



UNIVERSIDAD DE VALPARAISO

Facultad de Ciencias

Departamento de Biología y Ciencias Ambientales

Carrera Ingeniería Ambiental

“Estudio de Celdas Solares de TiO_2 nanoestructurado con tintura sensibilizadora, en el ámbito de potenciar el uso de Energías Renovables”

Trabajo de Titulación

Para la obtención del Título de *Ingeniero Ambiental*

Realizado por:

Nicanor Alfredo Altamirano Rojas

Profesor Guía: Patricio Arellano

Valparaíso, Chile

2007

Tabla de Contenidos

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN Y ALCANCES.....	1
CAPITULO I.- La luz del sol, energía a disposición.....	3
1.1. Breve introducción.....	3
1.2. Fotosíntesis.....	4
1.2.1. Teoría de evolución de los primeros organismos fotosintéticos que generaron las condiciones aptas para la vida.....	4
CAPITULO II.- Problemática ambiental y contexto actual de la energía.....	8
2.1. Impacto Humano.....	8
2.2. Respuesta al Cambio climático.....	9
2.3. Dependencia Energética.....	11
2.4. Preocupación y desarrollo de Energías Renovables.....	15
2.5. Avances destacados en el área de la energía solar a nivel local.....	17
CAPITULO III.- Fundamentos físicos de las celdas solares.....	20
3.1 Semiconductores.....	20
3.1.1. Semiconductor intrínseco.....	21
3.1.2. Banda de energía prohibida.....	22
3.1.3. Semiconductor Extrínseco.....	23

3.1.4. Generación y recombinación de portadores en un semiconductor.....	25
3.1.5. Conducción eléctrica en un semiconductor.....	26
3.2. La unión p-n.....	27
3.3 Dispositivos semiconductores.....	28
CAPITULO IV.- Celdas solares y arreglos fotovoltaicos.....	32
4.1. La celda solar.....	32
4.2. Arreglos fotovoltaicos.....	34
CAPITULO V.- Tecnología fotovoltaica.....	35
5.1. Silicio cristalino.....	37
5.2. Silicio amorfo.....	38
5.3. Celdas de capa delgada.....	39
5.4. Celdas de 3ª y 5ª generación.....	40
5.5. Celdas multicapa.....	40
CAPITULO VI.- Objetivos.....	42
6.1. Objetivos del estudio.....	42
CAPITULO VII.- Tecnología de celdas solares de TiO ₂ nanoestructurado con tintura sensibilizadora (DSSC).....	43
7.1. Principio Básico.....	43
7.2. Desarrollo de la tecnología DSSC.....	44
7.3. Estructura y funcionamiento.....	45
7.4. Comparativas y características.....	49
CAPITULO VIII.- Fabricación artesanal de celdas solares de tecnología DSSC..	53
8.1. Ensamblado de celdas.....	53
8.2. Medición de las características eléctricas de salida.....	56

8.3. Variables no controladas.....	58
8.4. Análisis y discusión de datos.....	59
CONCLUSIONES.-.....	60
DISCUSIÓN Y COMENTARIOS.....	62
BIBLIOGRAFIA.-.....	64

A mi familia completa, la que está en la tierra, en las nubes y en todos lados; por su apoyo, comprensión y cariño.....

RESUMEN

El siguiente trabajo se enfoca en el estudio de la tecnología de celdas solares de TiO_2 nanoestructurado sensibilizado con tintura. Este novedoso descubrimiento se basa en que la capa semiconductor (TiO₂) está fabricada con partículas de dimensión nanométricas, logrando con esto un mejor contacto entre si, permitiendo el transporte de electrones y estando a la vez como estructura nanoporosa conectada eléctricamente con el sustrato conductor. Esto también posibilita que la molécula sensibilizadora (tintura) se adhiera de mejor manera a la superficie del TiO₂, esta molécula es la que genera en definitiva el electrón que será conducido por la estructura de TiO₂ hacia la capa conductora. La inclusión de una solución de electrolitos, que es la que regenera los electrones perdidos por la molécula sensibilizadora, también se ve favorecida con una mejor eficiencia de contacto en la estructura.

El trabajo entonces se desarrolla con los fines de estudiar las características principales de esta tecnología y poder mostrarlas de la mejor manera posible. Para ello también se realiza la fabricación de celdas solares basadas en esta tecnología con el fin de demostrar el principio de su funcionamiento, utilizando como sustancia sensibilizadora una solución de antocianinas.

Los capítulos van dirigidos de tal forma de ir tocando temas como la problemática ambiental producida por el uso de combustibles fósiles y la dependencia energética hacia estos combustibles, justificando la necesidad de potenciar el uso de energías renovables. Se pasa a los siguientes capítulos que servirán de introducción al aprovechamiento de la energía fotovoltaica llegando en definitiva al estudio en cuestión y su desarrollo.

ABSTRACT

The following paper focuses on the new nanostructured dye sensitized solar cell technology. This new development based on the semiconductor layer (TiO_2), formed by nanometric particles that provide a better physical contact and so a good electron conductance. This also provides a better adherence between the dye and the TiO_2 surface. This is the molecule generating the electron to be conducted through the TiO_2 to the conductive layer. An added electrolyte solution replaces the lost electrons and improves the contact between layers. In conclusion, this paper studies this technology's main characteristics and tries to describe them clearly. Also for this purpose a solar cell based in this technology is designed and manufactured, as a demonstration of its working principles and advantages; using antocianines as a sensitizer substance. The paper's first chapters address subjects such as the fossil fuels usage and dependence, and their environmental consequences, justifying the urgent need to implement the renewable energies usage. The last paper's chapters refer to the photovoltaic energy, the specific dye-sensitized solar cell technology, and their advantages.

Introducción y alcances

El problema del abastecimiento de energía para las distintas actividades de consumo de esta sociedad moderna, nos ha hecho llegar actualmente a un serio problema energético a nivel mundial. La dependencia que ha existido desde que se comenzaron a utilizar este tipo de energías **no renovables** está teniendo efectos negativos en nuestra sociedad. Los combustibles fósiles tales como el carbón, el petróleo y el gas, además de ir en disminución por su rápido consumo provocan serios problemas al medio ambiente; el calentamiento global, cambio climático, ciudades atestadas de humo y “guerras por combustible” son algunos de los problemas que trae consigo este abuso.

Las energías renovables son alternativas energéticas que pueden de algún modo dar solución a este problema. Las hay variadas, como por ejemplo la eólica obtenida a partir de la fuerza de los vientos, la mareomotriz que resulta de la fuerza de las olas, geotérmica que utiliza el calor contenido en la tierra y que sale hacia el exterior, y la energía solar que utiliza la radiación proveniente del sol, entre otras.

La energía solar intenta aprovechar el potencial calorífico que nos entrega el sol en forma constante y que llega a la tierra en forma de radiación solar. La energía solar ofrece varias ventajas frente a otras energías convencionales, dado su carácter gratuito y al ser una fuente energética inagotable. Este tipo de energía puede utilizarse por conversión de la misma en calor, transformándola directamente en energía eléctrica por la utilización de paneles fotovoltaicos o para la obtención y almacenamiento de esta en energía química, tal como el hidrógeno.

El uso de tecnologías asociadas a los procesos fotovoltaicos, que básicamente consisten en la capacidad que tienen algunos semiconductores de producir directamente electricidad a partir de la radiación solar, ha ido de a poco ganando su

espacio en la utilización como fuente de energía para distintas actividades, pero principalmente en áreas donde su utilización es factible debido al aislamiento o lejanía de estos lugares de las redes tradicionales de energía y cuando resulta más económica su utilización. Actualmente los países desarrollados realizan grandes inversiones para potenciar tecnologías de energías nuevas para los procesos productivos que sostienen sus economías, enfrentando de manera innovadora y atenta lo que pueda venir en el futuro.

La fotoquímica, que estudia las transformaciones químicas provocadas o catalizadas por la absorción de luz, de hecho también puede contribuir con el desarrollo de energías amigables con el medio ambiente. Varias investigaciones han avanzado en esta área logrando un aumento significativo de la utilización de estas alternativas principalmente en países desarrollados. En este sentido un grupo de investigadores de la EPFL (Escuela Politécnica Federal de Laussane) en Suiza, encabezados por el Prof. Michael Graetzel han dado importantes anuncios y se preparan para salir al mercado con esta nueva tecnología denominada **DSSC** (dye solar sensitized cells) o celdas de Graetzel en honor a su descubridor. Esta tecnología esta basada en sistemas que bien se puede decir que imitan la fotosíntesis natural en la conversión de energía. Las reacciones de transferencia de electrones juegan un papel importantísimo en la separación de cargas inducidas por la luz que es la forma básica de estos procesos. ^[1]

Se mostrarán los aspectos más importantes de esta tecnología en vías de desarrollo y que significa un avance significativo (según los autores y algunas organizaciones dedicadas al tema) después del descubrimiento y la utilización del silicio en esta área. Además se desarrollará una actividad práctica que demuestre los conocimientos adquiridos y el principio de funcionamiento de estas celdas.

Capítulo I.- La luz del sol, energía a disposición

1.1. Breve introducción

El sol es una inmensa masa de gases que desde millones de años ha provisto de energía al planeta en las distintas fases de su desarrollo, manifestándose principalmente en luz y calor, generando la energía necesaria que desencadena ciclos biogeoquímicos que han servido de sustento para la vida como se conoce hoy en día. La energía solar ha sido utilizada a través de los años por el hombre como fuente de energía en el secado (frutas, verduras, ropas), para calentar agua, calefacción de viviendas e invernaderos y para producción de electricidad en base a celdas fotovoltaicas.

El blanco de las nieves, el azul de los cielos, el verde de los bosques y el ocre de los desiertos mezclado a tantos otros matices son algunas de las bellezas que nos entrega la naturaleza producto las propiedades que caracterizan la luz solar. De dónde provienen y tantas otras preguntas son las que podemos obtener del conocimiento de las propiedades de la luz.

Hasta el tiempo de Isaac Newton, la mayoría de los científicos pensaba que la luz consistía en corrientes de partículas conocidas como Corpúsculos, emitidas por una fuente de luz. Hacia 1665, se empezaron a descubrir pruebas de las propiedades ondulatorias de la luz. [2]

En 1873, James Clerk Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación. Este desarrollo junto con el trabajo de Heinrich Hertz iniciado en 1887, demostró que la luz es en efecto una onda electromagnética.

[2]

Sin embargo, la naturaleza ondulatoria de la luz no es todo. Varios efectos asociados

con la emisión y la absorción de luz revelan que esta tiene un aspecto corpuscular, según el cual la energía transportada por las ondas luminosas está “empaquetada” en paquetes discretos conocidos como fotones o cuantos de luz. Estas propiedades ondulatorias y corpusculares aparentemente contradictorias han sido reconciliadas desde 1930 con el desarrollo de la electrodinámica cuántica, una teoría que incluye a las propiedades, ondulatorias y corpusculares. ^[2]

“La energía no se crea ni se destruye”, solo se puede transformar de un tipo a otro. La energía eléctrica por ejemplo que llega a nuestras casas, la transformamos en energía calórica por medio de discos de la cocina, a energía lumínica en las bombillas, etc.

Hablamos de transformación de energía de un estado a otro. La energía solar es materia prima que es utilizada para generar distintos tipos de energía. El hombre en la búsqueda de energías para su desarrollo, podría imitar procesos más eficientes y limpios. La naturaleza nos ha demostrado que la utilización o transformación de la energía solar para los fines que se estimen convenientes es viable, pero el ser humano no ha sido capaz de optimizar estos procesos para su beneficio.

1.2. Fotosíntesis.

1.2.1. Teoría de evolución de los primeros organismos fotosintéticos que generaron las condiciones aptas para la vida. ^[3]

Hace millones de años, cuando la vida comenzaba a dar sus primeras batallas por desarrollarse, la tierra era muy diferente de los que es hoy en día. Se cree que los primeros organismos simples fueron fotosintéticos, pigmentados; verdaderas fabricas químicas unicelulares. Estos organismos primitivos usaban Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), compuestos orgánicos y radiación solar para producir materiales ricos en energía, azúcares, carbohidratos y materiales de estructura para si mismos. Para

convertir estos materiales químicos útiles para la vida, estos organismos usaban pigmentos ricos en clorofila. Los electrones removidos desde un donador de electrones tal como el H_2S , se realizaba por acción de luz en la clorofila, reduciendo la gran cantidad de CO_2 presente en la atmósfera de la tierra. La producción de carbohidratos fue usada por organismos como almacén de energía y alimento.

Las actividades volcánicas y hundimientos geológicos de aquellos tiempos provocaron que el H_2S y otros componentes donadores de electrones se vieran limitados. Los procesos de la vida necesitan electrones donadores y la solución a este cambio fue notable; con la ayuda de enzimas junto a la clorofila, las algas verde-azules (conocidas también como cianobacterias), fueron capaces de tomar electrones desde las abundantes moléculas de agua usando la radiación y produciendo oxígeno libre. Los océanos de agua aseguraron que la vida no tuviera necesidades en la búsqueda de electrones donadores para la fotosíntesis.

Después de haber pasado un largo período de tiempo, la fotosíntesis realizada por colonias de algas verdeazules produjo altas concentraciones de oxígeno que se fueron acumulando en la primitiva atmósfera de la Tierra. Algunas bacterias primitivas fueron forzadas a escapar a zonas que tuviesen bajas concentraciones de oxígeno que degradaban su estructura celular.

Otros organismos fotosintetizadores fueron forzados a envolver complejos mecanismos para tolerar la toxicidad del oxígeno en exceso. Algunas bacterias encontraron que podían tomar el oxígeno para ser usado como un lento quemador de compuestos orgánicos disminuyendo el enriquecimiento de oxígeno en el medio ambiente. Estos simples organismos usaron la respiración generando las primeras condiciones favorables para el desarrollo de otras formas de vida. Nuevos ciclos envolvieron a plantas, animales y oxígeno. La radiación proveía la energía que las plantas usaban para los enlaces de complejas moléculas orgánicas. Las moléculas

orgánicas ricas en carbohidratos fueron rotas y oxidadas por plantas y animales, la energía solar almacenada fue liberada y el dióxido de carbono originalmente tomado de la atmósfera fue devuelto. Hoy, estos ciclos reversibles y renovables conducen los procesos de la vida en la Tierra. Como resultado, se generaron cadenas alimenticias y el desarrollo de ciclos biogeoquímicos, en el cual elementos tales como el carbono, oxígeno, fósforo y nitrógeno fueron intercambiados entre la biosfera, atmósfera y la corteza terrestre.

La iluminación de la tierra ha continuado y ciertamente la fotosíntesis también, algunos de los compuestos orgánicos producidos por plantas, no fueron reciclados por animales y plantas. Por millones de años, estos elementos orgánicos se han ido acumulando y convertido en carbón, petróleo y gas natural producto del calor y la presión de la tierra. Esta pérdida de materiales orgánicos como por Ej. Carbohidratos y CO_2 , resultó afortunada, porque hubo un descenso en la cantidad de CO_2 en la atmósfera, que incremento la salida de energía libre y en consecuencia generó una mayor producción de vida.

