

Perspectivas y retos científico-técnicos-productivos de América Latina y el Caribe para el desarrollo de la energía fotovoltaica

D. Stolik

Facultad de Física, Universidad de la Habana,

Investigador del Instituto de Ciencias de Materiales (IMRE) de la Universidad de la Habana.

Received 23 October 2012; accepted 12 February 2013

En esta contribución se analizan los diferentes aspectos de la producción de energía por procesos fotovoltaicos (FV), como una de las diversas formas de energías renovables. Se analizan las características generales, sus ventajas y desventajas en el contexto de las energías tradicionales. Se comentan los materiales implicados en la generación de los sistemas FV y su costo. Se analizan las tendencias de la disminución del costo de producción por kWh. Se proponen algunas acciones que pueden fortalecer la investigación y el desarrollo tecnológico de estos sistemas en América Latina y el Caribe.

Descriptores: Energía solar, paneles solares, investigación en energía solar en Latinoamérica y el Caribe.

In this contribution, the various aspects related to the generation of energy by photovoltaic processes, are analyzed. We discuss the general characteristics and the advantages of this source as compared to traditional methods for energy production. We comment about the characteristics of the materials involved in solar panels, and the reduction cost tendency for each kWh. We propose some actions to promote educational programs and collaboration research in Latin America and the Caribbean.

Keywords: Solar energy, solar panels, research and education in Latin America and the Caribbean.

PACS: 89.30.-g; 89.30.Cc

1. La independencia electro energética

En América Latina y el Caribe (ALyC) los recursos energéticos tienen una distribución disímil, grandes presas como Itaipú, el Guri, otras medianas y pequeñas; grandes yacimientos de petróleo y/o gas en Venezuela, México, Brasil, Bolivia; entre otros. Una parte de ALyC solo depende de combustibles fósiles importados, como Cuba y otros países del Caribe. Los costos de generación eléctrica a partir de fósiles se diferencian grandemente, el kWh más barato es en base al carbón fósil, seguido por el gas y continúa encareciéndose para el petróleo crudo, el fuel oil y el diesel. En dependencia de estas fuentes y otras (hídricas o nucleares) los costos de producción de la energía eléctrica varían. En todo EEUU, solo un 1 % de la electricidad se produce en base a petróleo, un 23 % en gas natural y un 45 % en carbón, en el Estado de Kentucky es mucho más barato el kWh que en California o Nueva York. Puerto Rico por depender en un 15 % del gas natural, otro 15 % del carbón y un 69 % del petróleo, el costo del kWh se duplica con relación al promedio de los EEUU y en Hawái que depende en un 76 % del petróleo es aun más caro. Imagínese el costo en países que dependen en más de un 90 % del petróleo para generar su energía eléctrica. En general, unos más, otros menos, todos los países de ALyC por muchos años, lamentablemente dependerán de los combustibles fósiles, los que tarde o temprano se agotarán, entonces: ¿Cuál será el papel de las Fuentes de Energías Renovables (FER)?

2. Las fuentes de energías renovables (FER)

La biomasa, la hidroeléctrica, la eólica, la fotovoltaica (FV), la termosolar, la geotérmica, la mareomotriz, en fin todas las FER se complementan; todas deben contribuir en próximos decenios, en la medida de su alcance a la conformación de una gran matriz estratégica electro-energética, que vaya sustituyendo paulatinamente a los combustibles fósiles. La suma inteligente de programas de corto, mediano y largo plazo que debería existir por cada una de la FER, podría conformar la gran matriz estratégica al respecto. Una vez definida la defensa de todas las distintas FER nos concentraremos en el papel que le corresponde específicamente a la energía FV, objeto de esta contribución

3. Bondades de la energía FV

La energía FV es renovable y está disponible en prácticamente todo el globo terráqueo. Sin partes móviles. Instantánea; por un lado llega radiación solar y por el otro sale electricidad. Modular; se aplica desde relojes y techos, hasta grandes plantas. Genera desde fracciones de W. hasta cientos de MW. Aditiva; se pueden ir añadiendo arreglos de paneles. De fácil traslado. De rápida instalación. Utiliza poca agua. Continúa abaratándose. Se almacena. Genera hidrógeno combustible al paso de la corriente por el agua. El área no es un proble-

ma. Es de las más benignas al medio ambiente. Los costos de operación y mantenimiento son bajísimos. Es versátil, Es silenciosa. Tiene pocos riesgos tecnológicos y de desastres.

