

Tema 3: Energía solar

- 3.1 Aplicaciones de la energía solar.
- 3.2 Captación directa de energía solar.
- 3.3 Conversión en energía química. Fotosíntesis.
- 3.4 Conversión en energía química. Semiconductores fotocatalizadores.
- 3.5 Conversión en energía eléctrica.
 - 3.5.1 Celdas fotogalvánicas de lámina delgada.
 - 3.5.2 Celdas fotoelectroquímicas.
 - 3.5.3 Celdas solares o fotovoltaicas.

- La energía solar es el fundamento del sistema energético del planeta Tierra.

Tabla 3.1: Formas y usos de la energía solar.

Formas de energía solar	Utilización
Combustibles fósiles	Combustión y conversión del carbón, petróleo y gas natural.
Captación directa por vía térmica	Calentamiento y enfriamiento de edificios. Hornos solares
Captación indirecta por vía térmica	Energía eólica; Energía hidroeléctrica, Corrientes térmicas marinas; Conversión fotovoltaica solar; Fotelectrolisis.
Captación por fotosíntesis	Producción y conversión de biomasa terrestre y marina.

- El flujo de energía solar es cercano a 4.2×10^9 J/m²·min, con su máxima intensidad en la región del visible (400 – 700 nm).
- Se estima que al año penetran a través de la atmósfera unos 5.4×10^{24} J de energía solar, cantidad de la cual un 30 % es reflejado y dispersado por la nubes y partículas de materia en suspensión.
- La utilización de esta tipo de energía para satisfacer las demandas sociales sigue siendo cara debido a que es captada de un modo difuso e intermitente.

Tabla 3.2: Distribución de la energía solar en la Tierra.

Tipo de consumo de Energía solar	Energía consumida (J x 10 ²¹ /año)	%
Reflejada por las nubes.	1620	30
Calentamiento de la atmósfera superficie terrestre	1026	19
Evaporación del agua	1242	23
Generación de vientos y corrientes oceánicas	11	0.2
Proceso de fotosíntesis	1	0.02

3.1 Aplicaciones de la energía solar.

- La energía lumínica absorbida por las especies es utilizada para promover el salto de un electrón hacia niveles electrónicos superiores y crear un *estado excitado electrónicamente*. Este último se distingue por dos hechos característicos:
 - las especies absorbentes tienen una *longitud de onda límite*, λ_{lim} correspondiente a la energía de excitación, ΔE , por encima de la cual no se absorbe
 - aunque la especie absorbente puedan absorber fotones de longitudes de onda inferiores a la límite, sólo una parte de la energía del fotón, equivalente a $hc/\lambda_{lim} = \Delta E$, será usada y el resto de energía se convertirá en energía térmica.
- Por tanto, la absorción de energía solar por los materiales puede originar: i) la excitación de electrones, produciéndose calor, ó ii) la iniciación de cambios químicos lo que habilita a ciertos materiales para poder almacenar energía (ej: las plantas).

3.2 Captación directa de energía solar

- La captura de energía solar es utilizada para su conversión en diferentes tipos de energía:
 - i) Calor de baja temperatura para el calentamiento de agua y espacios.
 - ii) Electricidad para luces y comunicaciones.
 - iii) Almacenable como combustibles químicos para transporte y calefacción.
- La conversión de energía solar como calor de baja temperatura resulta hoy en día bastante usual.
- La radiación infrarroja es atrapada mediante el uso de colectores negros que se encuentran recubiertos de vidrio.
- Las plantas solares pueden producir una energía de 1600 W/cm^2 (para una energía incidente de 950 W/m^2) y una temperatura media de $3825 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La eficiencia de este proceso suele ser de un 40 %.

3.3 Conversión en energía química. Fotosíntesis.

- La *clorofila verde* y otros pigmentos de las plantas actúan como colectores de la energía solar.
- La clorofila es un compuesto de coordinación en el que un ligando porfirínico, anillo quelato tetradentado, se coordina con un átomo de Mg. En función del tipo de sustituyentes del anillo porfirínico se pueden distinguir dos tipos de clorofila, la *clorofila a* y *b*.

