Toward a prototype of low cost dye solar cells.

Ángel Vargas León
Estudios Hidronómicos S.A. angelvargasleon@hotmail.com

Alejandro Marzuca Venegas
Estudios Hidronómicos S.A. serpentus@gmail.com

Abstract: The emerging technology of dye solar cells is analyzed from different points of view in comparison with silicon solar cells. The high efficiency (20%) and long durability (20 years) of silicon cells are very attractive qualities, however their high price for house electricity, make them unreachable by common people; their manufacture is energy consuming, contaminating and request high technology procedures. An alternative autonomous way is investigated, focused on testing materials and procedures for making dye solar cells at low cost, low environmental impact and reasonable efficiency and durability. Moreover, the empowerment of this technology by people was analyzed. The results are: dye solar cells 5cm2 with photo voltage production of 0,7V and photocurrent 0,2 mA, employing crystal violet as a dye. Manufacture was with low price materials, low environmental impact and learning of basic scientific background and procedures by a team of high school students. Durability requires a longer observation time and efficiency is still too low (0,05 %) in comparison with expectations of 1%, due to low production of photocurrent. Different ways to improve efficiency are proposed.

Keywords: Dye solar cells, energy autonomy, science education, empowerment.

1. Problema

Las celdas solares con pigmento (Dye Solar Cells: DSC) emergieron como una nueva tecnología para producir electricidad a partir de energía solar, y tuvieron un lento desarrollo experimental hasta el año 2000 [1], tendencia que continuó hasta que Michael Gratzel obtuvo el premio Milenium de tecnología el año 2010 por sus estudios sobre el tema.

En la actualidad numerosos laboratorios en todo el mundo investigan formas de producir paneles solares con pigmento para ser aplicados a nivel masivo [2]. Su desarrollo en laboratorios ha alcanzado eficiencias de 15% [3]. Se ha iniciado un mercado para estos dispositivos y su difusión incluye la publicación de manuales tipo “hágalo usted mismo” [4]; pero ciertos componentes clave deben ser comprados por los interesados a las compañías que hacen la difusión.

En un escenario mundial en que los países enfrentan problemas globales básicos como la superación de la pobreza y la protección del medio ambiente, se generan expectativas sobre la tecnología solar fotovoltaica, que podría ser utilizada a mayor escala para el consumo residencial de electricidad. Pero los paneles de silicio aún tienen un costo fuera del alcance de la gran mayoría de las personas.

Según el Banco Mundial 1,2 billones de personas; es decir, sobre el 20% de la población mundial no tiene acceso a la electricidad [5]. Otro porcentaje en niveles de pobreza está sufriendo por las tarifas de consumo cada vez más gravitantes en el presupuesto familiar.

En Chile, el 0,6% de la población no tiene suministro de energía eléctrica. El consumo residencial equivale al 15,33% del total de todos los sectores [6]. El consumo de electricidad promedio diario per cápita es de 1,6 kWh/día y las tarifas por kW/h tienen una tendencia a subir en los próximos años [7].

El problema aquí analizado es cómo la tecnología de celdas solares con pigmento podría ser accesible y útil a personas sin energía eléctrica, o que buscan tener paneles solares para ahorrar costos por consumos domiciliarios.

2. Objetivos

General:
Establecer bases para construir un prototipo de panel solar de bajo costo con capacidad para accionar pequeños artefactos electro-domésticos.

Específicos:
Ensayar diversos materiales de bajo costo para construir celdas solares con pigmento.

Conocer el grado de toxicidad de materiales utilizados en estas celdas solares.

Evaluar procedimientos para una manufactura simple y su transferencia con empoderamiento de las personas.

Evaluar parámetros de celdas solares con pigmento como base para la construcción de un prototipo.

3. Estado del Arte

Historia de las primeras celdas solares

La primera celda fotovoltaica fue desarrollada por Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) en el año 1839 cuando tenía 19 años de edad. Para crear esta celda experimentó con Cloruro de Plata (AgCl) en una solución ácida conectada con electrodos de platino. Esta solución al ser iluminada generaba un voltaje y una corriente [8].