4. ¿Es cierto que la FV tiene las siguientes características?

- i) No compite con las fósiles,
- ii) que continua siendo muy cara,
- iii) que solo su desarrollo se hace posible por las subvenciones,
- iv) que la conexión a red está reservada solo a los países ricos desarrollados,
- v) que su problema principal es la baja eficiencia,
- vi) que el área que requiere es un problema.

Estos aspectos los analizaremos a continuación. En realidad las dos desventajas reales de la energía FV son, la inversión inicial y el carácter intermitente en su generación, que también abordaremos.

i) ¿No compite la FV con las termoeléctricas fósiles?

Se dice que en una termoeléctrica la eficiencia puede ser del 37 % y en un panel FV no pasa del 18 % en los mejores casos. Esta forma de comparación no tiene en cuenta otros factores determinantes que influyen en los costos. Las termoeléctricas fósiles utilizan recursos acumulados muy lentamente por la naturaleza con bajísima eficiencia que estamos agotando en pocos cientos de años, combustibles que se explotan sobre la base de: prospección, disponibilidad, riesgo, extracción, beneficio, refinación, transporte, almacenamiento, envejecimiento en el tiempo, pérdidas en generación, transmisión distribución, operación, mantenimiento, inversiones periódicas por modernización, paro por roturas y reparaciones, accidentes, contaminación ambiental, calidad del fluido eléctrico, ¿Cuánto cuesta todo eso?, ¿cuánto cuesta?: limpiar la atmósfera, la atención médica a enfermedades producto de la contaminación, los accidentes recurrentes de derrame de petróleo. ¿Cuánto cuesta algo que va a escasear y después no habrá? Pero además de no tener en cuenta todo lo anterior, mientras el KWh producido por FV sigue disminuyendo, el KWh de los fósiles continua aumentando. En regiones de mayor radiación solar la FV compite con el de los fósiles más caros (crudo, fuel oil, diesel) y en algún momento dentro los próximos 10 años, competirá hasta con el carbón, que constituye cerca del 50 % de la producción mundial de electricidad; el más barato y contaminante de los fósiles.

ii) ¿Cuál continúa siendo más cara?

La energía FV se basa fundamentalmente en el desarrollo de la ciencia de materiales, en la física del estado sólido y de semiconductores, en la electrónica de potencia y en la automatización de los procesos industriales. En la medida que estas se han ido desarrollando, han influido sostenidamente en la disminución de los costos y el aumento de la producción. La evolución de los costos FV se analizan más adelante.

iii) ¿Es la FV la única que se desarrolla por subvenciones?

El argumento que se plantea en contra de la energía FV de que su desarrollo se debe a su subvención esconde el hecho que todas las fuentes de energía desde que nacieron están y continúan siendo subvencionadas. Hoy en los EEUU, las subvenciones de la energía en base a los combustibles fósiles son del orden de los 70 mil millones de USD al año. Obama anunció una propuesta para reducirlo en 36 mil millones de USD, pero debido a las rápidas quejas de las petroleras, los intentos para disminuir o eliminar estos subsidios han sido fallidos. Por su parte la energía nuclear ha sido capaz de sobrevivir gracias a los subsidios públicos. El Consejo Mundial para las Energías Renovables estima que la industria nuclear para su desarrollo, ha recibido alrededor de 1 TRILLÓN de dólares, 1 000 000 000 000 000 USD (Corregidos al valor actual) de dinero público en todo el mundo. Mientras se considera que el conjunto de todas las energías renovables ha recibido unos 50 000 millones de dólares [1]. En todo el mundo la energía eléctrica es un sector subvencionado. La energía FV está encaminada para estar en los próximos años libre de la mayoría de las subvenciones y que el costo de su KWh sea igual al promedio del KWh de las otras fuentes convencionales, las que además, probablemente continuaran siendo subvencionadas.

iv) ¿Es el problema principal de la FV su baja eficiencia de conversión?