Como la fotosíntesis también atrapa el CO_2 desde la atmósfera, existió un descenso del efecto invernadero natural sobre la tierra producto de la mayor cantidad de vida vegetal en el planeta.

En el efecto invernadero natural, los gases como el dióxido de carbono, metano y vapor de agua, atrapan el calor irradiado de la tierra proveniente del Sol (Figura 1). Estos gases están presentes en la atmósfera en cantidades que dependen de los balances relacionados con la vida. Desde los comienzos, la vida ha alterado el clima de la Tierra por el control de gases que ha ido generando. Estos gases han sido parcialmente controlados por procesos químicos, influenciados por la respiración y fotosíntesis. La acción de fotosintetizadores también provocó el exceso de oxígeno necesario para la vida animal. Tomando toda esta información, se podría decir que

la vida ha ayudado a mantener condiciones y temperaturas para que los ciclos de la misma se hayan ido desarrollando como se conocen hasta hoy en día y que estos continúen existiendo. Sin embargo, un potencial problema de una forma particular de vida, ha alterado recientemente estos ciclos en un nuevo y profundo camino.

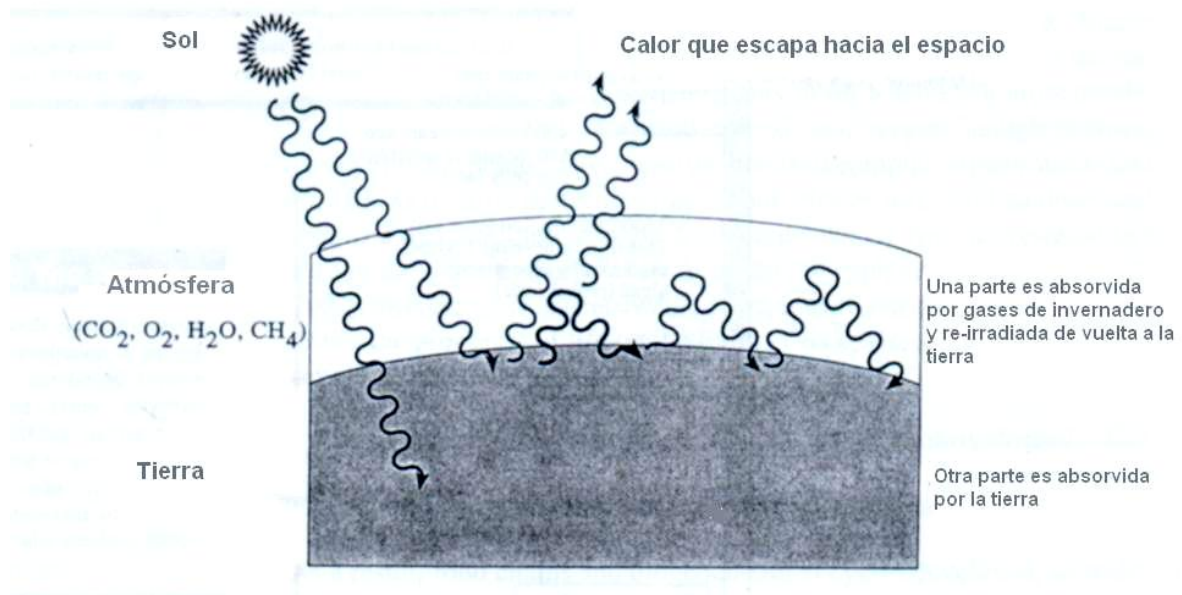


Figura 1. El efecto invernadero. Los gases atmosféricos atrapan el calor que es irradiado por la tierra. El balance entre la entrada de energía solar y la salida de luz infrarroja determina la temperatura de la Tierra

Capítulo II. Problemática ambiental y Contexto actual de la energía.

2.1. Impacto humano

A través del tiempo las plantas y animales han ido evolucionando de distintas maneras y aprovechando las condiciones que les ofrece el medioambiente para su mejor desarrollo y aportando a los ciclos de la vida. El hombre desde su aparición también ha ido evolucionando y conviviendo con distintas especies, pero diferenciándose de ellas por poseer grados de inteligencia que lo han llevado a desarrollar actividades distintas a los otros seres vivos. La tecnología ha ido avanzando en el tiempo, y los alimentos y materiales producidos por las plantas han sido depredados. La energía solar almacenada por millones de años atrás en océanos, bosques, pantanos, etc., se presentó como una buena forma de energía para la sociedad moderna, pero que ha mostrado velocidades de consumo que han ido incrementándose con el pasar de los años. Las reservas de combustibles fósiles consumidas en la actualidad son recursos **no renovables**, que son recursos que están limitados en su formación y que consumidos van agotando su existencia, ejemplos de ellos son el petróleo, carbón y el gas natural. Se estima que en unos cientos de años más los suplementos de combustibles fósiles no estarán disponibles como lo están hoy en día, por las velocidades de consumo de las distintas naciones para el desarrollo de sus economías principalmente en lo que se ha denominado la economía global. Como la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha ido incrementando producto de la quema de combustibles fósiles principalmente y quema de bosques entre otros, el planeta ha ido retornando ha concentraciones elevadísimas de CO₂ (ver gráfico 1). Se ha predicho que en los próximos 50 a 100 años, el calentamiento de la Tierra vía efecto invernadero artificial, podría potencialmente elevar los niveles del mar por el derretimiento de nieves y glaciares, cambio climático global, fallas en la agricultura y la caída de economías que

encuentren dificultad para predecir estos cambios.^[4] Los problemas locales de altos niveles de polución y lluvia ácida entre otros, están directamente relacionados con la quema de combustibles.

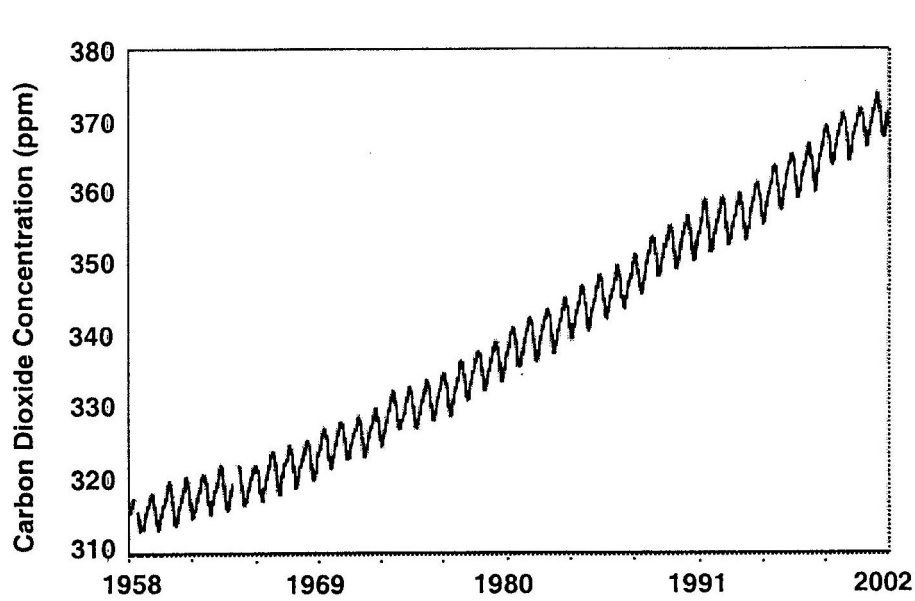


Gráfico 2.1. Concentración de CO₂ atmosférico medido en la estación científica de Mauna Loa, Hawai, desde 1958 hasta el año 2002.

2.1.1. Respuestas al cambio climático con miras a un compromiso real

El tema del cambio climático es discutido abiertamente en la actualidad y se ha descrito como uno de los problemas ambientales más preocupantes a abordar, encontrando en este sentido tendencias de apoyo y rechazo a la posición que señala que las actividades antrópicas son las causantes del calentamiento del planeta y que esto podría traernos serios problemas ambientales, económicos y sociales a futuro sino se toman las medidas necesarias al respecto para mitigar el impacto de este cambio.^[4]

La comunidad internacional respondiendo a estudios científicos ha hecho ver que

este es un tema delicado y que las naciones deben abordar con seriedad; es así, como en diciembre de 1997 después de varias reuniones y preacuerdos se firma el protocolo de Kyoto, en donde los países se comprometen a disminuir los gases de efecto invernadero (anexo a), causantes de dicho calentamiento, destaca por la cantidad emitida a la atmósfera el dióxido de carbono (CO₂), el cual alcanza el 85% del total de gases de efecto invernadero^[4]. El protocolo firmado y considerado a ratificar antes de su entrada en vigencia ha causado polémica, ya que después de ser apoyado firmemente por los países industrializados, causantes en su gran mayoría de las emisiones de estos gases, se vio debilitado producto del fuerte rechazo de Estados Unidos, causante a su vez del 36% del total de los gases a nivel mundial (dato medido del año 1990 como año base para este acuerdo), el cual señala que esto no puede ser llevado a cabo ya que compromete su gran economía, ciertamente sustentada en las grandes industrias de este País. Varios países han considerado no ratificar el acuerdo o simplemente salirse de aquel, por no encontrar sentido sino está Estados Unidos, uno de los que provoca mayores emisiones de estos gases contaminantes. Sin embargo, a pesar de este declive en el acuerdo las naciones han querido seguir adelante y cuentan con el porcentaje para aprobar y comenzar su funcionamiento. El acuerdo sin embargo no contempla a todos los países por igual, obviamente porque no todos contaminan al mismo nivel; comparando el 36% de gases que emite el país de Norteamérica, el cual representa el 4% de la población mundial, con África que hoy en día tiene 3 veces la población de este país, este continente solo aporta con una sexta parte de las emisiones provocadas por Estados Unidos. Por esto y otras razones el protocolo dividió a los países en dos grupos, el primero integrado por países industrializados y aquellos con economías en transición como Rusia y el Este de Europa, a este grupo se le da el nombre de anexo1, los cuales han concordado en reducir sus emisiones por lo menos en un 5% respecto del año base (1990) y en el período 2008 y 2012. ^[5]

El grupo 2 está creado por las economías del mundo en desarrollo, la cuales también firman el acuerdo, sin estar obligados a disminuir el 5% que se les exige al grupo 1, pero son elegibles por estos para apoyo financiero, mientras que voluntariamente reduzcan sus emisiones, para ello se crea un mecanismo llamado MDL, o mecanismo de desarrollo limpio (con sus siglas en inglés CDM), el cual se basa en la flexibilidad que se da a los países industrializados para realizar la disminución de las emisiones a través del Crédito de reducción de emisiones, comprando cuotas (medidas en toneladas) de CO₂, que ayuden a cumplir las metas de disminución fijadas en el acuerdo y que puedan presentar un costo mayor en sus país, visto esto como una estrategia, ya que el aporte financiero a cambio de cuotas de CO₂ son consideradas como parte de la reducción de gases de efecto invernadero que se hace al planeta, siempre que su inversión ayude al desarrollo sostenible del país en cuestión; se consideran proyectos a gran o pequeña escala de reducción de gases, como por ejemplo, optimización de plantas de producción que readuzcan en gran numero la cantidad emitida de gases, utilización de energías limpias como las alternativas, uso eficiente de energías, entre otros. Así, este acuerdo pretende poner en marcha en el año 2008, una mecánica que venga a disminuir los gases de efecto invernadero, producto de la quema de combustibles y responsables del calentamiento del planeta, cabe también señalar que el suministro de reservas de petróleo no esta asegurada y menos con la actual velocidad de consumo de este, también está la fragilidad del suministro ante posibles guerras y los altos costes que se han ido incrementando producto de la gran demanda.

2.3. Dependencia energética

Chile es un país extenso con diversos climas que caracterizan su territorio con una población que supera los 15.000.000 de habitantes en cual se encuentra alojado en su extensión una población de personas que habita zonas urbanas en un 86.6% mientras que en zonas rurales lo hace un 13,4% de la población total (según datos

Censo 2002), y que muestra un aumento sustantivo del porcentaje urbano en desmedro del rural (16,5% de habitantes en zonas rurales en 1992). En las zonas urbanas se vive un mayor desarrollo en distintas áreas y tienen acceso a electricidad la mayor parte de la población que allí habita en contraste con las zonas rurales donde todavía queda una gran cantidad de viviendas por electrificar.

La economía chilena ha experimentado un gran crecimiento en estos últimos años, viéndose esto reflejado en la tasa de aumento del producto interno bruto. Por otro lado, el consumo de energía del país ha crecido a tasas similares e incluso superiores en áreas como el sector eléctrico (gráfico 2).

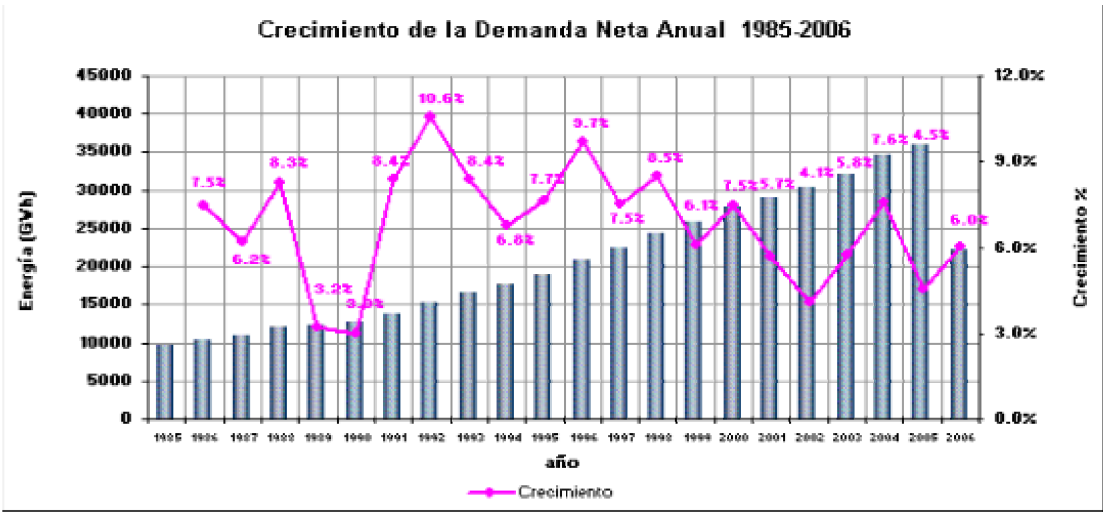


Gráfico 2.2. Crecimiento de la demanda de energía, los valores del año 2006 al final del gráfico fueron tomados a mediados de año faltando la suma de los valores restantes. (Fuente: CDEC-SIC)

No es difícil darse cuenta que la demanda de energía eléctrica ha ido aumentando, esto debido a factores como el crecimiento demográfico y económico, entre otros. Por ejemplo la industria minera (principalmente del cobre), que presenta uno de los sectores de mayor consumo energético por lo previsto seguirá expandiéndose trayendo consigo además, la emisión de mayores cantidades de gases de efectos

contaminantes e invernadero.