Más adelante, Willoughby Smith describió "Efectos de la Luz sobre el Selenio durante el paso de la Corriente Eléctrica" [9]. Luego en 1883 Charles Fritts construyó la primera celda fotovoltaica de estado sólido. Para ésto revistió una capa de Selenio con una capa delgada de oro para formar las junturas. Esta celda tenía una eficiencia de 1%.

En 1883 Aleksander Stoletov desarrolló la primera celda fotovoltaica basada en el "Efecto Fotoeléctrico" descubierto por Heinrich Hertz en 1887 [10].

Tecnología basada en combustión de petróleo cuestionada

En la actualidad poderosas compañías transnacionales tratan de mantener en pie la tecnología basada en la combustión de petróleo y sus derivados. Las reservas mundiales de petróleo y gas natural están agotándose y se prevé una severa crisis mundial para el año 2050. Se están agravando los efectos del calentamiento global producido por emisión de gases con efecto invernadero. Los costos de agua potable y electricidad están en aumento. Las plantas termoeléctricas e hidroeléctricas tienen severas restricciones por el daño ambiental que producen. Las plantas termonucleares que estaban en aumento, ahora tienen más restricciones, después del desastre de Fukushima y otros. Por otra parte la gente común, habitantes de las ciudades, tienen mayor conciencia de sus derechos a tener un ambiente saludable, y se manifiestan de diversas maneras en movimientos sociales. Por todo lo anterior resulta más aceptable la búsqueda de alternativas para usar energía limpia.

Celdas solares de silicio

Se empezaron a usar en los satélites artificiales y ya tienen un desarrollo en el mercado por más de 50 años. Aunque sus costos de producción han disminuido, todavía están fuera del alcance de la mayoría de los ciudadanos. Además hay que considerar el daño ambiental asociado a su producción ya que el silicio debe ser fundido en hornos a alta temperatura para eliminar impurezas y obtenerlo 99,99% puro. Luego debe ser tratado químicamente para obtener láminas dopadas con fósforo (tipo p) y láminas dopadas con boro (tipo n). Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico descrito por Hertz, es decir los fotones liberan electrones de la lámina tipo p que se mueven a la lámina tipo n y de allí se conectan en circuito con la tipo p nuevamente. No hay electrolito presente. Aunque son más simples y duraderas, su construcción requiere de una industria sofisticada que por cierto encarece los costos.

Celdas foto-electroquímicas

Básicamente tienen tres componentes: foto-electrodo, contra-electrodo y electrolito, que se ensamblan en forma de sandwich, con el electrolito al centro. Los principios operacionales de estas celdas han sido descritos por varios autores [11]. Básicamente el foto-electrodo (ánodo) absorbe energía lumínica, liberando electrones del pigmento que se mueven a través de la banda de conducción de dióxido de titanio. Los electrones llegan al vidrio conductor y de allí son dirigidos mediante un cable exterior al dispositivo eléctrico, y luego al contra-electrodo (cátodo) de donde pasan al electrolito y luego nuevamente al pigmento, y así se repite el ciclo muchas veces por segundo. Mientras reciban luz solar estas celdas producirán corriente eléctrica continua gratuitamente, hasta que se generen resistencias internas o deterioros que disminuyen su eficiencia y durabilidad.

Esta descripción presenta un nivel básico de complejidad, accesible a gran cantidad de público; pero en la práctica se presentan problemas que sólo se pueden abordar con un nivel más avanzado de complejidad teórica. Los factores limitantes de la eficiencia en estas celdas están siendo intensamente investigados en la actualidad.

Factores limitantes en las celdas solares con pigmento

El problema central de estas celdas es su baja eficiencia de conversión (η), o sea, el porcentaje de energía solar convertida por la celda en energía eléctrica:

$$\eta = \frac{Pmáx}{E \times Ac}$$

Dónde:
Pmáx: potencia máxima (en Watts) de la celda.
E: energía solar total incidente (por convención se estima en 1.000 W/m^2 bajo condiciones estándar).
Ac: área de la celda solar (en m^2).