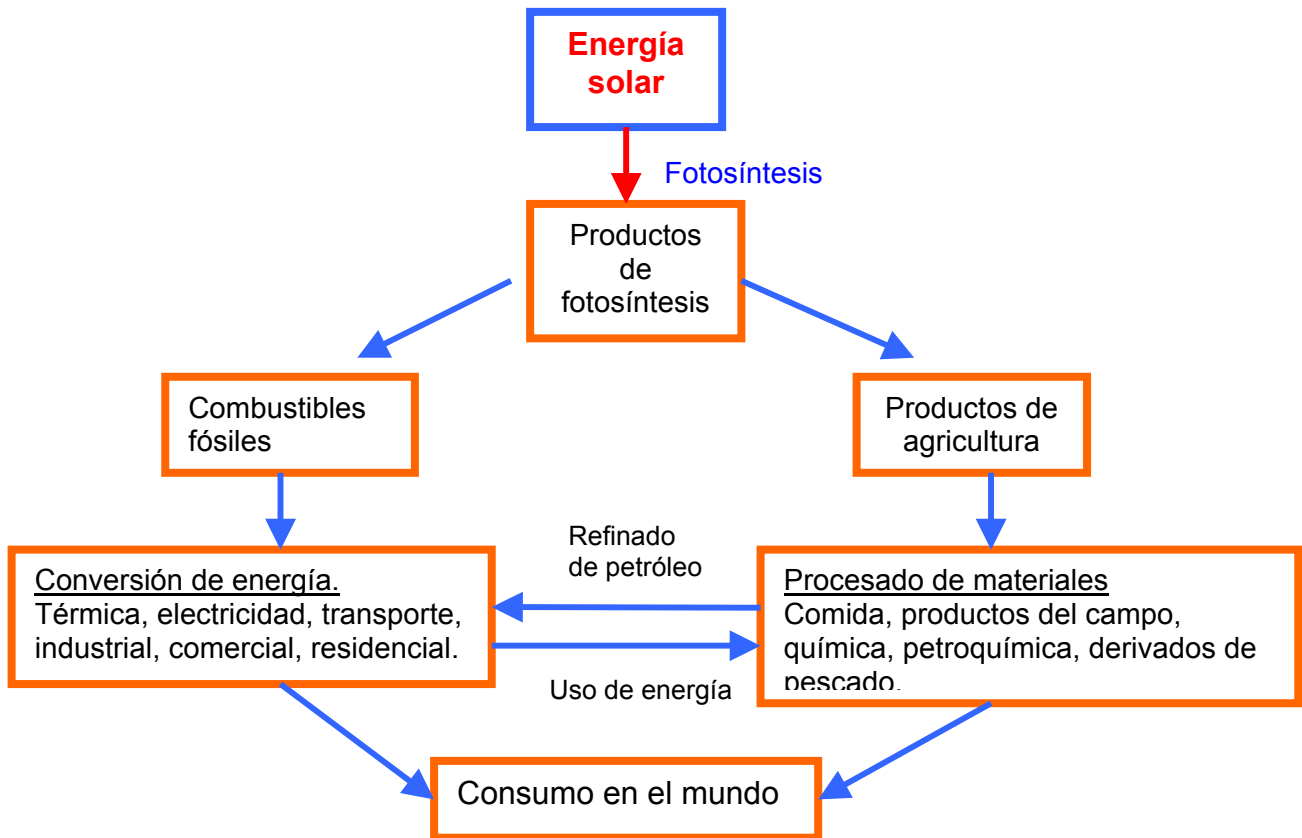
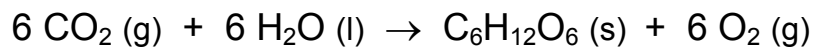


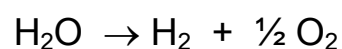
Figura 3.2: Productos directos e indirectos de la fotosíntesis.

- El espectro de absorción electrónica de las moléculas tienen bandas asociadas a transiciones $\Pi \rightarrow \Pi^*$.
- Una banda de baja energía, alrededor de 700 nm (posición que varía según el tipo de clorofila) es la que origina el color verde de este pigmento y es la transición que captura la energía solar.
- La banda de absorción que ocurre a 430 nm resulta ser una banda de alta energía absorbida por otros pigmentos como los carotenoides, lo que protege a la planta de daños por radiación y la energía puede ser transferida al sistema clorofila envuelto en el proceso de la fotosíntesis.
- Normalmente, la energía absorbida de esta manera se pierde rápidamente por fenómenos de fluorescencia o emisión de calor al exterior.