Tabla 2.1. Consumo Total de energías eléctrica por cada 1000 habitantes, según región 2001-2004

REGION	MW/h por cada 1.000 habitantes			
	2001	2002	R/ 2003	2004
NIVEL NACIONAL	2.693	2.780	2.909	3.093
01 De Tarapacá	4.857	4.950	4.956	5.113
02 De Antofagasta	16.349	17.265	19.009	20.925
03 De Atacama	8.898	8.946	8.995	9.317
04 De Coquimbo	2.181	2.429	2.558	2.574
05 De Valparaíso	2.309	R/ 2.247	2.312	2.607
06 Del Libertador General Bernardo O' Higgins	3.626	R/ 3.997	4.135	4.712
07 Del Maule	1.295	1.354	1.445	1.581
08 Del Biobío	2.910	2.970	3.002	2.990
09 De la Araucanía	1.109	1.122	1.168	1.238
10 De Los Lagos	1.277	R/ 1.335	1.312	1.419
11 Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo	1.118	R/ 1.335	1.332	1.364
12 De Magallanes y de la Antártica Chilena	2.237	2.187	2.305	2.291
13 Metropolitana de Santiago	1.898	1.937	2.032	2.131

Fuente: INE (Instituto Nacional de Energía), (R/ Los cálculos anteriores para el año 2003, fueron efectuados sobre la base de cifras provisionales de energía eléctrica).

El país posee una demanda hacia las llamadas energías primarias, principalmente petróleo, gas natural y carbón (Tabla 2.2). Para cubrir sus necesidades, entonces debe producir la cantidad que requieren las distintas actividades

Tabla 2.2. Consumo de energía primaria, según producto, 1999-2003.

PRODUCTO	Consumo de Energía (tercalorías)				
	1999	2000	2001	2002	2003
Total de energía primaria	242.371	256.730	260.272	262.401	270.939
Petróleo crudo	104.781	105.288	105.573	104.977	111.873
Gas natural	43.543	60.310	68.359	68.940	74.582
Carbón	41.574	32.127	25.206	25.406	24.291
Hidroelectricidad	11.677	16.410	18.645	19.941	19.439
Leña y otros	40.726	42.544	42.462	43.137	40.754
Biogás	70	51	27	-	-

Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE).

Sin embargo, la producción de energías primarias (Tabla 2.3), consumidas principalmente para el funcionamiento de industrias, no alcanza a cubrir la demanda que estas y el país necesitan debiendo importar una gran cantidad de estas.

Tabla 2.3. Producción de Energía Primaria según productos, 1999-2003

PRODUCTO	Producción de Energía (tercalorías)				
	1999	2000	2001	2002	2003
Total de energía primaria	69.602	88.171	94.111	94.095	88.392
Petróleo crudo	2.633	2.970	2.817	2.343	1.909
Gas natural	10.685	22.755	24.121	23.716	20.325
Carbón	3.398	2.562	4.034	3.034	4.034
Hidroelectricidad	12.090	17.289	20.650	21.865	21.370
Leña y otros	40.726	42.544	42.462	43.137	40.754
Biogás	70	51	27	-	-

Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE).

La importación de energías primarias (Figura 2.4), genera una dependencia del país por estas energías y hace notar la necesidad de buscar formas que den grados de autonomía energética que sin lugar a dudas son importantes para desarrollar las distintas actividades que demanda la sociedad, pero con miras a un desarrollo sostenible tanto a nivel local como global.

Tabla 2.4. Importación de Energía primaria, según productos, 1999-2003.

PRODUCTO	Importación de Energía (teracalorías)				
	1999	2000	2001	2002	2003
Total de energía primaria	170.831	176.699	173.819	173.733	185.962
Petróleo crudo	100.111	105.054	105.156	104.067	108.694
Gas natural	35.421	40.832	48.825	48.928	56.936
Carbon	35.299	30.813	19.838	20.738	20.332
Hidroelectricidad	-	-	-	-	-
Leña y otros	-	-	-	-	-
Biogás	-	-	-	-	-

Fuente: Comisión Nacional de Energía (CNE).

2.4. Preocupación y desarrollo de energías renovables

El problema energético y el de la contaminación son problemas que afectan a todo el planeta y donde uno está ligado al otro, cada país ha estado tomando medidas al respecto, bien por acuerdos internacionales o por estrategias y políticas de acorde a la realidad que se vive actualmente. A nivel internacional los factores que han determinado una evolución positiva, han sido el crecimiento económico, la reducción de costes de los sistemas y la preocupación por el medio ambiente por parte de la sociedad. Así los países han ido teniendo una progresiva preocupación por los temas medioambientales en distintos ámbitos promoviendo prácticas ambientales sustentables de acorde a los tiempos. En ese camino también se encuentra el uso de

la energía renovable, destacando la promoción y el uso de la energía solar como una energía limpia que nos entrega la naturaleza y que hasta ahora no hemos podido utilizarla de manera masiva, tanto por factores técnicos-económicos, como por el poco énfasis puesto en el desarrollo de esta tecnología. En esta área de esfuerzos y promociones destacan los países desarrollados como Alemania, Japón, Holanda y España, entre otros, los cuales han llevado a cabo una gran tarea, potenciando los distintos usos que se puede llegar a obtener de la utilización de la energía solar en muchas áreas productivas de gran y pequeña escala.

Ciertamente para estos países el tema energético es de gran importancia y los esfuerzos por desarrollar nuevas fuentes de energías son encaminadas con el fin de que estas puedan finalmente competir con las utilizadas actualmente. Dentro de estas energías se encuentra la que aprovecha la radiación solar conocida como energías fotovoltaica, que aprovecha incidencia de la luz para transformarla en energía eléctrica u otro tipo de energía almacenable, como la química.

Para el avance de esta tecnología, existen en estos países innovadores, factores importantes que determinan el desarrollo actual y futuro de la energía fotovoltaica, como por ejemplo.

Ayudas públicas: las subvenciones que reciban los proyectos, las primas por venta de energía u otro tipo de ayudas económicas ofrecidas por parte de los gobiernos, constituyen un verdadero motor para el desarrollo de esta forma de energía.

Costes de fabricación de las celdas: Es previsible una reducción constante en el tiempo de estos costes por las evidentes economías de escala y el efecto de aprendizaje con el aumento de la producción. Se proyecta que en el año 2020 este tipo de energía ya podría ser competitiva frente a las convencionales, esta proyección se realiza solo en países desarrollados.

Evolución tecnológica: La mejora de los rendimientos de nuevas tecnologías de procesos, actualmente en desarrollo, ha de tener un efecto positivo de forma progresiva.

Situación global medioambiental y energética: La permanencia o agudización de factores desde el punto de vista tanto medioambiental como energéticos, desequilibrios entre la demanda y oferta eléctrica, etc., que están influyendo actualmente en el mundo, van a tener un impacto positivo en la evolución de las renovables.

Conciencia social: La creciente sensibilización social, por las energías renovables, es un factor que ya está teniendo incidencia positiva en el desarrollo de la industria fotovoltaica a nivel internacional. En este sentido cabe destacar el grado de implicación de Greenpeace en innumerables proyectos de promoción.

2.5. Avances en el área local

El Programa Nacional de Electrificación Rural (PER), creado por la Comisión Nacional de Energía a fines de 1994, forma parte de la estrategia de los gobiernos de turno para superar la pobreza, elevar la calidad de vida de los sectores rurales, e integrarlos al proceso de desarrollo económico y social del país.

Sus objetivos específicos apuntan a solucionar las carencias de electricidad y/o a mejorar la calidad del abastecimiento energético de viviendas y centros comunitarios en el medio rural, disminuyendo así los incentivos para la migración de familias campesinas a zonas urbanas, fomentando el desarrollo productivo, y mejorando la calidad de vida y las oportunidades de acceso a la educación y la salud de estas familias.

Cabe destacar el proyecto actual de **“Remoción de Barreras para la**

Electrificación Rural con Energías Renovables” <http://www.renovables-rural.cl/home.html>). En un trabajo conjunto entre el Gobierno de Chile y la Organización de las Naciones Unidas se busca que en los sectores rurales del país se puedan mejorar las condiciones de vida, educación y salud de los habitantes, a través de la electrificación con Energías Renovables. La ejecución de este proyecto también espera reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero producidas en el mundo rural y contribuir así al compromiso internacional de disminuir las causas que están provocando el Cambio Climático y que son consecuencia de nuestro actuar como sociedad humana.

El Gobierno ha financiado algunos proyectos pilotos con energías renovables. Estas experiencias han permitido demostrar los beneficios de la incorporación de estos sistemas en zonas aisladas y la necesidad, en algunos casos, de formar agrupaciones de usuarios que le den sustentabilidad, en el largo plazo, a los proyectos. Pero aún así, debido a la existencia de barreras ha sido muy difícil llevar a cabo estos proyectos. Un punto interesante que vale la pena mencionar que señala la comisión nacional de energía es el de la neutralidad tecnológica y que tiene que ver con los pocos incentivos a los proyectos que pretendan desarrollarse en el área de las energías renovables, estancando así en Chile una tecnología creciente en el mundo y con perspectivas futuras importantes.

A pesar de los esfuerzos desarrollados en el país por incentivar el uso de energías renovables, las cifras continúan arrojando valores negativos en lo que a materia energética y protección del medio ambiente se refiere. Por ello, es necesario una política de acuerdo a las demandas del país y a la disponibilidad de insumos que se necesitan para las distintas áreas, ya no con una mirada ambigua de esto, sino más bien enfrentando con mejores herramientas y oportunidades a las posibilidades desarrolladas que posean un potencial actual o a futuro tomando tanto aspectos económicos, ambientales, sociales, culturales que demanden tanto esfuerzo de los

gobiernos como de la misma sociedad involucrada. Las energías alternativas ofrecen distintas opciones de desarrollo en las cuales cada factor medido debe ser cuidadosamente analizado, en bien de los factores económicos actuales y futuros que tanto importan y no olvidando asegurar que la generaciones venideras tengan el derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación.

Capítulo III. Fundamentos físicos de las celdas solares.

La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos están fabricados a partir de semiconductores, también es el caso de los dispositivos fotovoltaicos, para una mayor comprensión de su funcionamiento es necesario que sepamos el comportamiento de ellos desde un punto de vista físico. Los aspectos teóricos mostrados a continuación tienen el fin de dar un mejor entendimiento en forma básica de la tecnología en dispositivos fotovoltaicos siendo esto de ayuda para introducirnos y comprender de mejor manera aspectos de la tecnología DSSC (Celdas Solares con Tintura Sensibilizadora), mostrados en el capítulo 7.

Debido a la gran utilización del silicio en dispositivos fotovoltaicos y la gran cantidad de documentación en el desarrollo de su estudio, es que usaremos este elemento en varios ejemplos para explicar su funcionamiento. Así pasaremos de la base del conocimiento de algunos fenómenos físicos a su relación con los elementos que componen las celdas fotovoltaicas.

3.1. Semiconductores

Los semiconductores son materiales que ocupan una posición intermedia entre los aislantes y los conductores. Los aislantes tienen la característica de no dejar pasar corriente por lo que en electrónica se utilizan para evitar cortocircuitos o para cubrir cables que conduzcan corrientes, por Ej., el plástico y las cerámicas son elementos aislantes. Los conductores son elementos en donde la corriente eléctrica (o portadores de cargas) tiene la libertad de moverse en su interior. Los semiconductores permiten el paso de corriente a temperatura ambiente. La gran importancia de los semiconductores en la electrónica moderna se deriva en sus propiedades eléctricas, que son muy sensibles a la introducción en el material de átomos diferentes al del semiconductor, denominadas impurezas (dopado). Podemos

definir entonces dos tipos de semiconductores. [2]

3.1.1. Semiconductor intrínseco [2]

Se denomina semiconductor intrínseco a aquel que no contiene átomos extraños al material semiconductor. Acá los electrones de valencia que son los electrones de la capa más externa del átomo están ligados al enlace covalente, que es aquel formado entre dos átomos que comparten dos electrones, cada uno de los electrones es aportado por un átomo diferente, y los electrones de las capas más interiores están ligados al núcleo (Figura 3.1).

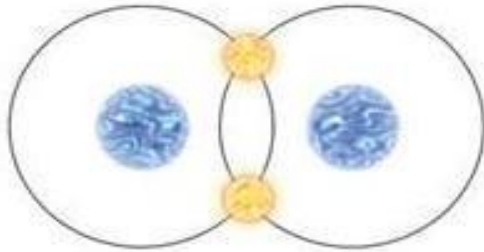
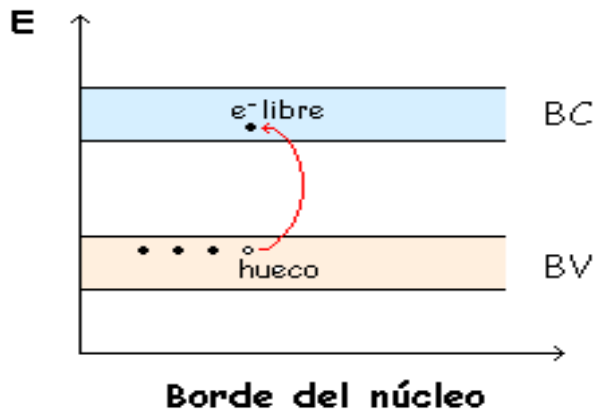


Figura 3.1. Vista del enlace covalente en donde cada electrón pertenece a un átomo diferente.

Un electrón que forma parte de un enlace covalente está fuertemente ligado a él, y para conseguir arrancarlo del enlace y que pueda moverse libremente por el sólido hace falta proporcionar como mínimo una energía E_g . Esta energía E_g se denomina energía de la banda prohibida (en inglés recibe el nombre de *Band-gap* por lo que a veces es llamada energía del *gap*), que puede ser descrita como la fuerza del enlace. Un electrón de valencia puede absorber un cuanto de energía de valor mayor o igual que E_g y liberarse del enlace covalente (rotura de enlace), así este *electrón libre* puede moverse libremente por el cristal dejando tras él un hueco, como vemos en la Figura 3.2.



BC= banda de conducción BV= Banda de valencia

Figura 3.2. Rotura del enlace covalente debido a una energía igual o mayor que E_g que libera al electrón que sería la distancia comprendida entre la banda de conducción y la de valencia.

3.1.2. Banda de energía prohibida

La banda de energía prohibida nace de la teoría de las bandas de energía de los sólidos para explicar de manera gráfica los distintos niveles de energía de los átomos y al mismo tiempo el fenómeno de la conducción eléctrica en los sólidos. Las distintas capas o niveles donde se ubican los electrones corresponden a niveles de energía, en un átomo la última capa que contiene electrones será la capa o banda de valencia y los primeros niveles de excitación de los electrones contenidos en ella están contenidos en la banda de conducción (que se encuentra vacía). Ambas bandas están separadas por un intervalo de energía prohibida (la Band-gap) que corresponde a la energía que debe recibir un electrón de la banda de valencia para pasar a la banda de conducción. En los materiales aislantes, el intervalo es grande, mientras que en los conductores es relativamente estrecho (fin 3.3).