Esta fórmula es solo introductoria al tema, ya que actualmente la eficiencia se calcula de otra manera. Dado que: P=Dif.Potencial(Volts)xCorriente(Amperes), se encuentra que la baja eficiencia ocurre por baja producción de fotocorriente, cuyos valores típicamente están en el orden de miliamperes. Esto obliga a examinar con más detalle la forma en que se genera la corriente de electrones.

Cuando un fotón es absorbido por el pigmento, puede generar un par electrón-hueco. En efecto, un electrón (-) de valencia del pigmento es excitado e inyectado en la banda de conducción del TiO_2. El enlace covalente queda con un hueco (+) por haber un electrón menos. Electrones de átomos vecinos pueden moverse hacia el hueco y así la carga (+) puede propagarse por el electrolito hacia el contra electrodo.

Mientras tanto, los electrones libres fluyen en dirección opuesta a través del TiO_2 y son colectados por el vidrio conductor, dirigidos por un cable externo al dispositivo eléctrico y de allí al contra-electrodo, pasando al electrolito. Así las moléculas de pigmento recuperan su estado inicial. Todo este movimiento puede ocurrir en milésimas de segundo, pero solo un porcentaje de fotones son efectivamente convertidos a corriente eléctrica (eficiencia cuántica). Los electrones con energía menor que la banda de absorción del pigmento no pueden generar un par electrón-hueco y esta energía se disipa como calor. Si se absorben fotones con energía mayor, el exceso de energía sobre la banda se convierte también en energía cinética y calor.

Pero hay otros eventos que pueden ocurrir a este nivel: hay fotones que no llegan a ser absorbidos simplemente porque son reflejados por la superficie de vidrio de la celda. Hay electrones que son inyectados en la capa de TiO_2 pero luego regresan, lo cual se denomina recombinación [12].

Diferentes materiales fotovoltaicos tienen diferentes energías de “band gap” y pueden generarse resistencias internas que dificultan el flujo de electrones en el circuito. Esto conduce a la búsqueda cuidadosa de combinaciones apropiadas de materiales, pero no es algo sujeto solo a ensayo y error, sino al conocimiento de propiedades íntimas de los materiales, cuestión que requiere instrumentos y procedimientos que sólo algunos laboratorios a nivel mundial están en condiciones de utilizar.

El pigmento es la parte esencial de estas celdas y debe ser resistente a luz solar directa, temperatura y otras condiciones ambientales. Hay cientos de pigmentos orgánicos que se pueden probar pero la mayoría de ellos se deterioran al poco tiempo. Otros laboratorios utilizan el pigmento sintético rutenio-polypiridil, que tiene seis cromóforos y es más eficiente, pero tiene un alto precio, por lo cual se decidió ensayar con cristal violeta, que tiene tres cromóforos, es decir, anillos hexagonales con enlaces simples y dobles alternados entre sus carbonos; con la luz los electrones de valencia se mueven girando en el anillo (fenómeno llamado resonancia), aumentan su energía y se liberan de la molécula. Así la energía de los fotones es capturada y transformada en corriente eléctrica.

Este pigmento tiene una molécula simétrica formada por tres cromóforos unidos formando un triángulo. Es químicamente puro lo cual es apropiado para el objetivo propuesto. Previamente se habían obtenido y probado diversos pigmentos naturales de: pimentón, acelga, maqui, palqui, cúrcuma y otros, pero todos tenían algún grado de impurezas que con la luz solar producen deterioro. Además, Tingli Ma et al.(2011) realizaron un estudio con 20 pigmentos naturales y llegaron a la conclusión de que no hay enlaces entre TiO_2 y pigmento para facilitar el transporte de electrones [13]. Entonces en la actualidad se buscan pigmentos naturales o sintéticos que formen enlaces con TiO_2, ya que sin ellos se genera una resistencia al flujo de corriente [14].