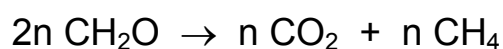
- La clorofila-Mg posee un estado triplete excitado de baja energía que puede recibir un electrón excitado, y permanecer allí el tiempo suficiente para poder ser utilizado en reacciones químicas.
- Las reacciones químicas de la fotosíntesis son bastante complejas y básicamente se pueden simplificar :



- Durante la fotosíntesis existe una conversión de energía solar en energía química, con lo que se obtiene 15.1 kJ/g de combustible y una energía libre de reacción de 1.25 eV por electrón transferido.
- La eficiencia del proceso de fotosíntesis es muy pobre, < 1%, aunque puede aumentar hasta el 10-12 % en condiciones de abundancia de CO₂ y H₂O, y adecuadas temperatura del agua y energía solar.
- Cuando el sistema de fotosíntesis se mantiene en condiciones reductoras puede producir también hidrógeno, en la cantidad de 9 moles de H₂ por día y m². Esto ocurriría sin la participación del carbón.

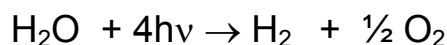
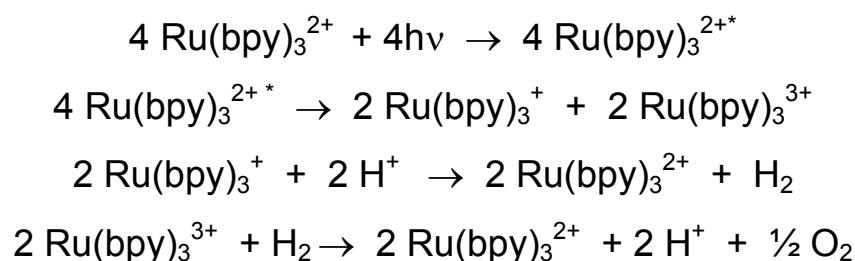


- Parte del material fotosintético producido se puede utilizar como combustible natural: azúcar de caña, árboles de caucho. Cuando la planta se deja morir anaeróbicamente se produce la liberación de metanol:

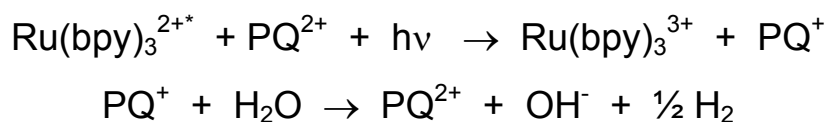


3.4 Conversión en energía química. Semiconductores fotocatalizadores.

- La descomposición fotocatalítica del agua requiere en su modo más simple de encontrar especies absorbentes, que una vez excitada, actúen simultáneamente como buen reductor y oxidante, de tal modo que puedan reducir el agua a H₂ y oxidarla a O₂.
- Cuando se produce la absorción de luz visible, las siguientes reacciones ocurren:

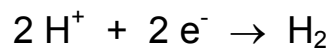
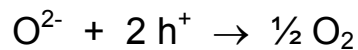


- Por tanto se requiere una molécula transmisora que pueda permitir que uno de los electrones involucrados en la capacidad oxidante o reductora del complejo se encuentre en lugares diferentes uno del otro. Así por ejemplo se utiliza el metilviológeno o paraquat, PQ²⁺, que ahora se convierte en el agente reductor:



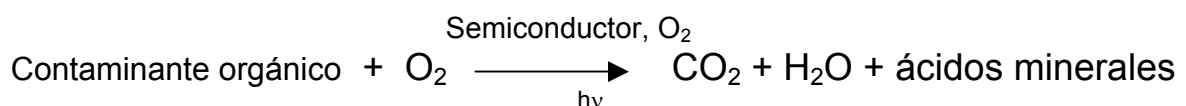
- Tanto la producción de hidrógeno como la de oxígeno requieren del uso catalizadores, lo que indica que la reacción no es lo bastante homogénea en la solución.