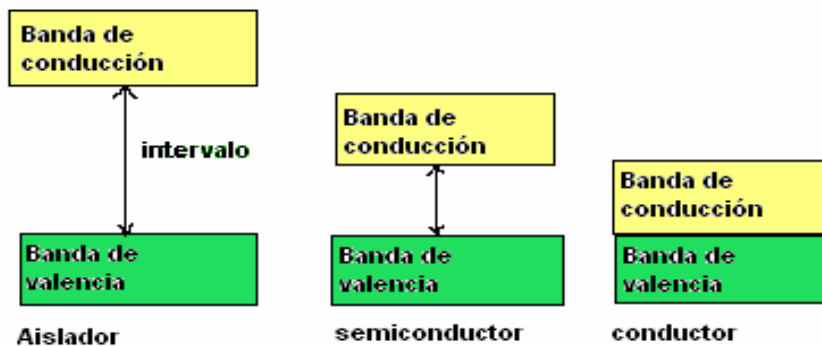


Figura 3.3. Bandas de conducción y valencia separadas por un intervalo de banda prohibida, en aisladores, semiconductores y conductores.

3.1.3. Semiconductor extrínseco ^[6]

Un semiconductor extrínseco es aquel que además de los átomos propios del semiconductor (por Ej. Silicio), contiene impurezas. Las impurezas pueden ser donadoras o aceptadoras dependiendo de la cantidad de electrones que posean en la capa de valencia y esto se realiza para aumentar la conductividad del semiconductor intrínseco. Para el silicio, las impurezas donadoras son átomos pentavalentes (cinco electrones de valencia), y las aceptadoras son átomos trivalentes (tres electrones de valencia). Las impurezas donadoras dan lugar a un semiconductor tipo n debido a que los electrones superan a los huecos, siendo los electrones los “portadores mayoritarios” y los huecos los “portadores minoritarios”, dando origen así, a los semiconductores tipo n; cuando suceda lo contrario se dará origen a uno de tipo p.

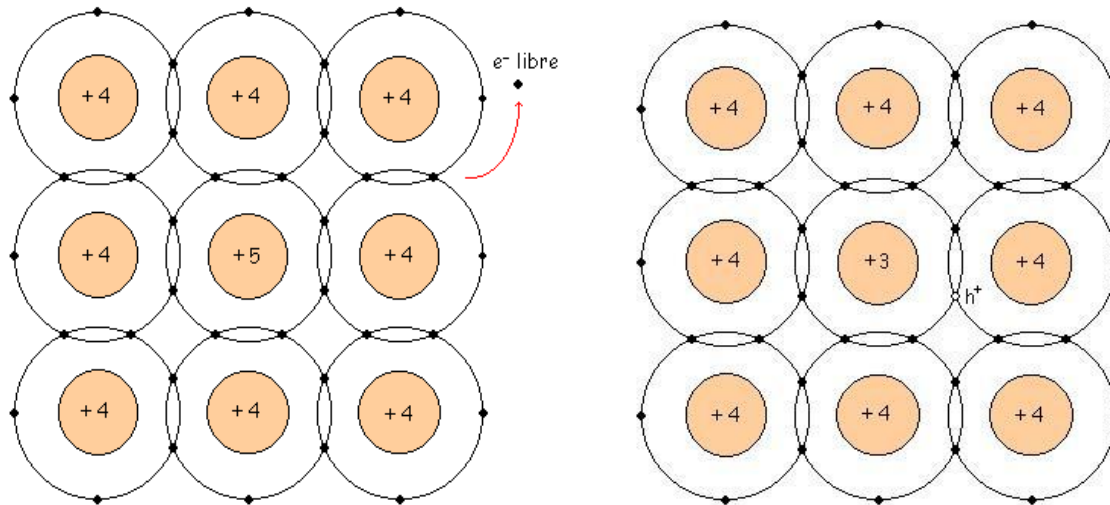


Figura 3.4. Estructura con átomos de cuatro electrones de valencia (por Ej. Silicio) con la incorporación de impurezas (en el centro); a la izquierda con una impureza pentavalente (Semiconductor tipo n) y a la derecha con una trivalente (Semiconductor tipo p), con electrón libre y hueco respectivamente.

a) Semiconductor tipo n

Las impurezas en un semiconductor Extrínseco siempre están en una concentración mucho menor que los átomos propios del semiconductor. Cuando se introduce un átomo de impurezas pentavalente (por ejemplo el Fósforo), este sustituye a un átomo de silicio. El átomo de impurezas dedica cuatro de sus cinco electrones de valencia a construir los cuatro enlaces covalentes que demanda la estructura. Estos cuatro electrones están fuertemente ligados a su posición y se requiere como mínimo la energía E_g para liberarlos. El quinto electrón queda débilmente unido por la fuerza de Coulomb, y se requiere menor energía para desligarlo.

b) Semiconductor tipo P

Si en lugar de impurezas pentavalentes se introducen en el silicio impurezas

trivalentes, se obtiene un semiconductor tipo P. Cuando un átomo de impureza trivalente (por ejemplo Boro) sustituye a un átomo de silicio en el cristal, emplea a sus tres electrones de valencia en formar tres enlaces covalentes para unirse a sus vecinos. Queda sin embargo, el “cuarto enlace” sin completar. Este enlace covalente incompleto, asociado a la impureza trivalente, ejerce una fuerza de atracción sobre los electrones de valencia vecinos. Cuando uno de estos electrones absorbe una pequeña cantidad de energía salta a completar el enlace, y por tanto, ioniza negativamente la impureza (por tener un electrón de más). En este proceso el electrón que ha saltado deja tras de sí un enlace covalente roto, idéntico a los que se producen cuando un electrón de valencia salta a la banda de conducción. Se ha generado entonces un hueco, sin que se haya generado un electrón de conducción ya que el electrón queda fijado en la impureza, esta estructura por lo tanto es rica en huecos o portadores positivos y se le denomina tipo p.

3.1.4. Generación y recombinación de portadores en un semiconductor ^[6]

Los procesos de **generación** de portadores son los que dan lugar a la creación de cargas móviles que circulan por el semiconductor. Para que este tenga lugar se requiere proporcionar al electrón de valencia la energía suficiente para que pueda liberarse venciendo la fuerza que lo mantiene unido.

Existen varios tipos de procesos de generación, según la energía que se proporciona al portador destacando en este caso la generación térmica, en donde la liberación del portador es producida por la absorción térmica; la generación óptica se produce cuando el electrón absorbe un fotón para romper el enlace covalente, el fotón es un cuanto de energía electromagnética y viene dada por la ecuación (3.1).

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Donde h es la constante de Plank, ν la frecuencia de la radiación, λ la longitud de onda y c la velocidad de la luz en el vacío. Los fotones cuya energía sean inferiores a la E_g del semiconductor no serán absorbidos por este, el semiconductor será transparente a esta radiación.

La **recombinación** es el fenómeno contrario a la generación de portadores; es la anulación de un par electrón-hueco mediante la reconstrucción del enlace covalente. Como el electrón libre tiene más energía que el electrón de valencia, en el proceso de recombinación debe desprenderse de la energía en exceso, en el caso de la recombinación térmica la energía en exceso se libera en forma de energía térmica o calor y la recombinación óptica se libera en forma de luz (fotones). Tal es el caso del AsGa (arseniuro de galio) donde la recombinación también se denomina recombinación radiativa, puesto que se irradia energía electromagnética.

3.1.5 Conducción eléctrica en semiconductores

Existen dos mecanismos básicos que provocan el movimiento de los portadores y que por tanto dan lugar a corrientes eléctricas en los semiconductores: el movimiento provocado por un campo eléctrico, que da lugar a la corriente de arrastre, y el originado por diferencias de concentración, que da lugar a la denominada corriente de difusión. Dentro del semiconductor los portadores de corriente están sometidos a un movimiento de agitación térmica. Se trata de un movimiento aleatorio ya que no hay ninguna dirección preferente. Un portador se mueve en una dirección, colisiona con un átomo u otro portador, se frena o cambia de dirección, sufre el impacto de un portador que lo acelera, etc. Esta agitación térmica no da lugar a ninguna corriente puesto que no hay ninguna dirección privilegiada. Sin embargo este movimiento de

agitación térmica, da origen a una corriente, llamada corriente de difusión, que se produce cuando hay diferencias en la concentración de un portador en el volumen del semiconductor. En este caso, ocurre un flujo de portadores en el interior del semiconductor que va en el sentido de tender a igualar la concentración. Como los portadores tienen carga su movimiento origina una corriente.

Cuando se aplica un campo eléctrico al semiconductor se produce una corriente denominada de arrastre. El campo eléctrico ejerce una fuerza sobre el portador que se superpone al movimiento de agitación térmica. Durante el camino libre del portador entre colisiones, su trayectoria se desvía en la dirección que determina el campo eléctrico; los huecos en el sentido del campo, los electrones en el sentido contrario, este es el mecanismo por el cual se obtienen corrientes en los dispositivos fotovoltaicos tradicionales de silicio.

3.2. La unión P-N ^[6]

Al colocar parte del semiconductor tipo p junto a otra parte del semiconductor tipo n, debido a la corriente de difusión los electrones de la zona n, donde hay alta concentración de éstos, tienden a dirigirse a la zona p, que a penas los tiene, sucediendo lo contrario con los huecos que tratan de dirigirse de la zona p, donde hay alta concentración de huecos hacia la zona n. Esto, ocasiona su encuentro y neutralización en la zona de unión. Al encontrarse un electrón con un hueco desaparece el electrón libre, que pasa a ocupar el lugar del hueco, y por lo tanto también desaparece este último, formándose en dicha zona de la unión una estructura estable y neutra.

Como quiera que la zona n era en principio, al colocarla junto a la zona p pierde electrones libres, hace que cada vez se vaya haciendo más positiva, mientras que la zona p, al perder huecos, se hace cada vez más negativa. Así aparece una

diferencia de potencial entre las zonas n y p, separadas por la zona de unión que es neutra. La tensión que aparece entre las zonas, llamada barrera de potencial, se opone a la corriente de difusión, puesto que el potencial positivo que se va creando en la zona n repele a los huecos que se acercan de p, y el potencial negativo de la zona p repele a los electrones de la zona n. Cuando ambas zonas han perdido cierta cantidad de portadores mayoritarios que se han recombinado, la barrera de potencial creada impide la continuación de la difusión y por tanto la igualación de las concentraciones de ambas zonas (Fig. 3.4).

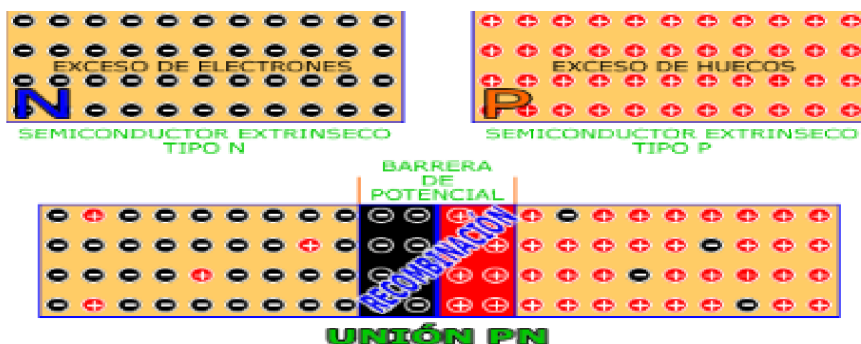


Figura 3.5. Unión PN

3.3. Dispositivos semiconductores

Los dispositivos semiconductores juegan un papel indispensable en la electrónica. En los primeros días de la radio y la televisión, el equipo transmisor y receptor dependía de los tubos de vacío, pero éstos han sido remplazados casi por completo en las últimas tres décadas por dispositivos de estado sólido, que incluye los transistores, diodos, circuitos integrados y otros dispositivos semiconductores.

Una placa delgada de material semiconductor puede servir como fotocelda, de tal manera que cuando el material es irradiado con una onda electromagnética cuyos

fotones tienen por lo menos tanta energía como la banda prohibida entre las bandas de Valencia y conducción, un electrón en la banda de Valencia puede absorber un fotón y saltar a la de conducción (Fig. 6), donde al igual que el hueco dejado atrás contribuye a la conductividad. Por lo tanto, la conductividad aumenta con la energía de la onda.

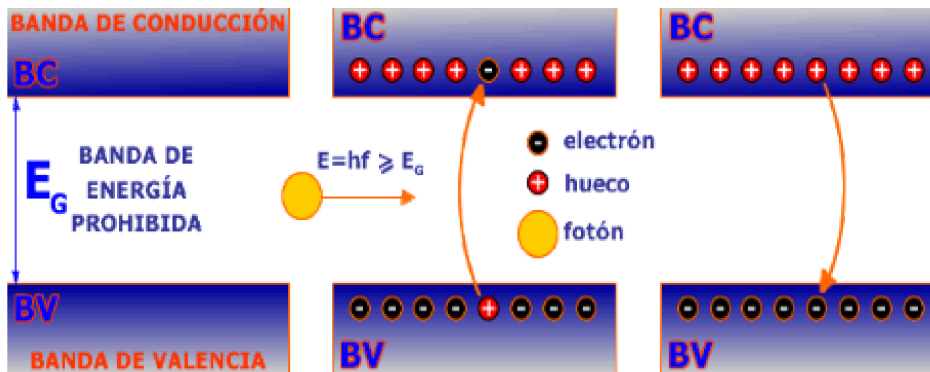


Figura 3.6. El salto de un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción producto de la absorción de una energía igual o superior a la de banda de energía prohibida.

Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica están basadas en el aprovechamiento del **Efecto Fotovoltaico** que tiene mucho que ver con lo explicado anteriormente. De forma muy resumida, el “efecto fotovoltaico” se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre los materiales que definimos como semiconductores. La energía que reciben éstos proveniente de los fotones, provoca un movimiento caótico de electrones en el interior del material.

Al unir dos regiones de un semiconductor al que se había dotado de concentraciones diferentes de electrones, mediante los elementos que denominábamos *impurezas*, se provoca un campo electrostático constante que reconduce el movimiento de electrones. Recordemos que este material formado por la unión de dos zonas de concentraciones diferentes de electrones la denominábamos unión p-n.

De esta forma, cuando sobre la célula solar incide la radiación, aparece en ella una tensión análoga a la que se produce entre las bornes de una pila. Mediante la colocación de contactos metálicos en cada una de las caras puede “extraerse” la energía eléctrica, que se utilizará para alimentar una carga (figura 7).