El electrolito puede dañar al pigmento utilizado. El Yoduro de potasio (KI), utilizado inicialmente termina destruyendo al pigmento Hay laboratorios que utilizan electrolitos más eficientes pero también más caros, por lo cual se descartaron en el presente trabajo. Actualmente se están utilizando compuestos llamados perovskites como electrolitos y que funcionan tam-

bién como pigmento [15]. La investigación ha llevado a nuevos descubrimientos a nivel molecular y a alcanzar la eficiencia de 15%, rivalizando con las celdas de silicio, pero hasta ahora no se ha logrado producir celdas solares a bajo costo. Sin embargo otros investigadores mantienen el objetivo original.

Celdas solares flexibles

El desarrollo experimental de celdas solares construidas sobre sustratos flexibles, usando impresoras de tinta, permite su fabricación masiva en capas finas que se integran a variadas superficies de viviendas y/o de vehículos. Con el desarrollo de esta nanotecnología ha sido posible sintetizar delgadas capas fotoactivas para realizar la conversión fotovoltaica con estabilidad suficiente para aplicaciones prácticas. Varias compañías como Nanosolar, QuantaSol, Flexcell, Global Solar Energy, Konarka Technologies y Diesol prometen generar electricidad limpia y barata a los dos billones de personas que no tienen acceso a redes y reducir costos de quienes ahora dependen de termo o hidro-electricidad [16]. Cabe señalar que esta tecnología requiere de implementos y procedimientos sofisticados que encarecen los costos. Existen numerosas patentes sobre procedimientos clave de manera que su accesibilidad al público es reducida.

Una manufactura completa y simplificada de celdas solares con razonable eficiencia y bajo costo no ha sido aún reportada.

Como conclusión a todo el Estado del Arte, la tecnología solar fotovoltaica es en la actualidad más aceptable para el público en general. En el mercado las celdas solares de silicio predominan, aunque existe poca demanda para uso residencial por los altos costos asociados. Las celdas solares con pigmento están aún en etapa de reducción de costos de producción manteniendo buena eficiencia y durabilidad. Pero lo más atractivo de esta tecnología está en que a pesar de la complejidad teórica, presenta poca complejidad en la manufactura, pudiendo construirse prototipos de baja eficiencia a bajo costo.

4. Método

Para alcanzar el primer objetivo específico se ensayaron diversos materiales en la construcción de celdas con pigmento, que siguió básicamente las etapas descritas en el manual de Solaronix (2011), aunque con importantes modificaciones y reemplazando la compra de algunos elementos por la manufactura propia.

Los parámetros para evaluar el funcionamiento de las celdas son: eficiencia, foto-voltaje en volts, fotocorriente en miliamperes (mA) y durabilidad que se mide en meses o años.

El foto-electrodo es el componente más difícil de construir ya que tiene varias etapas. Se forma con un vidrio conductor al cual se le depositan una fina capa de dióxido de titanio (semiconductor), y luego una fina capa de pigmento orgánico. El contra-electrodo, en cambio, es una delgada lámina de grafito y el electrolito es una solución que contiene fluoruro de sodio (NaF).

El vidrio conductor, no disponible en el mercado nacional, se elaboró siguiendo un procedimiento [17] en que se vaporiza cloruro de estaño a 400°C para impregnar vidrios de 1 mm de espesor. Se utilizó una cámara de pirólisis diseñada especialmente para esto. Los gases producidos pasan por sobre el sustrato impregnándolo con óxido de estaño y haciendo que el vidrio se vuelva conductor por una de sus caras. Su conductividad se estimó midiendo resistencia en 10 pares de puntos tomados al azar a 1mm de distancia y obteniendo el promedio de estas mediciones.

Para impregnar el vidrio con TiO_2 se ensayaron dos técnicas: la primera conocida como “doctor blading” consiste en hacer una pasta con TiO_2 y agua que se aplica con rodillo sobre el vidrio en una delgada capa y luego se deja secar. La técnica alternativa, que denominamos “drying drop” no ha sido descrita anteriormente, está basada en la tensión superficial de gotas de líquidos sobre superficie de vidrio. En este caso se usó una suspensión de TiO2 (anatasa) en agua con 12% etanol. Se aplica con pipeta formando una gota que cubra todo el vidrio. Se deja secar en el horno a 50°C aproximadamente. En ambos casos se aplica luego un secado a 250°C por 30 min, proceso denominado “sintering”. El objetivo es formar una capa fina, homogénea y bien adherida sobre el vidrio conductor.