- Una alternativa para separar los sitios de oxidación y reducción es la utilización de semiconductores sólidos como compuestos transmisores.
- Para comprender el papel electrónico que desempeña el semiconductor en la electrólisis fotoasistida del agua, es necesario utilizar la teoría de bandas de los sólidos. La excitación térmica provoca que unos pocos electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando huecos en la primera.
- Los pares electrón-hueco pueden ser generados en el semiconductor por la absorción de energía luminosa mayor a la separación entre las bandas de valencia y conductora. La separación del par hueco-electrón es fácil debido al campo eléctrico que se forma espontáneamente en la interfase semiconductor-electrolito (celda fotoelectroquímica), y ambos se emplean en la descomposición del agua:



[Nuevas aplicaciones de los semiconductores fotocatalíticos.](#)

- En los últimos años ha existido un gran interés en el empleo de semiconductores fotosensitivos para realizar la mineralización oxidativa de contaminantes a partir de oxígeno. El proceso se puede resumir del modo:

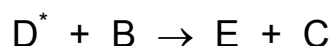


- Esta aproximación de purificación del agua ofrece varias ventajas respecto a otros métodos existentes: el fluido mineral que se produce es menos nocivo para el medioambiente, el proceso se puede activar o desactivar simplemente con un interruptor.
- En esta y otras aplicaciones, un semiconductor muy utilizado es el TiO_2 , dado que es inerte biológica y químicamente, es muy fosfatable, y es barato. Las otras aplicaciones en que se emplea este semiconductor fotocatalítico son:
 - Acción citotóxica hacia las células cancerígenas.
 - Fotodeodorizador en cocinas y baños
 - Recubrimiento de metales del grupo del Pt procedentes de residuos industriales o soluciones diluidas.
 - Síntesis de aminoácidos: glicina, alanina, ácido aspártico, ácido glutámico.

3.5 Conversión en energía eléctrica.

3.5.1 Celdas fotogalvánicas de lámina delgada.

- En la mayoría de las celdas galvánicas la luz es capturada por un absorbente, D, en una delgada capa de solución de electrolito que se encuentra entre dos electrodos.
- La solución electrolito también contiene especies, B, que realizan la transferencia electrónica con el estado excitado de D,



- Los productos E (forma oxidada o reducida del absorbente) y C (forma reducida o oxidada de B) normalmente suelen revertir térmicamente de manera rápida.

- Esto puede ser evitado en algunos casos si:



- Si existe una cinética rápida para los pares redox D/E y C/B en los electrodos iluminados y no iluminados, respectivamente, entonces se desarrollará un fotopotencial en la celda equivalente a:

$$\Delta E = E_{D,E} - E_{C,B}$$

- Existen muchos problemas asociados a las celdas fotogalvánicas, principalmente en encontrar electrodos de alta selectividad.

[3.5.2 Celdas fotoelectroquímicas \(PEC\).](#)

- Este tipo de celdas no se utilizan sólo para la generación de combustibles químicos, sino también para generar electricidad.
- Para que una celda PEC opere eficientemente los electrones fotogenerados se deben mover a través del circuito externo hacia el otro electrodo y reducir la especie R^+ a R.
- Durante la generación de electricidad en una celda PEC, las reacciones electroquímicas que ocurren en el electrolito sirven sólo para transportar corriente.
- Sin embargo, uno de los mayores problemas encontrados en el desarrollo de celdas PEC para la conversión de la energía solar estriba en que todos los semiconductores que absorben luz visible son termodinámicamente inestables a la oxidación por los huecos fotogenerados.
- Se ha mostrado que semiconductores tipo-n CdS y CdSe se estabilizan contra la corrosión anódica cuando se utiliza el par $\text{Na}_2\text{S}_2/\text{NaS}_2$ y NaOH 1M como electrolito.

- La utilización de monocristales permite una mayor eficiencia ya que se minimiza la recombinación de huecos y electrones que ocurre normalmente en los límites de grano.

Tabla 3.3: Celdas fotoelectroquímicas de monocristal.

Semiconductor	Electrolito	Eficiencia (%)
n-GaAs	K ₂ Se 1M, K ₂ Se ₂ 0.01 M, KOH 1M, Ru ³⁺	12
n-GaAs	K ₂ Se 1M, K ₂ Se ₂ 0.01 M, KOH 1M, Os ³⁺	15
n-InP	V ³⁺ 0.3M, V ²⁺ 0.05 M, HCl 5M	11.5
n-Wse	KI 1M, KI ₃ 0.01 M	10.2
n-CdSe	Na ₂ S ₂ 1M, NaOH 1M	7.5
n-WS ₂	NaBr 1M, Br ₂ 0.01 M	6

- Una desventaja del empleo de monocristales resulta de su alto coste de fabricación. Una alternativa sería el uso de semiconductores policristalinos cuya producción es más fácil y económica.

