



ELECTRICIDAD SOLAR  
FOTOVOLTAICA

nuevas publicaciones

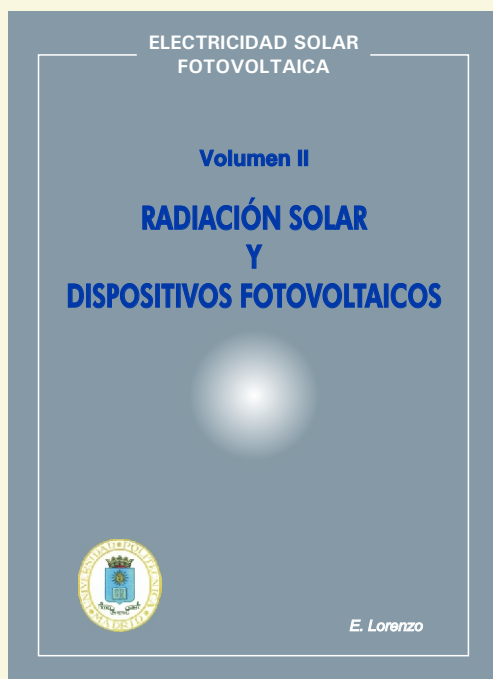
Volumen II:

# RADIACIÓN SOLAR Y DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Autor: Eduardo Lorenzo 252 págs. 75 figuras P.V.P.: 47 euros

*Segundo volumen de la obra cuyo título genérico es "Electricidad Solar Fotovoltaica". Se trata de un libro de nivel avanzado —aunque asequible para personas con formación técnica previa, no necesariamente en el área fotovoltaica—, destinado a todos aquellos técnicos que deseen profundizar en los aspectos fundamentales que rigen el comportamiento de la radiación solar y los generadores solares, aclarando conceptos que, no por muy manejados, son siempre perfectamente comprendidos por los ingenieros y proyectistas de plantas fotovoltaicas.*

*"Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos", constituye un texto de referencia obligada para ingenieros y estudiantes de Escuelas Técnicas en las que se impartan enseñanzas relacionadas con la energía solar, y, en general, para todos los que deseen comprender las bases teóricas que sustentan la actual tecnología fotovoltaica, que tan espectacular desarrollo ha experimentando en los últimos años.*



## CONTENIDO

**Magnitudes, medidas y nombre.** Introducción. Lo que se propone aquí. Nomenclatura. Simbología. **La célula solar (I).** Introducción. La célula solar. Fotogeneración de corriente. Corriente de oscuridad. Característica  $I-V$  de iluminación. Circuito equivalente de una célula solar. Modificaciones del comportamiento básico. **La célula solar (II).** Introducción. Cristales iluminados. Efecto fotovoltaico. Campos eléctricos en el interior de los cristales. La célula solar ideal. La célula solar real. Modelos y circuitos equivalentes de la célula solar. Efectos de la iluminación y la temperatura. **La radiación solar que llega a los generadores fotovoltaicos.** Introducción. Movimiento Sol-Tierra. Componentes de la radiación solar. Datos e incertidumbre de la radiación solar. Índice de claridad. Radiación en superficies inclinadas. Efectos del ángulo de incidencia y del polvo. Irradiación sobre superficies de interés. Sombras y mapas de trayectorias. Evolución diaria de la temperatura ambiente. Generación de series sintéticas de valores de radiación solar. El año meteorológico típico. **La electricidad que sale de los generadores fotovoltaicos.** Introducción. Módulos y generadores fotovoltaicos. Comportamiento en condiciones arbitrarias de operación. Los métodos elegidos. Efectos de segundo orden. Interconexión de módulos fotovoltaicos. **Diseño de sistemas fotovoltaicos.** Introducción. Sistemas fotovoltaicos autónomos. Sistemas fotovoltaicos para electrificación rural. Productividad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Pedidos mediante talón bancario (libre de gastos), o contra reembolso (más 5 euros de gastos de envío) a:  
PROGENSA, c/ Comercio, 12, 41927 Mairena del Aljarafe, Sevilla (España) ☎ 954 186 200 Fax: 954 186 111