La impregnación con pigmento se hizo mediante la técnica drying drop tiñendo toda la superficie, con lo cual queda formado el foto-electrodo. Finalmente el ensamblaje de la celda se logra colocando un papel filtro empapado con electrolito sobre el foto-electrodo y colocando el contra-electrodo desfasado, dejando un borde de 5mm a ambos extremos para facilitar los contactos eléctricos (Figura 1). No deben quedar espacios de aire entre los componentes y es conveniente sellar los bordes para asegurar una mayor durabilidad de las celdas.

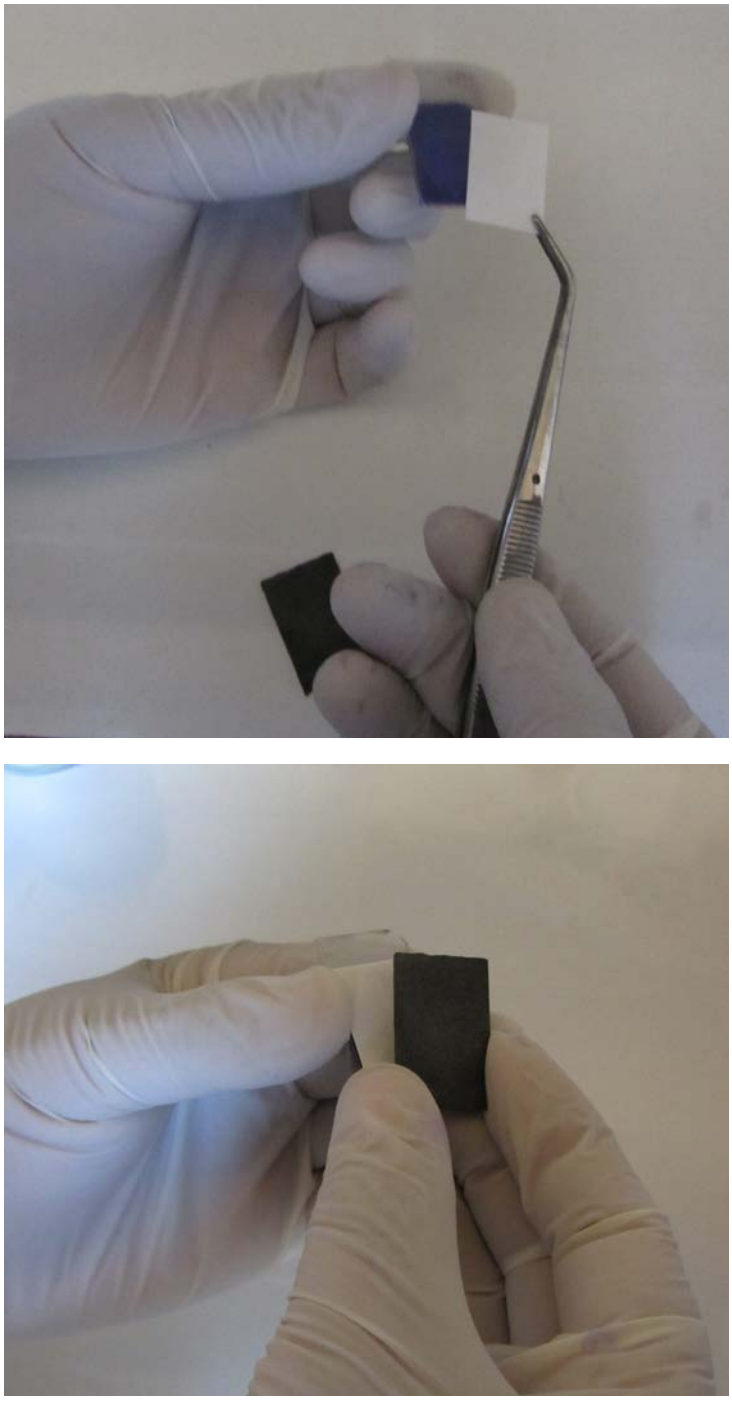

Figura 1. Ensamblaje de celdas con pigmento

Para alcanzar el 2° objetivo específico se reunieron antecedentes bibliográficos sobre la toxicidad y potencial daño ambiental de los compuestos químicos utilizados en la manufactura de las celdas.