Tabla 3.4: Celdas fotoelectroquímicas policristalinas.

Semiconductor	Electrolito	Eficiencia (%)
n-CdSe _{0.65} Te _{0.35}	Na ₂ S ₂ 1M, KOH 1M	7.9
n-GaAs	K ₂ Se 1M, K ₂ Se ₂ 0.01 M, KOH 1M	7.8
n-CdSe	Na ₂ S ₂ 1M, NaOH 1M	6.5

3.5.3 Celdas solares o fotovoltaicas.

- Una celda solar, o celda fotovoltaica, es un dispositivo en el que un semiconductor de estado sólido posee una región de composición química variable, a la que se le asocia un gradiente de campo eléctrico el cual se utiliza para separar los pares hueco-electrón fotogenerados en la región.
- La gradación en la composición química se puede obtener de dos modos: i) depositando juntos dos materiales distintos, o ii) dopando un único semiconductor en un modo asimétrico.
- La celda solar más conocida y avanzada es la *celda de silicio*. Esta se compone por una láminas de 1 μm de silicio tipo-n, dopada con fósforo, en contacto íntimo con una lámina de 100 – 300 μm de silicio tipo-p, dopado con boro.
- Las primeras celdas solares fueron desarrolladas por la compañía Bell Telephone en 1954, con una eficiencia del 4 % en conversión de energía, y al final de esa década obtienen eficiencias del 11 %.
- El interés de estas celdas se centró en su aplicación en los satélites espaciales, en los que se utiliza para suministrar potencia a la radio. Para evitar problemas de bajas eficiencias, las celdas solares se construyeron con monocristales de sílice, lo que resulta ser bastante caro pero se alcanzan eficiencias del 15 – 20 %.
- En 1974 la tecnología de estas celdas se mejora al poderse utilizar silicio amorfo en las mismas con una eficiencia del 5 % en conversión de energía. La utilización de silicio amorfo en celdas solares es posible siempre que sean controladas las condiciones de su deposición y modificación de su composición.

- La clave de su utilización radica en que posee una band-gap (1.65 eV) mayor que la del silicio monocristalino y absorbe la luz de un modo 40 veces más fuerte que este último.
- Estas celdas también presentan algunos inconvenientes, y es que se ha descubierto en ellas una lenta degradación fotoelectrónica cuando se exponen a los altos niveles de flujo solar encontrados en el espacio, sin conocerse hoy día la razón.
- En general estas celdas presentan eficiencias entorno al 10 %, siendo grandes competidoras de las celdas de silicio monocristalino en sus aplicaciones terrestres. De hecho hoy en día se utilizan para suministrar potencia a calculadoras, televisores miniaturizados y cargadores de batería portátiles.

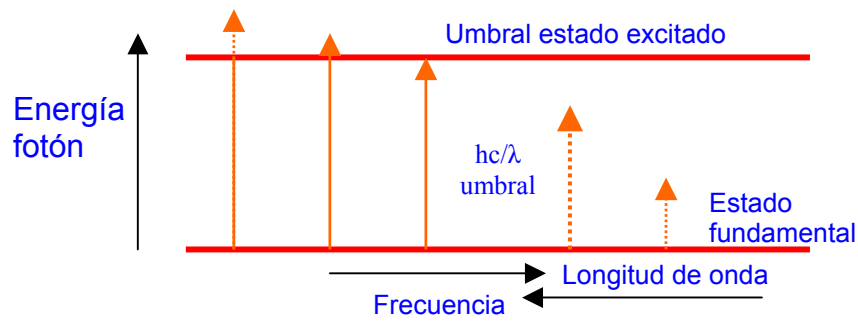


Figura 3.1: Utilización del espectro de energía solar por un absorbente.