Tienda electrónica: [www.progenza.es](http://www.progenza.es)

# Ejemplos de páginas del libro

## Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos

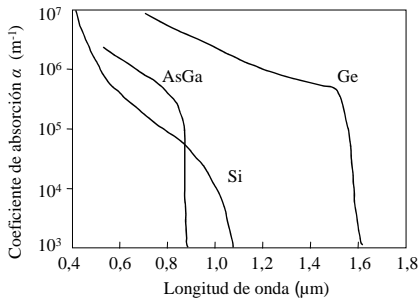


Fig. 2.5. Coeficiente de absorción óptica de diferentes semiconductores.

En la práctica, solamente se crea un par electrón-hueco por cada fotón absorbido, independientemente del valor de su energía. En esta hipótesis, el número de pares fotogenerados coinciden con el de fotones absorbidos, y si denotamos con  $\alpha'(E, W)$  la absorptancia espectral, la corriente fotogenerada se calcula resolviendo la siguiente integral:

$$I_L = eA_c \int_{E_G}^{\infty} S(E) \alpha'(E, W) dE \equiv eA_c \int_{E_G}^{\infty} S(E) [1 - \rho(E, W) - \tau(E, W)] dE \quad [2.2]$$

siendo  $S(E)$  el número de fotones de energía  $E$  incidentes sobre la célula por unidad de superficie y de tiempo y  $A_c$  el área de célula iluminada.

Las pérdidas de no-absorción son inevitables y dependen únicamente de las propiedades del semiconductor. Las pérdidas de reflexión y transmisión, por el contrario, pueden, al menos en principio, reducirse a cero, utilizando capas antirreflectantes y diseños de dispositivo adecuados, por ejemplo. Por consiguiente, la máxima fotocorriente que podría esperarse de una célula solar se obtiene eliminando estas dos últimas pérdidas [es decir, consiguiendo que  $\alpha'(E, W) = 1$ ] y viene dada por la integral:

$$I_L \leq eA_c \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE \quad [2.3]$$

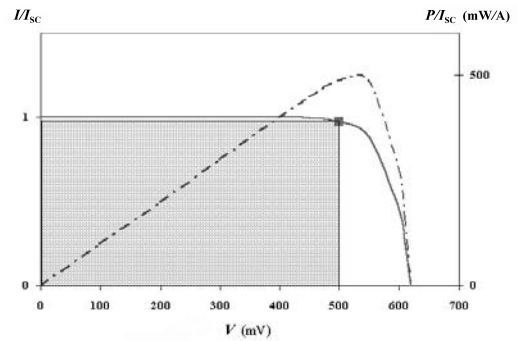


Fig. 3.12. Variación de las funciones  $I/I_{sc}$  y  $P/I_{sc}$  "versus" la tensión de operación de una célula solar ideal.

### 3.5.4 En el punto de máxima potencia

La figura 3.12 pone de manifiesto la existencia de un punto de máxima potencia. Su localización exacta puede abordarse recordando que al máximo de una función corresponde un cero en su derivada. Por lo tanto, utilizando el subíndice "M" para referirnos a él:

$$dP/dV = 0 \quad \text{o bien} \quad 0 = d(I V)_M \equiv I_M dV + V_M dI \quad [3.7] / [2.14]$$

de donde se deduce con facilidad que

$$I_M = (I_L + I_0) / (1 + m k T_c / e V_M) \quad [3.8] / [2.16]$$

y que juntamente con la propia ecuación de la célula aplicada en el punto de máxima potencia,

$$I_M = I_L - I_0 [\exp(e V_M / m k T_c) - 1] \quad [3.9] / [2.17]$$

forma un sistema cuya solución es precisamente el punto buscado ( $I_M, V_M$ ). Sin embargo, tal sistema no tiene una solución analítica y para resolverlo es necesario vérselas con la casi siempre engorrosa tarea de enfrentarse a una ecuación trascendente. Más cómodo resulta el recurso a una solución analítica aproximada, dada por:

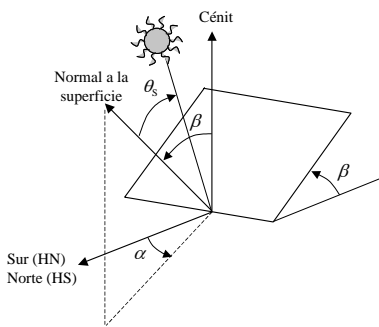


Fig. 4.7. Ángulos de posición de una superficie: posición del receptor (inclinación,  $\beta$  y azimut,  $\alpha$ ) y ángulo de incidencia de los rayos solares,  $\theta_s$ .

### 4.3 Componentes de la radiación solar

Con buena aproximación, el Sol radia energía en la misma cuantía que lo haría un cuerpo negro a 5777 °C, lo que implica que la potencia de la radiación solar que alcanza la parte superior de la atmósfera terrestre cuando la distancia Sol-Tierra es de una unidad astronómica, denominada *constante solar*, es de

$$B_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \quad [4.11]$$

Por otro lado, el diámetro del Sol es de 1,39 millones de kilómetros, lo que hace que se vea desde la Tierra con un ángulo de 32'.

La radiación que alcanza la superficie externa de la atmósfera de la Tierra se llama *radiación extra-atmosférica*, y consiste esencialmente en rayos que llegan desde el Sol en línea recta (radiación directa), ya que al estar el espacio exterior casi totalmente desprovisto de materia dispersa, la esfera celeste aparece negra (sin radiación) con pequeños puntos brillantes correspondientes a las estrellas, de importancia despreciable a nuestros efectos, y una singularidad importante correspondiente al Sol.

La radiación solar se modifica al atravesar la atmósfera por interacción con sus componentes. Algunos, como las nubes, reflejan radiación; otros, como el ozono,

### 4.9 Sombras y mapas de trayectorias

El entorno de un módulo fotovoltaico puede incluir árboles, montañas, chimeneas, paredes, otros módulos, etc. En algunas ocasiones, particularmente cuando los módulos se integran en la arquitectura de los edificios, este entorno proyecta sombras sobre el módulo, provocando así una reducción de su capacidad de generar energía que debe ser tenida en cuenta en el diseño del correspondiente sistema fotovoltaico. Las ecuaciones [4.3] a [4.5] permiten representar las trayectorias del Sol en términos de elevación *versus* azimut, como explica la figura 4.20.

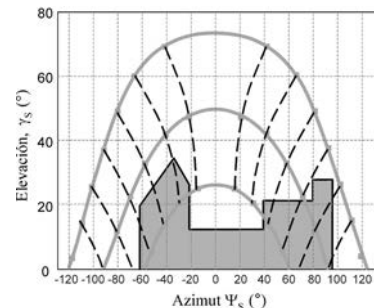


Fig. 4.20. Trayectorias del Sol en un lugar con latitud  $\phi = 40,5^\circ$ . Las líneas gruesas describen el camino del astro en los solsticios y equinoccios. Las líneas de puntos corresponden a las diferentes horas del día. La superposición del horizonte local permite determinar el período de sombras. En este ejemplo, el día del solsticio de verano, el módulo estaría a la sombra desde el amanecer hasta las 10:30 (hora solar) y desde las 14:30 hasta el ocaso.

Este tipo de representaciones, denominadas *mapas de trayectorias del Sol*, constituyen una herramienta muy útil para determinar la duración y el efecto de las sombras producidas por cualquier obstáculo. La lectura directa de un teodolito bien estacionado permite obtener los ángulos de elevación y azimut de los puntos más relevantes (esquinas, cumbres, etc.) de cualquier posible obstáculo. Con ellos puede superponerse el *horizonte local* al mapa de trayectorias. El efecto de las sombras