Para lograr el 3° objetivo específico se utilizó una metodología de aprendizaje denominada investigación-acción, formulada inicialmente por Stenhouse [18], adaptándola a la operación de un taller de ciencias con 8 estudiantes de enseñanza media en el Colegio De Santa María, comuna de El Monte, RM. De acuerdo a esta metodología, el profesor viene a investigar un problema que le interesa; los estudiantes se involucran en el proyecto y ponen en juego todos sus aprendizajes y habilidades, incluyendo los "saberes prácticos" que están en la base de toda innovación. Desempeñan el rol de ayudantes de investigación y su empoderamiento del tema se mide mediante su trabajo en equipo, su capacidad de exponerlo frente a público y su aporte en ideas para experimentar.

Para lograr el cuarto objetivo específico, se tomaron los registros de un período de ensayos con diferentes materiales de bajo costo y se eligió un conjunto de ellos que son compatibles y le dan estabilidad al sistema, lo cual es requerido para obtener celdas de razonable durabilidad. Las celdas con pigmento quedaron entonces caracterizadas por tener vidrio conductor elaborado con $SnCl_2.2H_2O$, impregnación con TiO_2 como semiconductor y cristal violeta como pigmento, grafito como contra-electrodo y electrolito no acuoso de NaF en propilenglicol.

5. Resultados

El primer desafío fue producir vidrio conductor impregnándolo con dióxido de estaño, a partir del precursor cloruro de estaño dihidratado ($SnCl_2.2H_2O$). Después de numerosos ensayos, y mediante re-impregnación, se logró producir vidrio conductor con resistencia de 15 Ω/cm^2, similar al que se encuentra en el mercado internacional a un precio US$ 14 el trozo de 6cm2. Con el método aquí descrito se obtiene a un costo aproximado de US$ 0,5. Con la desventaja de que la transparencia del vidrio es menor.

Los vidrios conductores se impregnaron con una delgada capa de TiO_2 para preparar foto-electrodos, que resultaron de mejor calidad usando la técnica drying drop.

El pigmento orgánico sintético cristal violeta, se utilizó a una concentración de 4 mg/ml, lo cual resultó apropiado para formar los foto-electrodos.

La mayoría de los laboratorios utilizan oro o platino como contra-electrodo. Se encontró que utilizando láminas de grafito de 1mm de espesor se pueden producir celdas solares más baratas pero de baja eficiencia. El problema es que para producir por ejemplo, 20 mA, se requiere un panel con muchas celdas y ocupar más superficie. También se podría utilizar vidrio conductor como contra-electrodo, siempre que se logre producirlo como buen conductor, es decir con resistencia cercana

a cero. Tanto el vidrio conductor como el grafito son reciclables para elaborar nuevas celdas.

Se utilizó fluoruro de sodio (NaF), como electrolito, el cual se disuelve en propilenglicol y se disocia en iones sodio (Na+) y iones fluoruro (F-). El NaF tiene muy baja solubilidad en agua (4 gr para 100 ml), y también en propilenglicol, por lo cual es probable que sea un factor limitante en estas celdas.

Los principales costos de materiales fueron la lámina de grafito (3x2x0,1 cm) y el vidrio de microscopio utilizados para formar los electrodos (Tabla 1). El costo en materiales resultó ser de $ 354,6/celda, lo cual no incluye mano de obra ni insumos básicos. El tiempo total necesario para elaborar las celdas es de 4,5 horas, siendo la etapa de fabricación del vidrio conductor (2 horas) lo que consume más tiempo.

Tabla 1: Costo de materiales utilizados en elaboración de celdas solares. (precios en mercado chileno, en pesos, IVA incluido).