La energía nuclear se aplica en la superficie terrestre no proviene del sol, un gigantesco reactor de fusión nuclear, por suerte bien lejos de la tierra y que nos brinda energía de varios tipos. De acuerdo con el tiempo de acumulación energética, se pueden clasificar en:

Fósiles: De lenta acumulación con bajísima “eficiencia” de energía (el gas, el carbón y el petróleo) que dura de cientos a millones de años y solo al cabo de mucho tiempo logra obtener una gran densidad de energía la cual estamos “quemando” rápido, por lo que no es renovable.

Contemporáneas: Como el viento, que se produce por su movimiento entre zonas de bajas y altas presiones atmosféricas, proceso de algunos días de duración. La hidroeléctrica, que se acumula durante un año en la época de lluvia. La biomasa, que puede acumular la energía solar desde un año (caña de azúcar) hasta varios o muchos años (árboles maderables). El periodo de duración de la acumulación energética de

las contemporáneas son lo suficientemente cortos para poder considerarlas renovables.

Instantáneas: Como la Solar Térmica, donde la acumulación dura menos de una hora en lo que la aplicación termina en un ciclo termodinámico específico. Por último la más instantánea de todas es la FV que convierte la energía solar en eléctrica en pequeñísimas fracciones de segundos. Hoy la eficiencia de laboratorio de algunos tipos de celdas (tándem de compuestos químicos del grupo III-V) sobrepasa el 40 %, pero para la industrialización de economía de escala existe un compromiso de optimización entre eficiencia y costo de producción. Hoy las eficiencias de los paneles FV comerciales (base silicio) superan el 16 % y sigue aumentando. Su conversión renovable instantánea a electricidad llega gratis desde el sol. Actualmente no es la eficiencia la limitante ni el mayor problema de la FV, la que no obstante seguirá aumentando.

v) ¿Es la conexión a red sólo para países ricos desarrollados?

Las aplicaciones FV aisladas o sea, no conectadas a la red eléctrica, fueron las primeras en ser desarrolladas en la superficie terrestre. Hoy cubren un amplio espectro de aplicaciones en lugares remotos donde no llega el servicio eléctrico de la red, como: bombeo de agua, viviendas, escuelas, consultorios médicos, iluminación, refrigeración, cercas eléctricas, teléfonos de emergencia, carga de baterías, estaciones meteorológicas, purificación de agua, protección catódica, indicadores de nivel de agua, apoyo a la navegación (boyas, faros), accionamiento de válvulas, medición de flujo gaseoso, transmisores, repetidoras de microonda, pizarras de señales, telecomunicaciones, interruptores de red eléctrica, entre otras.

Estas aplicaciones continúan siendo sumamente importantes; más de mil millones de habitantes del planeta viven alejados de redes eléctricas y la mayoría no tiene fluido eléctrico. La energía FV es una gran solución al respecto. No obstante, las aplicaciones aisladas ya no representan, a nivel mundial, el motor impulsor de la energía FV, tal como fue durante muchos años. **Es la energía FV conectada a red la que se ha convertido en el motor impulsor de la energía FV en el mundo.** Tiene la bondad, gracias a los inversores “inteligentes” de que el sistema FV toma de la red la energía eléctrica que le falta del suministro FV y lo inyecta a la red cuando le sobra. Ha derivado en gigantescas producciones para aplicaciones desde bajas a grandes potencias. En 1999 el 39 % de la producción FV de ese año se aplicó en sistemas conectados a red, en el 2004 fue de un 80 % y hoy un 99 % de la producción mundial anual se aplica en los sistemas conectados a red. Pero no ha sido en detrimento de las aplicaciones aisladas, todo lo contrario, han sido tan enormes los incrementos de la producción FV, que ha beneficiado grandemente las aplicaciones remotas y aisladas de todo tipo.

vi) ¿Es el área un problema?