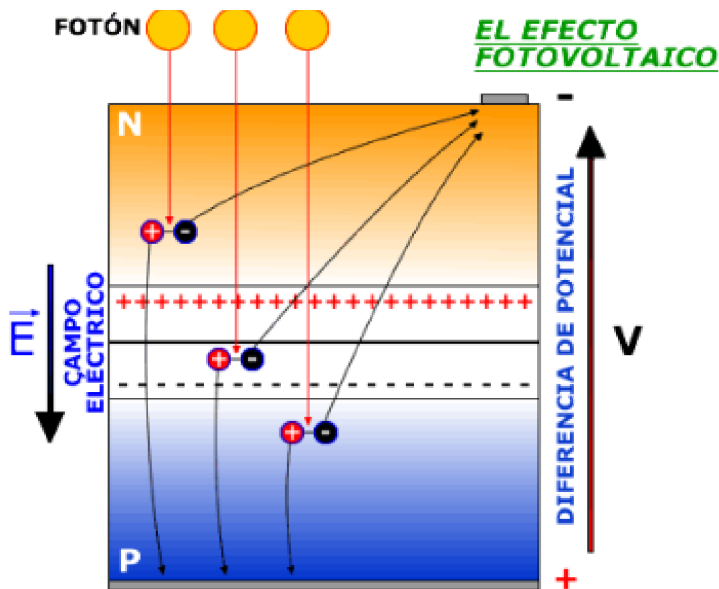


Figura 3.7. Esquema del Efecto fotovoltaico

Para que se produzca el efecto fotovoltaico debe cumplirse que:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (2)$$

Dicho de otra manera, su funcionamiento se basa en la capacidad de transferir la energía de los fotones de la radiación solar a los electrones de valencia de los materiales semiconductores, de manera que estos electrones rompen su enlace que anteriormente los tenía ligado a un átomo. Por cada enlace que se rompe queda un electrón y un hueco (falta de electrón en un enlace roto) para circular dentro del semiconductor. El movimiento de los electrones y huecos en sentidos opuestos

(conseguido por la existencia de un campo eléctrico) genera una corriente eléctrica en el semiconductor la cual puede circular por un circuito externo y liberar la energía cedida por los fotones para crear los pares electrón-hueco.

Capítulo IV. Celdas solares y arreglos fotovoltaicos.

4.1. La Celda Solar.

Una Celda o Célula Solar es un dispositivo fabricado especialmente para convertir la radiación solar directamente en energía eléctrica producto del efecto fotovoltaico. La gran mayoría de las celdas solares comercialmente más comunes son de silicio mono o policristalino. El primer tipo se encuentra más generalizado y aunque su proceso de elaboración es más complicado, suele presentar mejores resultados en cuanto a su eficiencia.

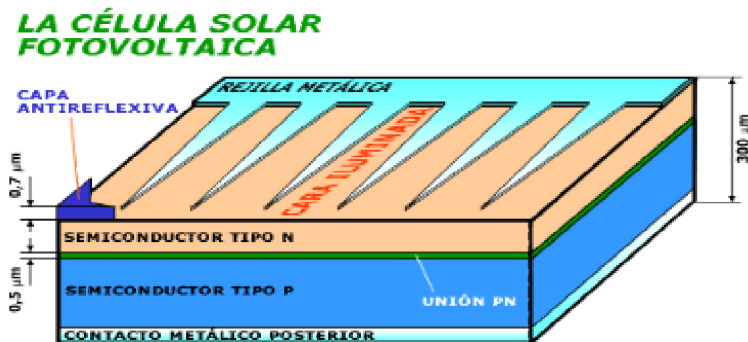


Figura 8. Estructura de una celda solar fotovoltaica

Cuando conectamos una celda solar a una carga y esta se ilumina, se produce una diferencia de potencial entre los extremos de la carga y circula una corriente por ella.

Su funcionamiento básico incluye dos procesos:

La generación de portadores de cargas (electrones y huecos), mediante absorción de radiación (fotones de luz). La generación de una corriente eléctrica a través de un campo eléctrico interno, que se forma mediante la unión p-n. Los fotones serán los que formarán al romper el enlace los pares electrón-hueco y debido al campo eléctrico producido por la unión de materiales en la célula de tipo p y n, estos se

separan antes de poder recombinarse formándose así la corriente eléctrica que circula por la célula y la carga aplicada.

Algunos fotones pueden no ser aprovechados para la creación de energía eléctrica por diferentes razones:

- Los fotones que tienen energía inferior al ancho de banda prohibida del semiconductor, lo atraviesan sin ceder su energía para crear pares electrón-hueco.
- Aunque un fotón tenga una energía mayor o igual al ancho de banda prohibida puede no ser aprovechado ya que una célula no tiene la capacidad de absorberlos a todos.
- Además, los fotones pueden ser reflejados en la superficie de la célula (Figura 4.1)

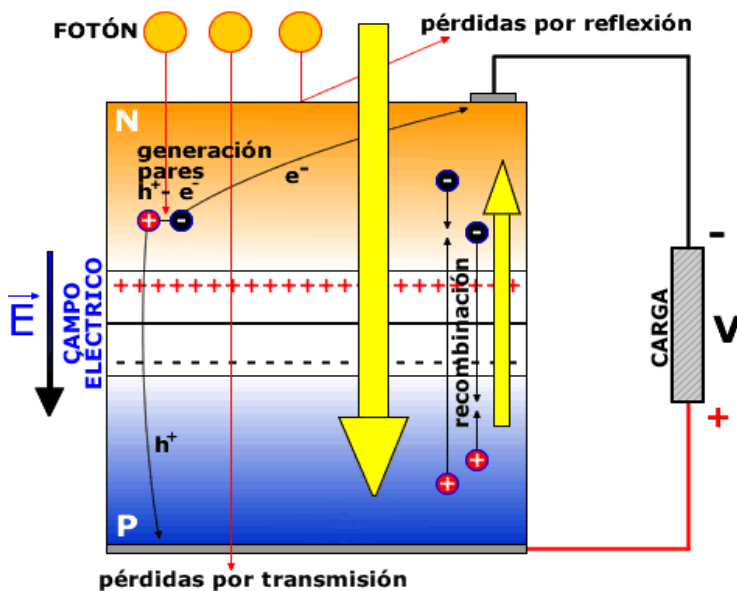


Figura 9. Esquema del Funcionamiento de celdas fotovoltaicas.

4.2. Arreglos fotovoltaicos.

Un módulo FV también llamado panel solar, es un conjunto de celdas interconectadas eléctricamente y protegidas contra la intemperie. Al igual que las celdas, los módulos pueden conectarse en serie-paralelo y se pueden obtener las tensiones y potencias que se necesiten para una aplicación en concreto.

Las células en módulos deben ser del mismo grado eléctrico, es decir, que tengan una potencia similar (y una corriente de cortocircuito análoga), para conseguir que la potencia del módulo sea predecible como la suma de las potencia de las células, todos estos datos técnicos sirven para identificar las características del modulo.

Generalmente, los módulos tienen una cubierta frontal de vidrio templado y un marco de aluminio que facilita su transporte e instalación (Fig. 10). Debido a que no tienen partes móviles, los módulos son muy confiables y duraderos. Algunos fabricantes los garantizan hasta por 25 años contra defectos de fábrica y reducción de rendimiento. Otra característica importante es el mínimo mantenimiento que estos requieren.

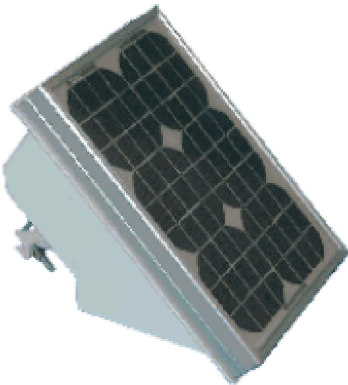


Figura 10. Arreglo fotovoltaico o panel solar.

Capítulo V. Tecnología Fotovoltaica

La Tabla 5.1 muestra un Sumario del estado actual de las diferentes tipos tecnología fotovoltaica, para celdas de pequeño tamaño

Tabla 5.1. Eficiencias confirmada terrestre de celdas bajo espectro global AM 1.5 (1000 W x m⁻²) a 25°C.

Clasificación	η [%]	V_{oc} [V]	I_{sc} [mA x cm ⁻²]	FF	Centro de Testeo (y fecha)	Productores
Silicio						
Si (cristalino)	24.7	0.706	42.2	0.13	Sandia (3/99)	UNSW PERL
Si (policristalino)	19.8	0.654	38.1	0.80	Sandia (2/98)	UNSW/Eurosolare
Celdas III-V						
GaAs (cristalino)	25.1	1.022	28.2	0.87	NREL (3/90)	Kopin
GaAs (policristalino)	18.2	0.994	23.0	0.80	NREL (11/95)	RTI
InP (cristalino)	21.9	0.878	29.3	0.85	NREL (4/90)	Spire
Silicio amorfo/microcristalino						
Si (nanocristalino)	10.1	0.539	24.4	0.77	JQA (12/97)	Kaneka
Celdas Fotoelectroquímicas						
DSSC	11.0	0.795	19.4	0.71	FhG-ISE (12/96)	EPFL
Celdas Multicapa						
GaInP/GaAs	30.3	2.488	14.2	0.86	JQA (4/96)	Japan Energy
GaInP/GaAs/Ge	28.7	2.571	12.95	0.86	NREL (9/99)	Spectrolab

Fuente: Adaptado de Tesis para el grado Doctor en Ciencias, École Polytechnique Federale de Lausanne, “Alternative Redox Systems for the Dye-Sensitized Solar Cell”, Ing. Chimiste diplome, Hervé Nausbaumer, 2004[1]; en donde η es la eficiencia de conversión, V_{oc} el voltaje de circuito abierto, I_{sc} la corriente de corto circuito y FF el factor de forma o llenado.

La energía solar fotovoltaica (FV) consiste en la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica. Se genera electricidad con la simple exposición de una superficie al sol, sin que haya ninguna actividad aparente dentro o alrededor de la superficie o panel.

La tecnología fotovoltaica permite a la sociedad beneficiarse de las características de una energía renovable de generación eléctrica en el mismo punto donde se necesita, integrada en el contexto donde se instala, modular, fácil de diseñar, acopiar y montar.

Las ventajas que comporta su propia naturaleza, la hacen en principio muy atractivo y los prejuicios que rodean esta tecnología se prueban carentes de fundamento. Su elevado coste inicial y el consecuente alto coste del KWh solar, es en estos momentos, la única sólida razón por la que no se usa de forma más extendida.

La tecnología solar fotovoltaica, como todas las nuevas tecnologías introducidas en nuestra sociedad, está recorriendo la curva de experiencia, de tal forma que cada vez que se duplica la producción se está reduciendo el coste en un cierto porcentaje.

En una primera etapa de este desarrollo, la producción industrial se dedicó a las aplicaciones aisladas de la red eléctrica -tanto espaciales como terrestres- en las que era razonable pagar el costo que en cada momento presentaba este tipo de generación, bien por ser aplicaciones económicamente rentables o bien, como en el caso de los satélites espaciales, por ser la única solución.

A continuación daremos una breve descripción de algunas de ellas por su uso destacado.

5.1. Silicio cristalino

Las celdas de silicio cristalino (y su posterior ensamble en paneles de este tipo) son en la actualidad unas de las más utilizadas considerando un uso masivo y rentable. Para la fabricación de estas celdas se realizan varios procesos en donde se debe contar con una tecnología adecuada y de alto costo que lleva a un mejor rendimiento; para ello se realizan dopados, cortes de precisión, baños químicos, la introducción de celdas en hornos de temperaturas entre 800 y 1000 °C, etc.

Después de estos procesos, la célula presenta una superficie que rechaza aproximadamente el 30% de la radiación que llega a su superficie, por ello se crea una capa antirreflectante con un espesor determinado, generalmente mediante evaporación de un compuesto que se deposita sobre la superficie frontal de la oblea.

Para poder recoger las cargas eléctricas que proporcionan las células una vez que incida la luz sobre ella, se insertan contactos eléctricos que recogen las cargas que se liberan. El diseño del dibujo de estos contactos metálicos sobre la superficie de la célula es muy importante, ya que un número mayor de contactos capturará mayor cantidad de electrones, pero la mayor superficie de contactos se obtendrá a costa de exponer menos superficie de silicio al sol con lo que se tiene una menor iluminación sobre la superficie activa. Se debe tener en cuenta que estos contactos no son transparentes, suelen ser aleaciones de diversos metales como la Plata, Titanio, Paladio, Cobre, Aluminio, entre otros.

El último paso de la fabricación es la medida y clasificación de las celdas según su potencia e intensidad de cortocircuito.

5.2. El silicio amorfo

El silicio amorfo, al igual que los demás sólidos amorfos es un material en el que los átomos carecen de uniformidad estructural a lo largo de su red cristalina, lo que impide la formación de enlaces. Sin embargo, si el silicio amorfo se deposita de tal manera que contenga una pequeña cantidad de hidrógeno, los átomos de hidrógeno saturan muchos huecos de la red cristalina, permitiendo así a los electrones moverse a través del silicio.

Una de las propiedades que posee el silicio amorfo es que presenta un alto coeficiente de absorción, lo que permite la utilización de espesores de material activo muy pequeño. Sin embargo, el impedimento más importante para un mayor desarrollo de la tecnología fotovoltaica basada en el silicio amorfo es la degradación inducida por la luz de los dispositivos. Esta degradación produce una disminución de la eficiencia de conversión durante las primeras semanas de exposición a la luz solar, aunque a partir de entonces la eficiencia permanece básicamente estable.

Aunque los dispositivos de silicio amorfo tienen eficiencias más bajas que la de silicio cristalino, tienen la ventaja de utilizar para su fabricación, técnicas de preparación más baratas.

La primera célula de silicio amorfo fabricada en 1976 tuvo una eficiencia del 2,4% en su versión de unión simple p-n; en la actualidad se alcanzan valores del orden del 10%. Aunque la eficiencia de conversión de las células de silicio amorfo es más baja que la de otras células solares, la tecnología fotovoltaica de silicio amorfo es atractiva para aplicaciones terrestres debido a que los módulos se pueden producir con procedimientos de bajo coste y se pueden utilizar sustratos ligeros, flexibles y resistentes a la radiación. Por el contrario, la tecnología de silicio amorfo no resulta útil para la industria espacial, que trata de obtener mayores rendimiento con poca

limitación de coste.

El silicio amorfo es utilizado comúnmente en aparatos que requieren bajos consumos de poder.

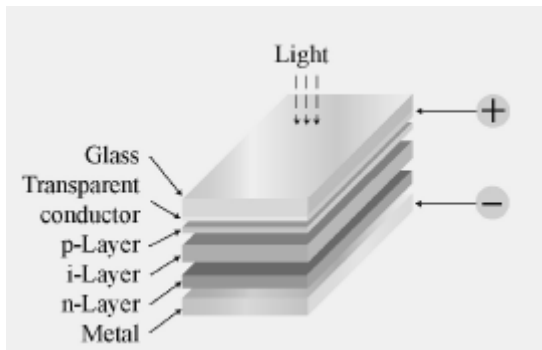


Figura 5.1. Una celda típica de silicio amorfo formada por un diseño p-i-n, en la cual una capa intrínseca esta ubicada entre la capa p y la capa n.

