mínimo del diesel entrega una gran cantidad de energía. Por lo tanto si no hay suficientes usuarios los diesel podrían muy bien ser la opción más económica. Por debajo de 20 kW es cuando se considera un equipo diesel, 20 kW se refiere a la máxima potencia eléctrica de salida.

**Energía**

Se debe esperar que un diesel opere gran parte del tiempo con cargas parciales (el motor es muy grande, o el consumo de electricidad muy pequeño). Asumamos una carga promedio de 70%. Con 6 horas de uso al día la energía diaria de salida es de $0.70 \times 6 \times 20 = 84$ kWh. En 20 años la salida es de $20 \times 365 \times 84 = 613{,}200$ kWh.

¿Cuánto combustible se requiere para producir 1kWh de electricidad? El contenido de energía del diesel es aproximadamente 10kWh/litro. Con una eficiencia máxima del diesel del 50%, se necesita 0.2 litros. Es más realista asumir un 25% de eficiencia (especialmente dado que el motor diesel no operará a carga completa), lo que nos da 0.4 litros por cada kWh.

El consumo diario de combustible es de 84 × 0.4 = 33.6 litros.

**Costos (tiempo de recuperación de la inversión)**

A US$ 100 por kWh, el costo de inversión de un equipo de 20 kW es de US$ 20,000 (según la tabla A.4).

El tiempo de vida de un equipo diesel es de 15,000 h, por lo tanto con 6 horas por día de uso la vida es de 7 años, por lo que se requieren 3 grupos en 20 años. En este periodo se necesitan 245,280 litros de combustible. A US$ 0.50 por litro, esto significa una inversión de US$ 122,600

La inversión total se convierte en 3 × 20,000 + 122,600 = US$ 182,600; y el precio de la electricidad sería de US$ 182,600/613,200 = US$ 0.30 por kWh.

**Costo (10% de descuento)**

Los equipos diesel deben comprarse en el año cero, año 7 y año 14. La inversión descontada sería de:

$$I = 20{,}000 + 0.51 \times 20{,}000 + 0.26 \times 20{,}000 = \text{US\$ } 35{,}400.$$

El costo del combustible es el mismo cada año, por lo tanto el factor de descuento acumulado que se puede usar sería D = 8.51. Esto nos da una inversión en combustible de 8.51/20 × 613,200 = 260,900 kWh.

El precio de la electricidad sería de (35,400 + 52,200)/260,900 = US$ 0.34.

**Observaciones**

El precio de la electricidad casi no cambia con los descuentos, porque tanto el costo como la electricidad se reparten a lo largo de un período de 20 años.

Un equipo de 20 kW es bastante grande. Asumamos que una familia utilice 1 kWh por día, entonces 84 familias podrían beneficiarse.

### A.6.3 Conexión a la red

**Costo**

Es difícil calcular el costo de la electricidad sin información exacta sobre la dimensión de la red en cuestión y el número de usuarios que se conectarán y la potencia requerida.

En Holanda (muy densamente poblada) el precio de la electricidad es de US$ 0.16 por kWh. De este monto US$ 0.06 es para el combustible que produce la electricidad, y por tanto US$ 0.10 es para la distribución (la red).

Esto significa que en los poblados cercanos con una densa red a pequeña escala, la energía solar y eólica no tienen oportunidad.

Sólo para darse una idea del costo del que estamos hablando calculemos ahora lo que costaría conectar una aldea de 5,000 personas a una red a 10 km. Una línea de 10 kV costaría US$ 110,000 y un transformador adicional unos US$ 15,000. Una vez construida la red, el consumo de electricidad sin duda se elevará; tomemos 0.2 kWh por persona al día = 100kWh/día para la aldea. En 20 años la aldea utilizará $20 \times 365 \times 100 = 730{,}000$ kWh.

Si la conexión dura 20 años, el costo por kWh sería de US$ 125,000/730,000 = US$ 0.17. Con combustible y el costo de la densa red ya existente, el precio de la electricidad sería de 0.17 + 0.16 = US$ 0.33 por kWh.

Con 10% de descuento el uso de electricidad sería de $8.51/20 \times 730{,}000 = 310{,}600$ kWh; y el precio sería entonces de: US$ 125,000/310,600 = US$ 0.40, o en su totalidad de 0.40 + 0.16 = US$ 0.56.

***Ejercicio A.1:*** **Precio de la electricidad**

En este ejercicio deseamos electrificar solo una parte de un pueblo. El consumo total de electricidad es de 1.6 kW (promedio diario) = 38.4 kWh por día = 14,016 kWh por año.

Consideramos 2 sistemas:

1. Sistema solar
2. Sistema diesel

Para el caso de un sistema solar puede ser mejor emplear muchos sistemas individuales en lugar de un sistema central, de esta manera no se necesita una red; el generador diesel no tiene esta ventaja. Sin embargo en este ejercicio suponemos que los costos de la red son pequeños.

Impreso en los talleres de
**GOVI - 4 E.I.R.L**
R.U.C. 11080871
Av. Petit Thouars 1887 - Lince
Telefax: 265-6273
Lima - Perú