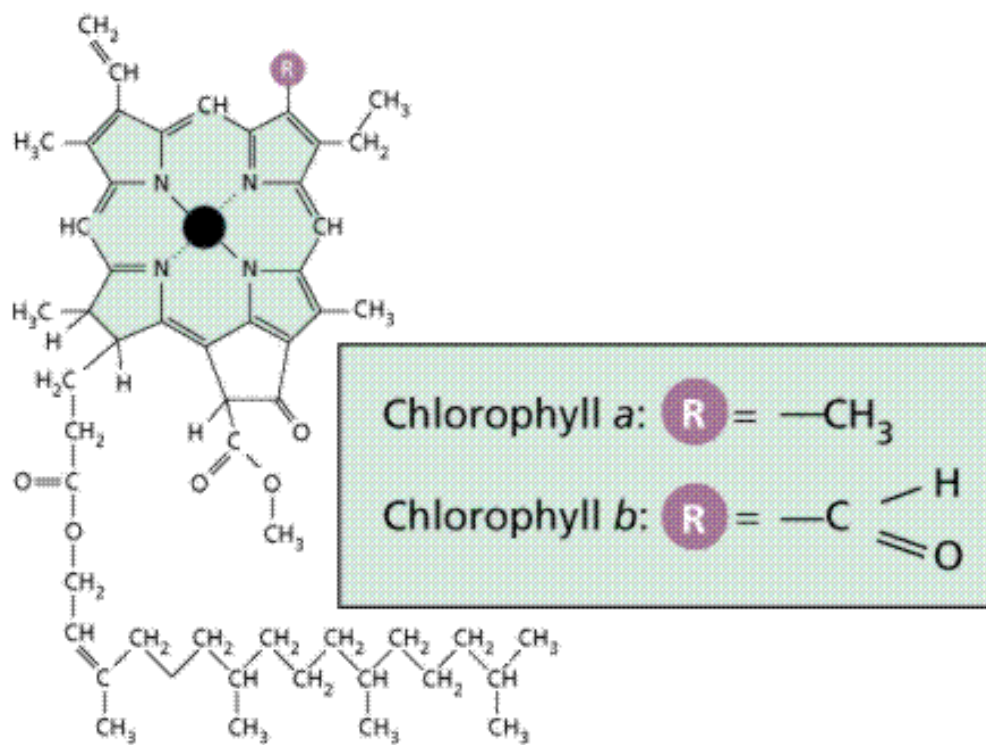


Figura 3.3: Estructura de la clorofila.

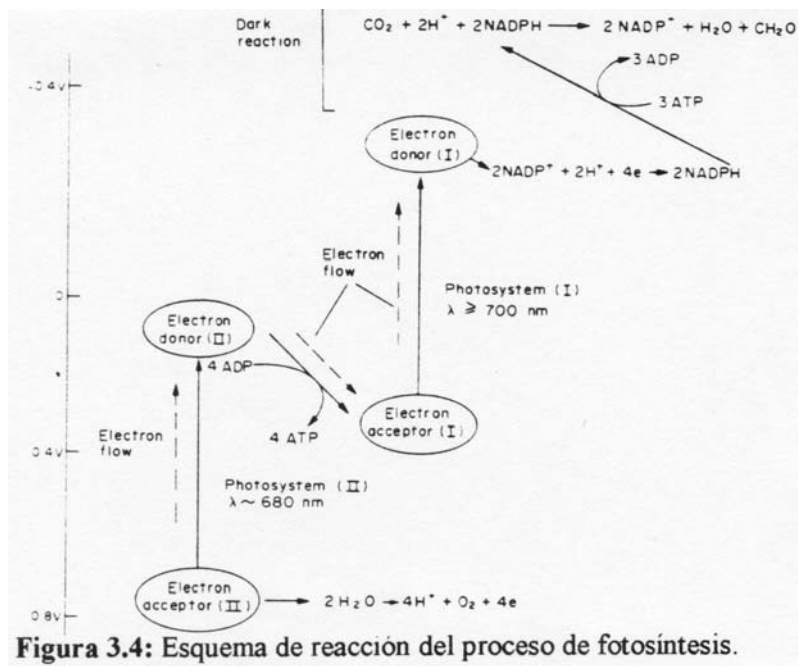


Figura 3.4: Esquema de reacción del proceso de fotosíntesis.