5.3. Celdas de capa delgada

Referente a la tecnología de capa delgada, se puede indicar que ha tenido siempre un papel importante en la búsqueda de soluciones fotovoltaicas de bajo coste. Aunque esta tecnología surgió a la par del silicio cristalino, el desarrollo de ambas no ha alcanzado un estado comparable.

Se considera como tecnología fotovoltaica de capa delgada a todas aquellas celdas y módulos en los que capa activa o absorbente tiene un espesor de unos pocos micrómetros.

El éxito de los módulos de lámina delgada se debe a la flexibilidad de esta tecnología en cuanto a la forma y tamaño de los módulos, así como el número de celdas dentro del módulo, adoptando fácilmente los requisitos técnicos y los aspectos de diseño.

Pero las expectativas en la tecnología de capa delgada en los últimos años se basan sobre todo en los valores de eficiencia de conversión que se están alcanzando y en haberse demostrado su estabilidad a largo plazo.

Las tecnología de capa delgada implica la utilización de materiales tóxicos o escasos (en comparación con la cantidad de silicio presente en nuestro planeta), y aunque puedan presentar buenas características fotovoltaicas su uso se ve limitado por el coste de producción, que por el momento es la causa principal que limita la penetración en el mercado de esta tecnología, al no haber respondido todavía a las expectativas puestas en ella.

5.4. Celdas de III y V generación

Esta tecnología fotovoltaica, basada en los elementos de los grupos 3 y 5 de la tabla periódica, muestra altas conversiones de eficiencia bajo radiación normal o radiación concentrada. Las celdas de este tipo son usualmente de arseniuro de Galio (GaAs). El GaAs puede ser mezclado con elementos tales como indio, Fósforo y Aluminio para crear semiconductores que responden a diferentes energías espectrales.

No es raro encontrar arsénico (altamente tóxico), como en la minería en su extracción de oro, plata y cobre. El galio es subproducto en los procesos de obtención de varios metales, principalmente aluminio y zinc. El arseniuro de galio utilizado en las celdas solares ha sido desarrollado sinérgicamente en los usos de diodos emisores de luz, láser y otros dispositivos optoelectrónicos.

5.5 Celdas multicapa

La idea de las células multicapas radica en poner una capa sobre otra de tal modo que cada capa absorba eficientemente una frecuencia y se deje atravesar por el resto, teniendo entre 10 y 30 capas para poder responder al espectro luminoso. Cada

semiconductor convierte muy eficientemente la luz para una determinada gama de frecuencias específicas que se corresponden con el “gap” o banda de energía del semiconductor, por ejemplo, como se ve en la figura 5.2, las capas de arriba pueden capturar la parte azul, las del medio la verde y las de abajo la roja. El resto de las frecuencias se desaprovecha.

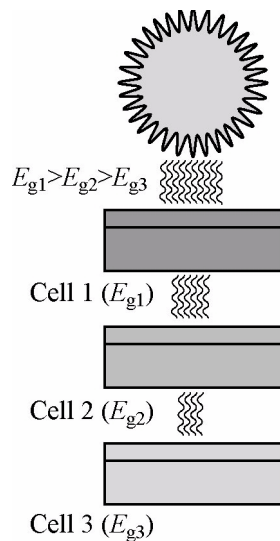


Figura 5.2. Un disco con celdas multicapas mostrando su individual característica relacionada con la absorción de energía en orden descendiente respecto de la banda del gap (E_g). Se puede ver que desde la superficie se van capturando fotones de alta energía, pasando el resto para ser absorbidos por las celdas de menor banda prohibida.

Los últimos reportes de esta tecnología señalan que se han conseguido eficiencias del 40,7% y que nuevamente el obstáculo es la rentabilidad económica, se señala también que este puede ser superado en unos años más (Departamento de Energía de EEUU), logrando así una real factibilidad de uso.

Capítulo VI. Objetivos

6.1. Objetivos del estudio

Hasta ahora se han mostrado diferentes tipos de tecnologías fotovoltaicas y las características principales de su funcionamiento, el uso de estas para la generación de energía, y la necesidad de potenciar su desarrollo con miras a futuro aprovechando los conocimientos acumulados en esta área.

Pendiente además de la utilización de energías tradicionales, la demanda creciente de estas (que condiciona a los países en el fortalecimiento de sus economías) y los impactos medioambientales que produce su utilización, es que se plantean los siguientes objetivos:

- Dar a conocer las principales características de la tecnología de celdas de TiO_2 nanoestructurado con tintura sensibilizadora, como alternativa a la generación fotovoltaica.
- Demostrar a través del procedimiento experimental, los principios de operación de las celdas solares de tecnología DSSC.
- Concretar un avance práctico y proyectable de la tecnología DSSC que sirva de base al estudiante para poder continuar el estudio y el desarrollo de este trabajo.

Capítulo VII.- Tecnología de Celdas Solares nanoestructuradas con Tintura Sensibilizadora (DSSC, Dye sensitized Solar Cells). [1, 3, 10, 11,12]

7.1. Principio Básico

Las celdas solares convencionales convierten la luz a electricidad aprovechando el **efecto fotovoltaico** que existe en las uniones semiconductoras, descritas en el capítulo anterior. Estos discos fotovoltaicos están basados en el concepto de separación de carga en una interfase de dos materiales de diferente mecanismo de conducción, normalmente entre materiales de estado sólido, con electrones y huecos transportados en un material semiconductor, múltiples uniones entre diferentes semiconductores o unión semiconductor-metal.

En contraste, estas celdas trabajan con un principio diferente, donde los procesos de absorción de luz y separación de carga son diferenciados. La absorción de luz es realizada por la tintura absorbida químicamente en la superficie del semiconductor. Después de ser excitada por los fotones de luz, la tintura es capaz de transferir un electrón al semiconductor por un proceso llamado **inyección**. Los electrones en el semiconductor son atrapados y transportados en el electrodo. Este transporte ocurre principalmente por difusión. El estado original de la tintura es secuencialmente restaurado por la donación de electrones desde el electrolito (Regeneración), usualmente un solvente orgánico conteniendo un sistema Redox, tal como la pareja yodo/triyodo. El yodo es regenerado a la vez por la reducción de triyodo en el contraelectrodo o electrodo contrario. Se irá explicando con mejor detalle este principio, por ahora se puede ver en la Figura 7.1 la estructura de las celdas solares de TiO_2 .

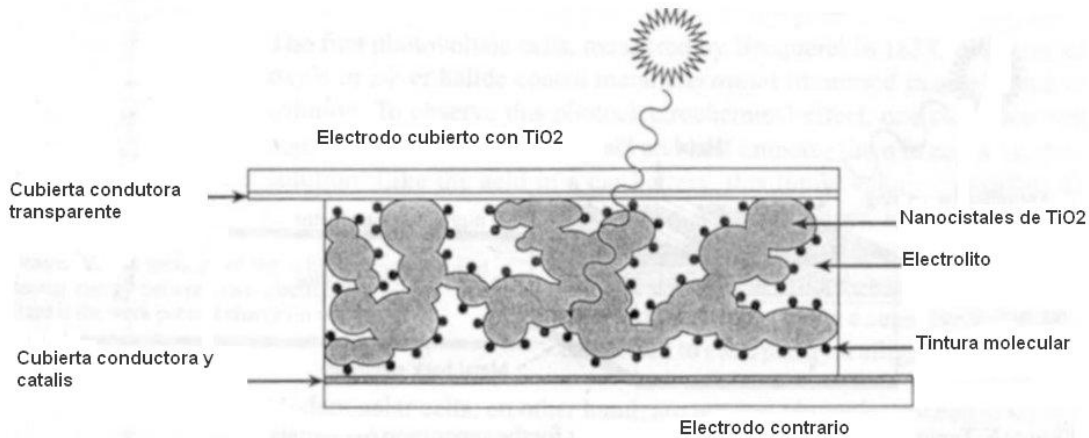


Figura 7.1. Estructura básica de la celda solar de TiO_2 nanoestructurada con tintura sensibilizadora.

7.2. Desarrollo de la tecnología DSSC

Desde 1970, se han desarrollado intentos para crear una mejor celda solar basada en la utilización de tinturas cubriendo cristales de semiconductor de TiO_2 con capas de clorofila; sin embargo estas capas de pigmentos presentaban problemas para moverse entre el semiconductor, así la eficiencia de la primera celda solar sensibilizada por esta vía fue muy baja.

Un avance fundamental en la fotoelectroquímica se produjo en 1972, cuando Fujishima y Honda consiguieron producir pequeñas cantidades de hidrógeno iluminando una celda con luz solar. El elemento primordial de estas celdas es un fotoánodo semiconductor de dióxido de titanio (TiO_2) donde el agua reacciona con los huecos fotogenerados y se oxida a oxígeno, mientras que se reduce a hidrógeno con los electrones que llegan al contraelectrodo. Así se demostró que es posible descomponer el agua usando la potencia solar sin un voltaje auxiliar. Desgraciadamente, por su amplia banda prohibida (3.2 eV) el TiO_2 sólo absorbe la parte ultravioleta de emisión solar y por lo tanto se consigue muy poca eficiencia de conversión.

A pesar de los considerables esfuerzos de investigación que se realizaron para desplazar la respuesta espectral del TiO_2 al visible, o para desarrollar óxidos alternativos que descompongan el agua con luz visible, no se lograron los propósitos deseados. Aquellos semiconductores que tienen un ancho de banda bastante estrecho como para absorber la luz visible eficientemente se descomponen por corrosión de la luz. El ancho de banda prohibida como mencionamos en capítulos anteriores, es una medida de la fuerza del enlace químico. Los semiconductores estables bajo iluminación, como el Titanio, tienen una ancha banda prohibida y en consecuencia, son insensibles al espectro visible.

Durante mucho tiempo, la posibilidad de lograr dispositivos fotovoltaicos competitivos pareció muy remota. En 1991 en la EPFL (Escuela Politécnica Federal de Laussane) en Suiza, Michael Graetzel descubre que la Nanotecnología podía dar solución a estos problemas. En lugar de usar un único cristal semiconductor de TiO_2 trabajó con una esponja de pequeñas partículas, cada una cercana a los 20 nanómetros de diámetro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$), cubierta con una fina capa de pigmentos fotosintéticos o tintura sensibilizadora, que absorbe en el visible. Este método incrementó efectivamente el área superficial viable para la absorción de la luz en un factor de 1000, después de aquello la conversión a corriente eléctrica fue mucho más efectiva. Estas celdas consiguieron superar problemas anteriores gracias a una combinación de factores clave: la separación de las funciones de absorción óptica y la generación de carga.

7.3. Estructura y funcionamiento

En este tipo de estructura el semiconductor está formado por un agregado de partículas de algunos nanómetros de extensión, que efectúan un buen contacto entre si, permitiendo el transporte de electrones, de modo que todas las partes de la matriz porosa se encuentran en conexión eléctrica con el sustrato conductor (Figura 7.2).

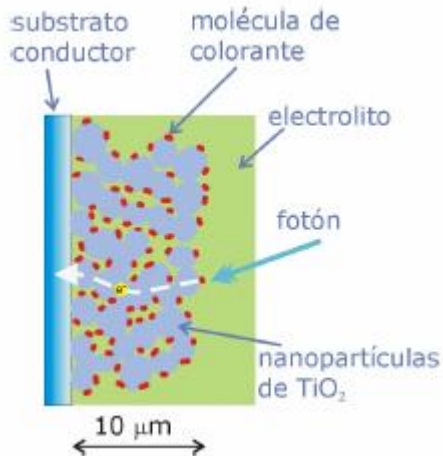


Figura 7.2. Representación esquemática de la matriz semiconductor nanoporosa interpenetrada por el electrolito, el colorante sensibilizador absorbido en la superficie de los nanocristales de TiO_2 , y la trayectoria de un electrón fotoinyectado hacia el sustrato colector.

La tintura sensibilizadora que cumple un papel importantísimo, se adhiere a la superficie del TiO_2 y los poros de la matriz se llenan con un medio conductor de huecos, como un electrolito o un polímero conductor. El resultado consiste en dos matrices que se interpenetran y ofrecen una enorme área interna para la fotogeneración de cargas (Figura 7.3).

Cuando ocurre la fotoexcitación del colorante, este inyecta un electrón a la banda de conducción del TiO_2 y posteriormente el colorante oxidado se regenera por transferencia electrónica desde iones I^- en la solución. Los iones I_3^- formados en este proceso difunden al electrodo recubierto de platino, donde se les reduce rápidamente a I^- . Mientras el colorante permanezca estable, la secuencia de sucesos se desarrolla sin cambio químico neto, es decir, sería una célula regenerativa. Bajo iluminación, el semiconductor nanoporoso de TiO_2 contiene una única clase de especie fotogenerada, los electrones inyectados por el colorante, mientras que los huecos realizan el transporte de carga positiva en la fase líquida. En

condiciones de circuito cerrado, los electrones se desplazan hacia el sustrato colector y la proximidad entre el semiconductor sensibilizado y el contraelectrodo facilita la difusión iónica en la celda, de manera que se consiguen altas densidades de corriente, bajo iluminación solar.

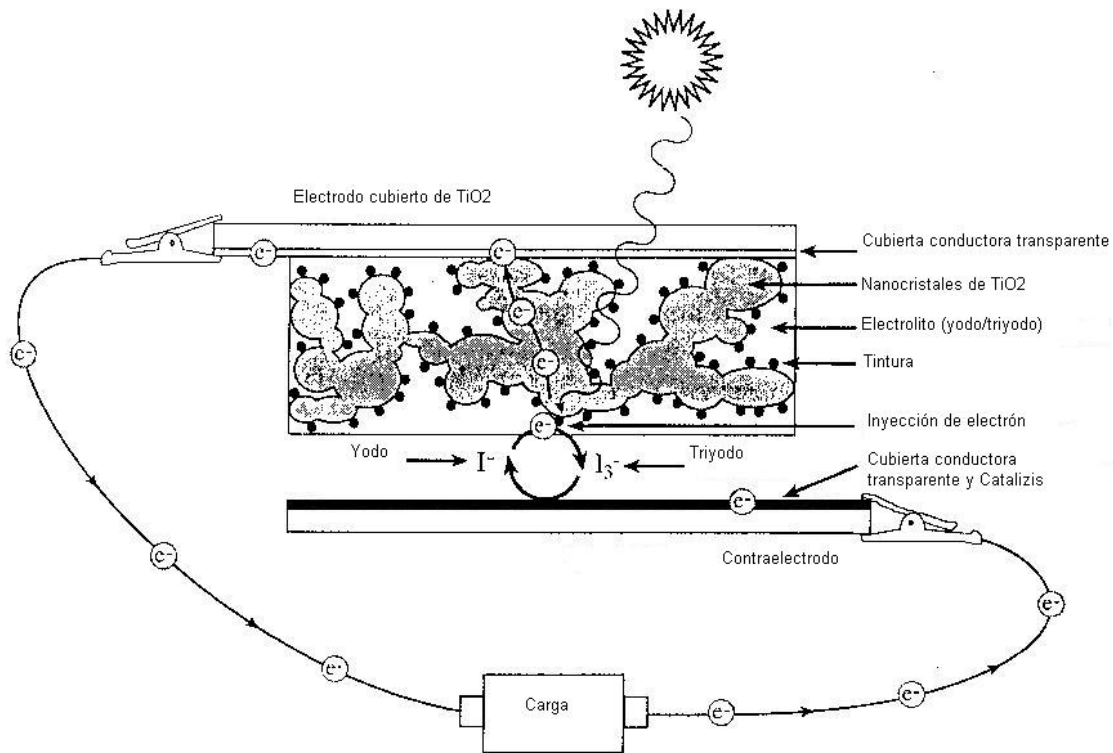


Figura 7.3. Principio de operación de la celda solar con tintura sensibilizadora. La luz excita los electrones que pueden entonces ser inyectados en la nanoestructura de dióxido de titanio. Los electrones fluyen desde el electrodo cubierto de TiO₂ de la celda hacia la carga, y vuelven al contraelectrodo de la celda solar.