Este argumento que todavía en ocasiones surge es también falso. Por ejemplo, en Cuba de 111 00 km², el 25 % de la electricidad actual se producirían en unos 15 km², diseminados en miles de sistemas en techos cubiertas de edificios, comercios fábricas, plantas en zonas áridas, espacios de sombra, laterales de carreteras, etc. En el planeta existen unos 50 millones de km² de desiertos (zonas de mayor radiación solar) y otras aéreas que están a disposición de la energía FV sin quitar espacio vital a cultivos y producción de alimentos. Otro ejemplo, solo teórico comparativo, es que en EEUU, país más consumidor y derrochador de energía eléctrica, sería suficiente el área del desierto de Mohave sembrada de sistemas FV y Termosolares para suministrar toda la energía eléctrica que consume

vii) ¿Causa problemas la intermitencia?

Es cierta esta desventaja. Pero son variadas las aplicaciones que permiten utilizarla. Se complementa con la explotación de otras variantes de FER. Es recomendable lograr que en la FV el consumo sea un tanto proporcional a la radiación solar. Esto se puede hacer corresponder en muchos casos, a más sol más calor y más energía se necesita para: frigoríficos, climatización. También en industrias que trabajen fundamentalmente en horario diurno o en muchas aplicaciones actuales de una “acumulación natural”, como son: trasvases y elevación de agua, por bombeo diurno, acumulación para irrigación o en otros sistemas de hidroacumulación. Todas estas aplicaciones conectadas a red, incluyendo las de correspondencia carga-radiación por acumulación natural son actuales. Como existe un gran debate de cómo será el futuro energético mundial a largo plazo, veamos cómo se podrán incorporar otras opciones a muy largo plazo, además del perfeccionamiento de nuevas formas de acumulación de la energía eléctrica, que están actualmente en fases de investigación, como son las baterías grandes y baratas.

a. Es posible hacer que la FV genere hidrógeno, un gran combustible que hoy es más barato obtenerlo de fósiles. Sin embargo, en algún momento de este propio siglo XXI, se logrará por la vía FV lo que permitirá utilizar la energía FV en el transporte y en otras aplicaciones independientemente del “día y la noche” y del “invierno y el verano”

b. Un segundo ejemplo, a futuro es la generación de electricidad en el espacio extraterrestre circundante a la Tierra, donde para el sistema FV no hay noche y genera las 24 horas a partir de una densidad de energía solar mucho mayor que la llega a la superficie terrestre. La energía eléctrica obtenida sería convertida y enviada a la tierra por microondas, para ser reconvertidas e incorporadas a las redes eléctricas.

c. Un ejemplo posible correspondiente a un futuro muy lejano, para siglos venideros, es en el caso

que se logre un sistema de transmisión eléctrica mundial con poca pérdida de energía por medio de sistemas superconductores, no lograda aún. Esto permitiría la posibilidad de que la mitad iluminada del planeta le proporcione electricidad a la otra mitad oscura.

5. Escenario actual de la energía FV

Son muchos los factores a tener en cuenta, pero hemos seleccionado un grupo que caracteriza la mayor parte del escenario FV actual y las tendencias:

- i) Ambiente mundial propicio.
- ii) Aumento descomunal de la producción mundial FV.
- iii) Predominio de la FV conectada a red.
- iv) Disminución de los costos en la producción de energía FV,
- v) Comienzo de la paridad en regiones de más sol.
- vi) Gran desarrollo tecnológico industrial automatizado.
- vii) El Liderazgo en la producción de energía FV en China.
- viii) El predominio industrial de las celdas FV de silicio.
- ix) El escaso desarrollo de la energía FV en ALyC

i) Ambiente mundial propicio a favor de las renovables.

Aspecto evidente, debido al aumento de la información y la divulgación en defensa del medio ambiente, en contra de: la destrucción del planeta, la contaminación que provocan los combustibles fósiles, su agotamiento y el aumento de sus precios, las consecuencias de los incidentes y accidentes nucleares, como el lamentablemente ocurrido en Fukushima. Estos gigantescos costos normalmente no se tienen en cuenta. Es en estas circunstancias y a pesar de los sólidos argumentos a favor de las energías limpias, que les toca competir a las FER y a la FV como parte de ellas

ii) Aumento descomunal de la producción mundial de celdas FV.