Material	Precio/ Kg, Lt	Cantidad/ Celda	Precio/ Celda
Alcohol etílico potable	3.855	0,063 ml	0,20
Agua destilada	1.071	0,446 ml	0,98
Cristal violeta	5.212	0,3 ml	1,56
propilenglicol	5.200	0,2 ml	1,04
NaF	4.272	0,009 gr	0,04
TiO_2	7.318	0,05 gr	0,37
$SnCl_2$ $2H_2O$	57.120	0,3 gr	17,14
NaCl	1.654	0,05 gr	0,08
Lámina grafito		0,6 cm^3	191,0
Papel filtro		5 cm^2	2,18
Vidrio microscopio 1mm		1	140,0
TOTAL			354,6

Con la única excepción del cloruro de estaño los materiales empleados no son tóxicos en las condiciones en que son manipulados (Tabla 2).

La tabla 3 muestra mediciones de foto-voltaje y fotocorriente de celdas elaboradas. Todas las mediciones se realizaron con luz solar directa y a mediodía.

La fotocorriente es especialmente sensible a la radiación solar incidente y variaciones transitorias en luminosidad producen fluctuaciones en este parámetro.

Tabla 2: Toxicidad de materiales utilizados en celdas solares con pigmento. (Fuente: Wikipedia)

Material o compuesto	Uso común	Toxicidad
Cloruro de estaño dihidrato ($SnCl_2 2H_2O$)	antioxidante para vegetales en conserva	Tóxico en estado gaseoso. No inhalar. Vaporizar en espacio abierto
Dióxido de titanio (TiO_2)	En pinturas, pastas dentales y aditivo en alimentos	Polvo blanco, no tóxico
Cristal violeta	Conocido antiséptico	No tóxico en solución acuosa. Manipular con guantes
Grafito	En motores eléctricos, alternadores y dispositivos electrónicos	Manipulable, no tóxico
Fluoruro de sodio (NaF)	Componente activo de muchas pastas dentales	No tóxico disuelto en propilenglicol
Propilenglicol	Anticongelante lubricante	No tóxico

Se comprobó además que las celdas conectadas en serie aproximadamente suman su voltaje, pero mantienen el amperaje como si fueran una sola celda. En cambio, si son conectadas en paralelo, suman el amperaje manteniendo el voltaje como una sola celda. Al unir dos celdas, ya sea en serie o en paralelo la potencia en watts se duplica. Estas condiciones son básicas para diseñar la construcción de un panel solar.

La manufactura de estas celdas fue practicada repetidas veces por los participantes del taller de ciencias, quienes tuvieron 28 horas de actividad en el proyecto (2 horas/semana). Lograron una comprensión básica del tema y sus implicancias para la sociedad, explicaron al público su trabajo y propusieron nuevos experimentos. Quedó en evidencia que se requiere un período más prolongado de práctica para obtener resultados homogéneos,

especialmente en los procedimientos de impregnación y en la comprensión de la teoría con más profundidad, por lo cual solo se logró un grado inicial de empoderamiento. Los resultados además dependen de la pureza de los compuestos utilizados y limpieza de instrumentos, artefactos y lugar de trabajo, como ocurre normalmente en industrias de electrónica.

Tabla 3: Producción de foto-voltaje y fotocorriente de celdas solares con pigmento cristal violeta y electrolito NaF. Fecha: 6-10-14, 12:00 horas

Celda N°	Luz solar directa		Sombra	
	Volts	mA	Volts	mA
1	0,55	0,27	0,30	0,0
2	0,60	0,18	0,31	0,0
3	0,40	0,21	0,22	0,0
x	0,52	0,22	0,22	0,0
1+2	0,92	0,20	0,32	0,0
1+2+3	1,40	0,20	0,52	0,0

5. Conclusiones Generales

Entre los resultados más importantes de este trabajo cabe destacar la producción de vidrio conductor mediante vaporización de $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ en cámara de pirolisis y la introducción de la técnica de impregnación denominada drying drop, que contribuyen a un menor costo en la elaboración de celdas solares con pigmento.