Los electrones y los huecos iónicos se encuentran en todo momento en fases separadas, sólido y líquido respectivamente. Pero el tamaño minúsculo de las nanopartículas y nanoporos conlleva a que ambas especies se encuentren siempre muy cerca de la superficie interna (interfase oxido/ líquido) y por lo tanto los

electrones en tránsito pueden reaccionar con I_3^- antes de alcanzar el colector. Este es el mecanismo de **recombinación** en la célula nanoporosa sensibilizada y constituye uno de sus principales procesos de pérdida. Para inhibir la recombinación y obtener una célula eficiente se requiere que la cinética de reducción de I_3^- desde TiO_2 sea lenta. También es necesario mantener una rápida regeneración de colorante oxidado, por lo que la cinética debe ser rápida en el contraelectrodo. Esta reacción se facilita por el efecto catalítico de la capa de Pt.

La fase líquida dispone de iones libres en abundancia que apantallan campos eléctricos que excedan la dimensión nanoscópica. Por estas causas, no existen campos eléctricos macroscópicos como aquellos que efectúan la separación de carga en los dispositivos fotovoltaicos. Dado que el proceso de inyección desde el colorante fotoexcitado es muy rápido, un factor importante para el aprovechamiento de energía fotónica consiste en la efectiva extracción de los electrones fotogenerados. En condiciones de circuito cerrado esto se logra por medio de un gradiente de potencial químico de los electrones inyectados que les encauza hacia el contacto. En otras palabras, la acumulación de los electrones en la nanoestructura aporta la fuerza de **difusión** que da lugar a la foto corriente.

A medida que se acumulan los electrones fotogenerados, las propiedades eléctricas de la fase semiconductor experimentan una extraordinaria transformación, pasando de estado aislante eléctrico (dieléctrico) en la oscuridad, a un comportamiento casi metálico bajo intensa iluminación. En ausencia de campos eléctricos que fuercen el movimiento de los electrones, el mecanismo predominante de transporte es la difusión. Sin embargo, la difusión presenta características peculiares, como sería de esperar en un medio sólido estructuralmente desordenado y de intrincada geometría. En particular, las observaciones muestran que la difusividad para este tipo de celdas varía con el nivel de iluminación. Este comportamiento se debe probablemente a un

efecto de atrapamiento en estados localizados, que ralentiza el desplazamiento de los electrones por la nanoestructura.

Los mecanismos de operación de los dispositivos fotovoltaicos nanoestructurados presentan características radicalmente nuevas que constituyen un desafío científico muy sugestivo. Existe un cierto nivel de consenso sobre los puntos que se han enumerado anteriormente, pero la comprensión de muchos aspectos todavía es parcial y controvertida, en cuanto al origen preciso del fotovoltaje como al movimiento de electrones en un medio sólido nanoestructurado.

7.4. Algunas comparativas y características de la Tecnología DSSC frente a la tecnología fotovoltaica tradicional.

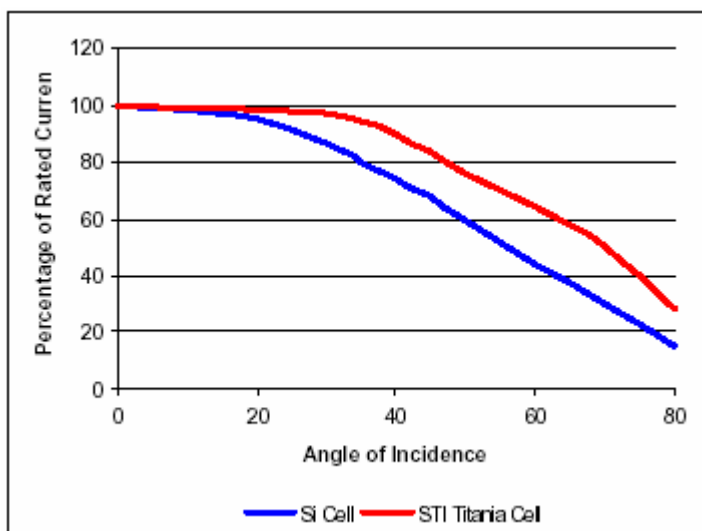
Actualmente no existen paneles solares a la venta de esta tecnología por encontrarse en la etapa de mejoramiento para una producción masiva con fines comerciales, en particular se señala que se están realizando trabajos para lograr una mayor estabilidad de la tintura y el electrolito. La empresa Dyesolar, quien ha comprado el mayor porcentaje de acciones (con la confianza de un desarrollo exitoso a futuro), ha fijado una salida de estos paneles para mediados de este año (2007). Por esto, las comparaciones que se puedan hacer en estos momentos de esta novedosa tecnología no son muy sustanciales en la línea de los costos que se deban pagar por ella. Sin embargo, la proyección de las inversiones realizada por varias empresas, señala que sus costos serán mucho menor en comparación a las tecnologías actuales, tanto por los menores gastos en los insumos utilizados para su fabricación como por la menor cantidad de energía utilizada.

Más allá de lo anteriormente señalado, se realizará una comparativa de algunas características de las celdas de tecnología DSSC.

Comparado a otras celdas solares, la tecnología DSSC presenta varias ventajas

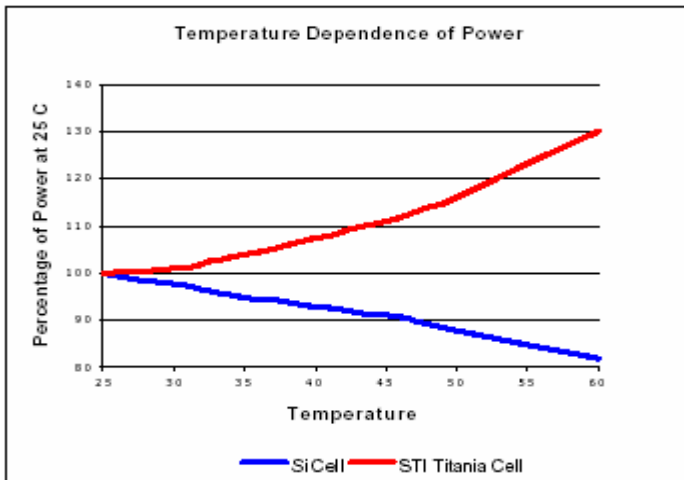
técnicas al respecto.

Las DSSC poseen una menor sensibilidad al Angulo de incidencia de la radiación solar en cuanto a la refracción y reflexión de la luz. En la figura se hace una comparación de la tecnología del silicio versus la de DSSC según datos medidos en laboratorio de estas celdas.



Fuente: Greatcell solar S.A. ^[14]

Además estas celdas pueden operar óptimamente sobre un ancho rango de temperaturas, no afectándose su eficiencia de conversión lo que es muy necesario, ya que a mayor radiación obtendremos una conversión mayor, producto de más energía llegando a la superficie de la celda (o panel), al mismo tiempo se elevaría la temperatura y no querríamos que por este factor el funcionamiento de estas se viera perjudicado. Esto último pasa con los paneles de silicio que se ven afectados con el incremento de temperaturas mayores a 25° C como se puede apreciar en la siguiente figura.



Fuente: Greatcell Solar S.A. [14]

También podemos considerar aspectos de diseño y estética que sitúen un arreglo fotovoltaico en áreas que no afecten una natural condición paisajística, ya que los paneles pilotos de tecnología DSSC han sido presentados en diferentes colores como el café, marrón y transparentes que pueden servir con fines de potenciar áreas de ecoturismo, o la búsqueda de menor impacto visual en medioambientes de vida silvestre, etc.



Figura 18. Presentación de los paneles de tecnología DSSC.

Capítulo VIII.- Fabricación Artesanal de Celdas solares de Dióxido de Titanio (TiO₂) Nanoestructurado con tintura sensibilizadora.

Los elementos principales utilizados para la fabricación de las celdas de tecnología DSSC fueron encargados al Instituto para la Educación Química, correspondiente al Departamento de Química de la Universidad de Wisconsin, USA, al cual desde ya se agradece los datos enviados para un mejor desarrollo del experimento.

Los materiales proveídos por la Universidad de Wisconsin son los siguientes:

- 10 piezas de vidrio conductor transparente con resistencia entre 20 y 30 Ω
- Polvo coloidal de Dióxido de Titanio, Degussa P25 (20 gramos)
- Una solución de electrolito yodada contenida en un gotero de 15 ml.

Los demás materiales ocupados y que se describen en los pasos posteriores, se consiguieron por cuenta propia.

El procedimiento experimental se basó en datos entregados por el mismo Instituto y por la recopilación bibliográfica realizada por el estudiante.

En base a demostrar el principio de operación de las celdas solares DSSC en la conversión de energía, se plantean los siguientes objetivos para el experimento, detallados en los puntos 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4.

8.1. El ensamblado de celda y su caracterización con los pasos más importantes a destacar:

- a) La preparación de la película nanoestructurada de TiO₂ en el vidrio conductor y su posterior fijación.

Se procedió a la preparación de una suspensión coloidal de TiO_2 moliendo una cantidad de polvo comercial de Degussa P25 en un mortero y agregando una solución de ácido acético (PH entre 3 y 4) por aproximadamente 30 minutos; se ejerció bastante fuerza para lograr una molienda homogénea de pequeñas partículas, la pasta finalmente queda con una textura parecida a la pintura. Se deben agregar unas gotas de surfactante Tritón X 100 (en este caso se utilizó un limpiador de lava losas) para darle más uniformidad y lograr una mejor disposición sobre el vidrio conductor.

Para la fijación de la película de TiO_2 depositada sobre el vidrio conductor se llevó a una temperatura de aproximadamente 450°C en una mufla de laboratorio (u hornillo cerrado), por 30 minutos, luego se dejó secar a T^0 ambiente para su posterior ensamble con el contraelectrodo.

b) El proceso de extracción de la tintura sensibilizadora.

El proceso de extracción de la tintura sensibilizadora se realizó por medio de un proceso sencillo; Se comenzó con la simple molienda de guindas en una solución de agua destilada pasando luego al filtrado, procurando que quedara una solución líquida sin ninguna partícula de tamaño grande que causara una zona aglomerada. La solución filtrada es una tintura de solución de antocianinas; las antocianinas son los pigmentos responsables de la coloración roja o azul en las flores u otras áreas de la planta. También tienen la característica de ser muy solubles en agua. Después del filtrado de la solución se procedió a colocar el vidrio con la deposición de TiO_2 en la tintura por un determinado tiempo para la adsorción de esta a la estructura del semiconductor.

Una característica importante que deben poseer las tinturas que se utilicen, es que la estructura química de esta, debe poseer varios grupos carbonílicos ($\text{C}=\text{O}$) o

hidroxilicos (-OH) capaces de chelación (un especial caso de complejación), en el cual un compuesto (llamado ligando) enlaza en dos o más lugares a un Ion metal. (Figura 8.1).

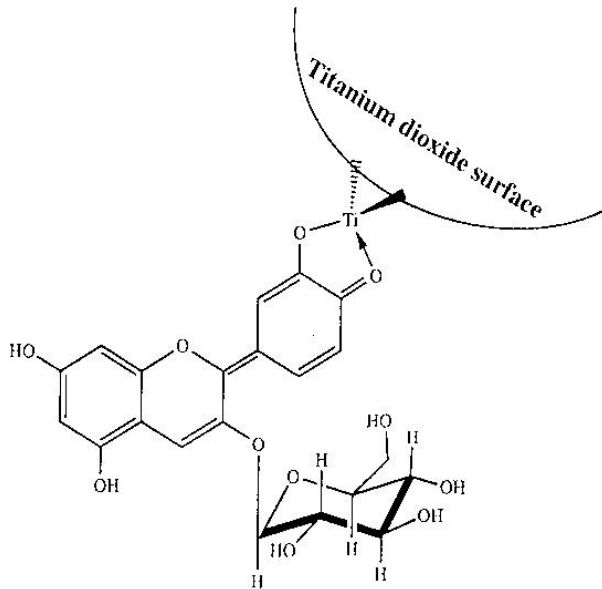


Figura 8.1. Estructura de la tintura de antocianinas adherida a un metal de titanio (IV) en la superficie del dióxido de de titanio. La tintura absorbe la luz y transfiere los electrones excitados al dióxido de titanio.

- c) Preparación del contra electrodo, la capa catalizadora y ensamblado de celdas.

Se prepara el contraelectrodo pasándolo por la llama de una vela unas cuantas veces, buscando uniformidad en el resultado del quemado, se limpian tres de los cuatro bordes y este será entonces el contraelectrodo que realizará la regeneración de

los electrones perdidos por el electrolito.

Preparadas las dos placas de vidrio con sus diferentes características, estas se ensamblan de tal manera de dejar los lados expuestos donde irán las conexiones con las cuales se harán las mediciones eléctricas. Se juntan las dos placas con los lados tratados de frente, uno con la cubierta de TiO_2 (electrodo) y el otro que contiene el catalizador (contraelectrodo), como se aprecia en la figura 8.2.

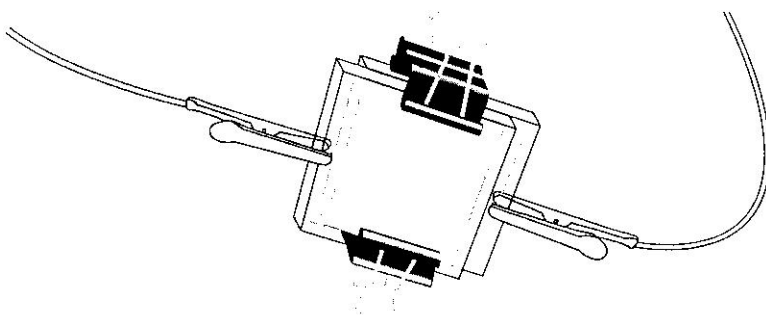


Figura 8.2. Ensamblado de la celda solar. Las dos placas de vidrio son ordenadas de tal manera que la porción de placa sin cubrir por la película de TiO_2 quede expuesta. Una porción de la placa cubierta con el carbón catalizador también debe quedar expuesta, siendo estos los puntos de contacto donde se colocarán las pinzas para medir. La luz entra al ensamble por el lado donde esta la cubierta de TiO_2 .