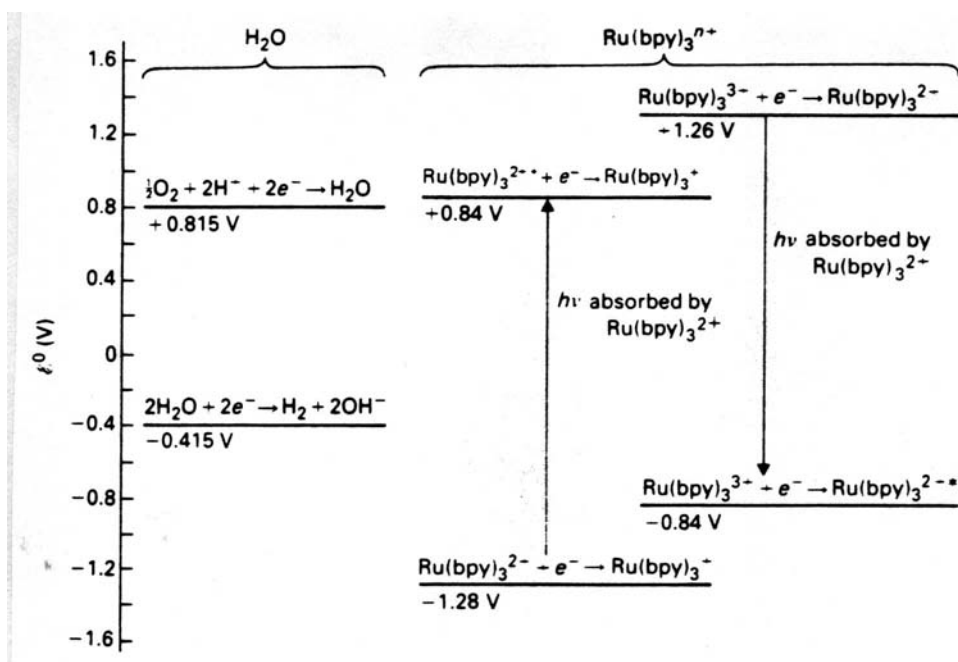


Figura 3.5: Relación de potenciales del agua y especies Ru(bpy)_3^{n+} .

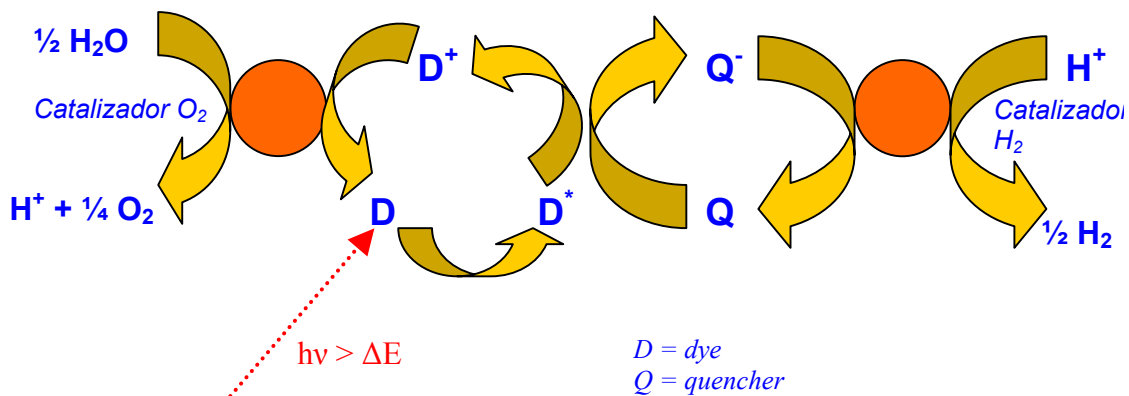


Figura 3.6: Esquema de la reacción de descomposición del agua.