La producción mundial anual en Mw de celdas FV en MWp (Mega watt pico) ha sido la siguiente:

En 1980 se produjeron 3. En 1990 fue de 46. En el año 2000 fue de 287 y en el 2010 fue de 27,200

Ninguna tecnología ha crecido tanto como la basada en procesos FV, en el último decenio (mas de 90 veces). Para 2011 se pronostican mas de 30,000 MW, para el 2020 mas de 160,000 MW, equivalente a lograr en un solo año unas 18 plantas electronucleares de 1000 W de potencia.

iii) Predominio de la energía FV conectada a red.

Ya mencionamos que actualmente un 99 % de la producción mundial anual se aplica en sistemas conectados a red, cuyo escenario incluye y potencia la producción aislada remota, mientras que un escenario solo para aplicaciones aisladas no incluye a los clientes conectados a red. Hoy inversores de los sistemas FV sirven para ambos casos, así el sistema FV aislado puede seguir operando conectado a red cuando ésta se extienda. En Cuba ha sido espectacular el impacto social de los 9 624 paneles solares fotovoltaicos instalados en el país en sistemas remotos no conectados a la red, es una línea a seguir para el 4 % de los cubanos que viven donde el servicio eléctrico no llega, pero la suma de todos estos sistemas instalados no llega a 4 MW y el escenario futuro no pasará de pocas decenas de MW, mientras que el escenario a largo plazo en Cuba conectado a la red es de miles de MW para el 100 % de la población. La condición para el desarrollo de la FV conectada a red es que exista una concepción de generación distribuida, aplicado en los “bordes” de la red, que proporciona mayor fiabilidad del sistema, disminución de interrupciones, reducción de pérdidas por transmisión, mejor calidad de potencia, apoyo en horas de sobrecarga de líneas y transformadores y beneficio de la potencia reactiva.

iv) Disminución de los costos en la producción de energía FV.

Antes del año 1975 el Wp superaba los \$50 USD, en 1979 era menor de \$ 20 USD / Wp, y en la superficie terrestre aparecía la conveniencia de poder tener energía eléctrica en lugares remotos. En 1985 el costo era menor a \$10 USD y comenzaron los planes de conectarlos a la red. Aunque cara aun, con una producción mundial extremadamente pequeña, se vislumbraba que la disminución de los costos continuaría. Es importante diferenciar los costos minoristas y mayoristas del Wp, así como por el tipo de celdas de los módulos FV. Como la gran mayoría de la producción y el mercado FV se hace en base a celdas de silicio cristalino (mono y poly o multi), haremos referencia a sus precios intermedios. En septiembre del 2001 el precio promedio minorista “al detalle o al por menor” (retail price) era de unos \$5.90 (USD), pero era mucho menor para las compras mayoristas o en puerta de fabrica. En enero del 2009 el precio promedio minorista era de \$4.65; a partir de ese momento se aceleró el abaratamiento del Wp del módulo FV y en octubre del 2011 el precio promedio minorista era de \$2.65 el Wp, mientras que las ofertas minoristas más baratas y los precios mayoristas se podía comprar hasta en \$1.35 el Wp.

El pronóstico es de continuidad en la disminución de los precios, tendiente a lograr en el 2015, precios mayoristas de los módulos de \$1.00 el Wp (USD). En algún momento antes del 2020, el costo y el precio de los módulos estarán por debajo de \$1.00 el Wp. Lo anterior se basa en precios de “compra”, pero si un país o región logra producir todo o partes del sistema FV, entonces los costos son menores. Además,

de convertirse en exportadores, se puede llegar a lograr parte del autofinanciamiento de la generación eléctrica FV. Es sumamente importante para los países y más aun cuando cuentan con buen sol, como es el caso de ALyC, no ser solamente “consumidores” que compran todo, sino lograr convertirse también en “productores” de tecnología FV.

v) Comienzo de la paridad en regiones de más sol.