8.2. Medición de las características eléctricas de salida, como la corriente y el voltaje.

Para realizar estas mediciones, las celdas fueron expuestas a radiación solar directa.

El electrodo negativo es el vidrio cubierto con TiO_2 , y el lado positivo el contraelectrodo (ver figura 8.3).

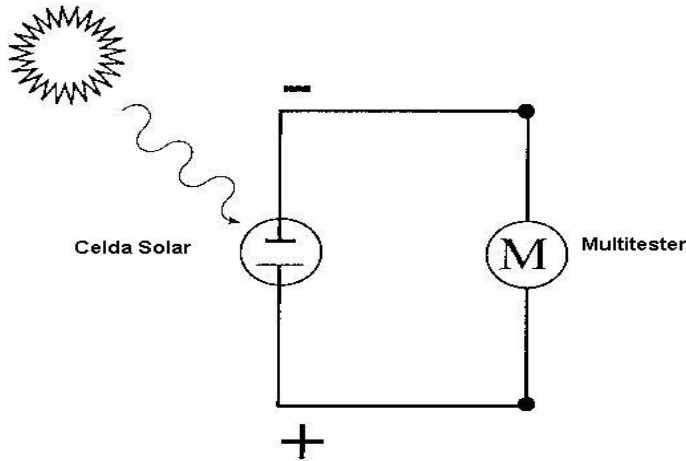


Figura 8.2. Diagrama del circuito para medir el máximo voltaje (circuito abierto) y la máxima corriente (Corriente de cortocircuito).

Se midieron las características eléctricas de salida máxima como la corriente (corriente de cortocircuito) y voltajes (voltaje circuito abierto), ocupando un multítester de buena lectura y los resultados fueron los siguientes.

Tabla 8.1. Mediciones de corriente y voltaje en celdas artesanales.

	Corriente (mA)	Voltaje (Volts)
Celda 1	0.531	0.390
Celda 2	0.102	0.289

Los resultado mínimos fueron 0.000 en cada factor medido y tapando la celda a la exposición solar. La variación de datos desde un mínimo a un máximo por la excitación de las celdas al sol, sucedida rápidamente, aproximadamente unos 5 segundos para llegar al máximo y un poco más lento para llegar al mínimo.

8.3. Variables no controladas

Los componentes utilizados para la fabricación de las celdas fueron los más sencillos con tal de comprobar el principio de funcionamiento de las mismas.

En el experimento hubo variables tanto humanas como técnicas que escaparon al desarrollo del este, por razones económicas y disponibilidad de equipos. Debido a esto, para la fijación de la película de TiO_2 a la temperatura recomendada de 450°C se debía utilizar una especie de calentador de aire que arrojara un flujo continuo a esta temperatura (parecido a un secador de pelo) y en un lugar ventilado. Como no se contó con este equipo se trabajó con una mufla de laboratorio, como se describió anteriormente, la cual solo estaba encendida en condiciones cerradas.

La deposición manual de la pasta buscando que quedara delgada y uniforme genero ciertas dudas al respecto, debido al pulso y a la técnica que puede tener cada persona para tales efectos.

El catalizador utilizado fue el más sencillo; una capa de carbón que podía ser colocada por la pasada suave de un lápiz de carbón o por el flameo de una vela en la cara conductora expuesta. Si bien cumplía con las propiedades físicas requeridas, no es lo suficientemente estable, por su rápida degradación como se pudo comprobar.

Opcionalmente, existían técnicas de extracción de la tintura de antocianinas más eficientes de las descritas acá, pero que conllevaba a la utilización de compuestos y procedimientos con los que no se contaba para este trabajo. También se dejó de lado, el ocupar como pigmentos clorofílicos como los encontrados en las hojas verdes de plantas, debido a lo anteriormente señalado.

8.4. Análisis y discusión de datos

Las posibles limitaciones, pueden haber afectado el rendimiento de las celdas solares de TiO_2 en la conversión de energía, no así la comprobación del principio de funcionamiento de estas celdas, basado en la conversión de energía producto de la excitación de la molécula de tinte por fotones de luz y su inyección de electrones conducidos por la superficie nanoestructurada del TiO_2 hacia el electrodo conductor.

La técnica utilizada para la fijación de la pasta de TiO_2 a la temperatura indicada, no fue la recomendada por la encontrada en escritos, lo cual puede haber afectado el rendimiento de la celda, al observar con lupa el fijado de la pasta se pudo diferenciar la celda 1 con respecto a la celda 2, la primera tenía una estructura más ordenada y menos quebrada que la celda 2, esto puede haberse debido a que la segunda celda se sacó bruscamente de la mufla, mientras la primera se dejó que retornará a la temperatura ambiente de forma más lenta. Cabe señalar que de las cinco celdas construidas, las tres primeras se desecharon por producirse el quiebre de la capa de TiO_2 , debido al cambio brusco de temperaturas y a la mala disposición de la misma pasta.

Con el paso del tiempo las celdas bajan su rendimiento por agotamiento del electrolito, al agregar este se recuperan, pero la débil capa catalizadora sufre degradación teniendo que desmontar y volver a colocar nuevamente esta capa. El electrodo que contiene la capa de tinte adsorbida al TiO_2 se presenta más estable visualmente.

Capítulo IX. Conclusiones.

1.- La tecnología DSSC se presenta como una nueva alternativa en el ámbito de la utilización de energías renovables. La demostración práctica del principio de funcionamiento de este tipo de celdas solares, muestra que es viable construir celdas de generación fotovoltaica. Si bien en este estudio no se obtuvieron valores de eficiencias elevados, la misma complejidad de su estructura y funcionamiento deja notar que existe un camino todavía por entender y mejorar para en el futuro obtener mejores resultados. La innovación ha venido siempre de la mano de pequeños descubrimientos y avances que con el tiempo se han ido perfeccionando, ciertamente es necesario en ese sentido potenciar el uso de energías renovables, como fuentes de energías más limpias.

2.- La dependencia de nuestro país hacia energías primarias como el petróleo, demandado en gran medida a nivel mundial, el incremento de los precios por estos insumos y la inestabilidad de su abastecimiento ante posibles guerras, deben necesariamente potenciar la utilización de otras fuentes de energía como las renovables, promoviendo el estudio de estas en función de las inversiones en desarrollo e investigación, como ha ocurrido en otros países en los cuales los avances en esta área han sido destacables.

3.- El protocolo de Kyoto compromete a los países industrializados a bajar sus emisiones de gases de efecto invernadero, la participación de países en vías de desarrollo como Chile, también deberá asumir acuerdos de disminución voluntaria, en la búsqueda de financiamiento para actividades de desarrollo sostenible, (aprovechando los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)), financiamiento que llegaría desde el extranjero y que se puede visualizar como un triple beneficio; en ayuda a la inversión realizada al proyecto en cuestión, en la vía de potenciar el uso de los recursos Energéticos Renovables y en el cuidado global del medio ambiente.

Las políticas legislativas entonces deben potenciar el uso de energías renovables y la eficiencia energética, con miras a un futuro menos contaminado y preocupados del tema del “calentamiento global”, que podría potencialmente afectar el desarrollo de nuestras sociedades. Y bien puedo citar una frase, como la que dice “más vale prevenir, que curar”, ¡simple en su gramática! , pero que muchas veces nos sorprende con los resultados que obtenemos de su aplicación.

4.- Para la fabricación de estas celdas es necesario trabajar en laboratorios que entreguen las condiciones aptas para su mejor desarrollo. La carrera de Ingeniería Ambiental como tal debe promover la creación de estos laboratorios enfocados en el desarrollo e investigación de energías renovables, comprendiendo que estos trabajos deben realizarse en condiciones favorables para mejores resultados. De igual forma, se responde a las necesidades que demanda parte de la sociedad y no necesariamente esperando que el estado como órgano regulador genere estas instancias (potenciar el uso de energías renovables). La Universidad en el tiempo ha desempeñado un rol muy importante en la creación de profesionales aptos para las distintas áreas; el tema de la Energía Renovable es un tema relativamente nuevo y que ciertamente demanda esfuerzos para su desarrollo, las herramientas utilizadas serán las que vendrán en si a generar los profesionales aptos para esta área y serán fruto de su esfuerzo, elevando ciertamente el nivel de calidad entregado por la carrera y la Universidad.

5.- Finalmente, este estudio sirve de conocimiento básico sobre la tecnología DSSC e introduce al autor de este tema (y ciertamente a aquel que se interese por esto) a la fabricación de celdas de esta tecnología con la proyección de mejorar el trabajo realizado, visualizando acá las principales características y elementos que regulan el funcionamiento de estas celdas.

Capítulo X.- Discusión y comentarios

1.- Cabe destacar el trabajo de titulación de Jorge Moreira en la Universidad Católica de Temuco (año 2004), en donde se construyeron también celdas de dióxido de titanio con similares procedimientos pero diferenciándose en la utilización de estructuras sensibilizadoras de complejos de Renio como grupo ancla, de forma similar como se ancla la tintura de antocianinas al TiO_2 en este estudio, (Figura 8.1). El valor eléctrico de salida en corriente fue de $1.45 \mu\text{A}$ (microamperes) y de voltaje de 50.3 (mV), utilizando un retroproyector como fuente de luz.

Los datos y procedimientos y en general el estudio anteriormente descrito, puede servir de ayuda para los posibles proyectos en base a la tecnología DSSC e ir estableciendo líneas de desarrollo más óptimo de esta tecnología en el país, hasta encontrar caminos que conduzcan a un avance significativo. En ese sentido la inversión en investigación y desarrollo es un punto importante a considerar para el estudio y mejoramiento de esta tecnología.

2.- Es interesante que con este tipo de celdas surjan importantes actividades de carácter educativo. Los estudiantes pueden construir con sus propias manos un dispositivo que ilustra los principios básicos de conversión de energía solar mediante transferencia electrónica como fotosíntesis artificial. También es llamativo que se pueda realizar la sensibilización del dióxido de titanio con tinturas extraídas de guindas, flores, hojas y otros tipos de colorantes naturales.

3.- Se señala que para el 2007 estarían saliendo a la venta los primeros paneles de tecnología DSSC comprendiendo ya a varias empresas europeas como STI, DyeSolar y Graetcell S.A. que ya han comprado patente junto a otras empresas asiáticas y norteamericanas para la producción a gran escala de esta tecnología. Lo cierto es que se espera con ansias esta salida para poder ver claramente en que

nivel de mejoramiento y eficiencia se encuentra actualmente esta tecnología.

4.- La radiación solar que ha proveído al planeta de energía durante millones de años, ha sido aprovechada para las múltiples funciones de la vida y su relaciones en la biosfera; el ser humano a través del tiempo no ha logrado aprovechar de buena manera esta energía disponible que ciertamente traería buenos dividendos a la hora de utilizarla, ya que es una energía renovable y mucho menos contaminante que la usada en la actualidad que se basa en la utilización de combustibles fósiles. Es necesario que se avance en este sentido y la investigación siempre ha aportado buenos resultados, es de esperar que los conocimientos obtenidos hasta ahora por el ser humano puedan canalizarse por esta vía para el beneficio del planeta que habita.....que con creces ha aportado a su existencia y desarrollo.

Bibliografía

- [1] Michael Graetzel and Jaques E. Moser, "Solar Energy Conversión", 16-18, 60,61.
- [2] Sears-Zemansky, "Física Universitaria", 9ª Edición, Vol. 2, 1354,1355, 1360-1367.
- [3] Dr. Greg P. Smestad, "Nanocrystalline Solar Cell, Recreating Photosynthesis", 10-14, 1998.
- [4] Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente (PNUMA), "El Cambio Climático en América Latina y el caribe", 2004.
- [5] Naciones Unidas, "Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático", 1998.
- [6] Luis Prat V, "Circuitos y dispositivos electrónicos, Fundamentos de electrónica", Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, 1999, 329-372.
- [7] Isidro Pereda S, Memoria "Celdas Fotovoltaicas en Generación Fotovoltaica", Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [8] Sandia Nacional Laboratorios de Albuquerque, New México, "Energía Fotovoltaica en la Educación Fotovoltaica".
- [9] Alberto Escudero P, "Sistema Mixto Eólico-Fotovoltaico en Vivienda Rural Basada en el concepto de Permacultura", 77,78.
- [10] Nusbaumer H., Alternative Redox Systems For The Dye-Sensitized Solar Cell", 2004, 1-20.

[11] Dr. Jaques E. Moser, « Processus Photochimiques », Escuela Politécnica Federal de Laussane, Sección Química, 2001, 1-3, 33, 34.

[12] Jorge Moreira A., Tesis “Síntesis y Caracterización Espectroscópica y electroquímica de complejos de Renio con un Ligando Polipiridínico, Aplicación como tinturas en Celdas Solares”, Universidad Católica de Temuco.

Referencias de Internet

Referente a Tecnología tradicional Fotovoltaica

<http://solar.ujaen.es/cursolar.HTM>

<http://www.atersa.com/principalAtersaES.html>

<https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/index.php?fascic=I&anyo=2006>

Referente a tecnología DSSC

<http://isic2.epfl.ch/page58671-en.html>

<http://www.greatcell.com/GSA%20Web%20French%2017052005/index.html>

<http://www.dyesol.com/index.php>

<http://www.sta.com.au/index.htm>

<http://www.elp.uji.es/>

<http://www.titanpe.com/index.htm>

<http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanolab/TiO2/index.html>

<http://www.solideas.com/solrcell/spanish.html>

Referente a datos estadísticos

http://www.ine.cl/ine/canales/chile_estadistico/home.php

http://www.cdec-sic.cl/datos/demanda_electrica.html

<http://www.cne.cl>

Anexo A. (Extraído del protocolo de Kyoto)

Gases de efecto invernadero

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- HidroFluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbono (PFC)
- HexaFluoruro de azufre (SF₆)

Sectores/categorías de fuentes

Energía

Quema de combustibles

- Industrias de energía
- Industria manufacturera y construcción
- Transportes
- Otros sectores
- Otros

Emissiones fugitivas de combustibles

- Combustibles Sólidos
- Petróleo y gas natural
- Otros

Procesos industriales

- Productos minerales
- Industria Química
- Producción de metales
- Otra Producción
- Producción de Halocarbonos Y Hexafluoruro de azufre
- Consumo de Halocarbonos y Hexafluoruro de azufre

Utilización de disolventes y otros disolventes

Agricultura

- Suelos agrícolas
- Quema en el campo de residuos agrícolas
- Fermentación entérica
- Aprovechamiento del estiércol
- Otros