Las celdas con pigmento cristal violeta, aquí descritas tuvieron una eficiencia de 0,05%, la cual podría ser mejorada si se adicionan otros pigmentos con absorción en otras bandas del espectro de luz visible, aumentando la captación de fotones. Otra forma es mejorar la solución de electrolitos adicionando más iones.

El principal factor limitante de estas celdas, su baja eficiencia, podría resolverse con nuevos datos sobre propiedades de los materiales a nanoescala, lo cual requiere de una descripción teórica de mayor complejidad. Si los datos son accesibles al público, el ensayo de nuevos materiales y su compatibilidad continuará en numerosos lugares en el mundo, no sólo en universidades, sino también en algunos colegios y talleres de investigadores independientes.

El impacto social de este trabajo está en que una manufactura más simple y de bajo costo motivará a otras personas a investigar y encontrar nuevas soluciones, como resultado inevitable del empoderamiento que los ciudadanos hacen de la información científico-tecnológica disponible. La proyección es lograr la factibilidad técnico-económica de centrales fotovoltaicas autónomas en las viviendas.

Los estudiantes que participaron en parte de este estudio enfrentaron problemas reales de investigación ligados a procesos productivos y con impacto social. Hay otras tecnologías que pueden ser abordadas de manera similar, lo cual será un aporte a los cambios educativos en enseñanza media.

Referencias

[1] A.K. Jana: Solar cells based on dyes (review). J. Photochem & Photobiol A: Chemistry 132: 1 – 17, 2000.

[2] B.E. Hardin, H.J. Snaith and M.D. McGehee: The renaissance of dye-sensitized solar cells (review). DOI: 10.1038/NPHOTON. 2012.22

[3] M. Gratzel et al.: Sequencial deposition as a route to high performance solar cells. Nature.499: 316-319. 2013.

[4] Solaronix S.A.: Dye solar cells for real. The assembly guide for making your own solar cells. 2011.

[5] Banco Mundial: Cobertura de electricidad por país. http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS. 2013.

[6] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía: Balances energéticos y energías renovables no convencionales. 2012.

[7] Greenpeace-Chile: Por una propuesta energética para Chile sin carbón. 96 págs. Greenpeace.org/chile. Santiago, 2010.

[8] American Physical Society http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm. 2009

[9] W. Smith: Light effects on selenium http://www.nature.com/nature/journal/v7/n173/abs/007303e0.html.1873.

[10] H. Hertz, Annalen der Physik 267, 983 (1887).

[11] M. Gratzel: Photoelectrochemical cells. Nature 414: 338 – 344. 2001

[12] M. Gratzel & A. J. McEvoy: Principles and applications of dye sensitized nanocristaline solar cells. Int'l PVSEC-2004.

[13] Tingli Ma et al.: Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. J. Photochem & Photobiol A:Chemistry 219: 188-194. 2011.

[14] M.H. Bazargan: Performance of nano structurated dye-sensitized solar cells…. Internat. J. of Chem Tech Res. 2 (1): 615 – 619. 2010.

[15] http:// www.theengineer.co.uk Insights into perovskite could lead to improved solar cells. Nov. 22, 2013.

[16] M. Pagliaro, R. Ciriminna and G. Palmisano: Flexible solar cells. ChemSusChem 1: 880-891. 2008.

[17] Teralab: Conductive glass. http://www.teralab.co.uk/experiments/.2010

[18] L. Stenhouse: La investigación como base de la enseñanza. Ed. Morata, Madrid. 1998

Agradecimientos

Al director Alex Martínez y profesora Viviana Urbina, del Colegio De Santa María, comuna de El Monte, RM.

Autor principal

Ángel Vargas L., profesor normalista, Lic. en Ciencias (U. de Chile), Magister en Gestión Educacional. Ha realizado investigación y docencia en varias universidades. Actualmente dirige un taller de ciencias en el Colegio De Santa María.

Journal of Technological Possibilism

Paper Info

Fecha de recepción: Noviembre 2014

Fecha de aceptación: Diciembre 2014

Cantidad de revisores: 3.

Cantidad de revisiones consolidadas: 1.

Total de observaciones: 13.

Índice de Novedad: 0,63.

Índice de Utilidad: 0,75.