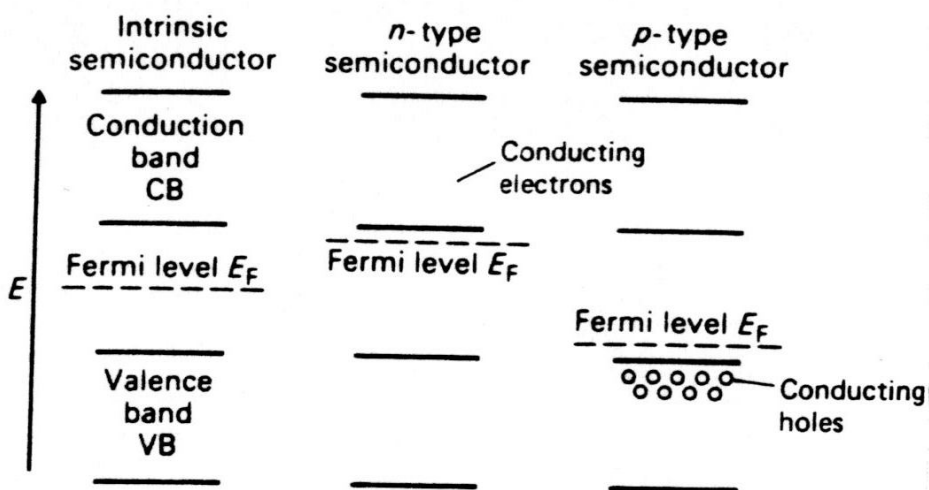


Figura 3.7: Relaciones de bandas de energía para semiconductores sólidos.

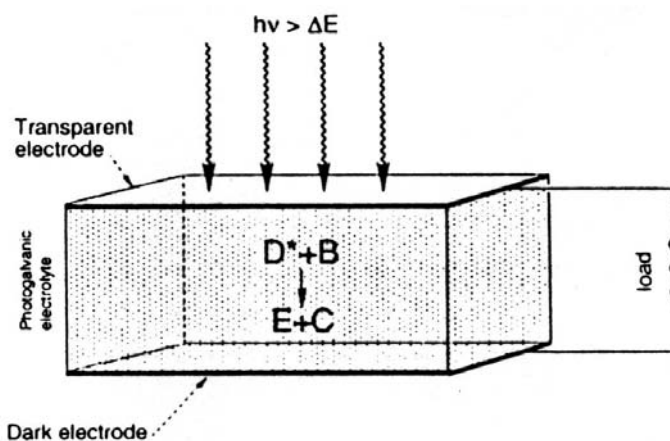


Figura 3.8: Esquema de los componentes básicos de una celda fotogalvánica.

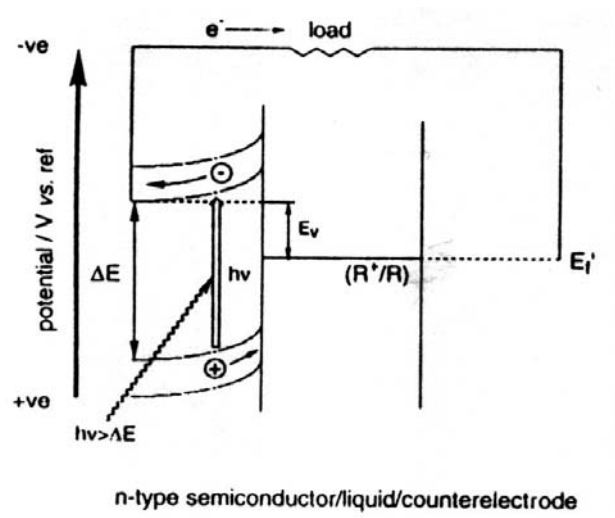


Figura 3.9: Ilustración de una celda fotoelectroquímica tipo-n.

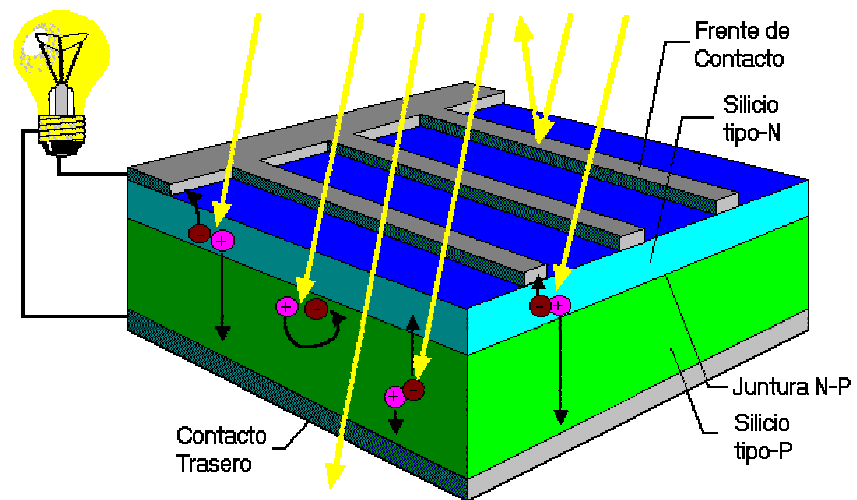


Figura 3.10: Representación esquemática de una celda solar de sílice.