La comparación de las fuentes de energías debe hacerse en base al costo del KWh. **Paridad FV** se denomina al hecho que se da cuando los **costos y precios del KWh FV logra la competitividad con otras fuentes convencionales** de energía eléctrica sin ningún tipo de ayuda al consumidor. Un factor importante que influye en el costo del KWh FV, es el nivel de radiación solar del lugar y otro elemento es “con que o quien” comparas la FV, ya que la energía eléctrica más barata es en base al carbón fósil, que constituye un 50 % de la producción mundial, mientras que mucho más cara es la electricidad en base a petróleo (crudo, fuel oil o diesel), que constituye menos del 3 % de la producción eléctrica mundial. Lamentablemente para muchos países, sobre todo del tercer mundo, es el petróleo la principal fuente de electricidad, como es el caso de Cuba.

Hoy el costo del KWh FV, en dependencia del nivel de radiación solar y del desarrollo industrial FV que se posea, está en un rango entre el \$0.10 y \$0.40 y continúa disminuyendo. Actualmente es competitivo en regiones de mayor radiación solar y de producción de energía eléctrica en base al petróleo, o sea, que para estas regiones, como en gran parte de ALyC la paridad ya comenzó. En los países con menos sol se logrará la paridad antes del 2020, suponiendo inclusive, un aumento pequeño en el tiempo de los costos de las fuentes convencionales eléctricas, desde la generación básica, más “barata” (por ejemplo en base al carbón fósil, la más contaminante y productora de calentamiento global), hasta las plantas “pico” que son más caras. En los EEUU, según el recientemente anunciado programa FV “Sunshot”, la meta es lograr la paridad con el carbón en pocos años,

vi) Gran desarrollo tecnológico industrial automatizado.

La producción de economía de escala FV ha producido: equipos de mayores eficiencias, menores gastos de energía eléctrica, alta productividad, manejo de cientos y miles de obleas por minuto, alto rendimiento (yield), menor número de pasos de producción y procesos altamente automatizados. No obstante el grado de madurez alcanzado, las distintas tecnologías FV continuarán alcanzando mayores logros y perfeccionamientos.

vii) Consolidación en el liderazgo mundial de la producción de energía FV en China.

Las empresas líderes son las que muestran los niveles más altos y mejores tecnologías de producción, así como los menores costos y precios. Por lo general, estas empresas se especializan y diferencian; mientras que una muestra el mejor resultado en la obtención del silicio, otra lo hace en la producción de celdas, aunque la tendencia de las mayores empresas

es cubrir el ciclo completo. Es necesario tener muy en cuenta esas empresas en los análisis de factibilidad y competitividad, ya que ellas dictan las tendencias.

Por otra parte, las empresas “no líderes” pueden salir del mercado al no poder competir. Es impresionante el papel de China en la producción FV. Actualmente son líderes en costos y precios, factor importante en la disminución mundial de costos FV. En el año 2000 la producción FV mundial era solo de algo más de 200 MW, y la de China era insignificante. Sin embargo, ya en el 2009 alcanzaba el 38 % de la producción mundial con 4676 MW, en el 2010 el 47.8 % con unos 13000 MW y en 2011 superaron el 50 % mundial con cerca de 20 000 MW de celdas FV. Hoy, 4 de los primeros 5 productores y 12 de los primeros 20 productores mundiales son chinos. Unas 50 empresas chinas FV produjeron en 2011 más de 100 MW cada una. Por todo lo anterior se hace atractivo hacer alianzas FV de ALyC con China

viii) Predominio de las celdas FV de silicio.

La celda solar es el corazón del sistema FV. Hoy se producen y comercializan los siguientes tipos de celdas solares:

1. Silicio mono cristalino,
2. Silicio poli o multi cristalino,
3. Silicio amorfo (**a:Si**),
4. Cinta de silicio,
5. Cadmio Teluro (**CdTe**),
6. Cobre, indio, selenio (galio) (**CIS**).

Todos estos conforman el 99.2 % de los tipos de celdas FV que se producen y comercializan actualmente. Otros tipos de celdas son:

7. Compuestos **III-V** (GaAs, . . .), que se utilizan fundamentalmente en el espacio cósmico y en algunos sistemas de concentración.
8. Coloreadas (**Dye**),
9. Orgánicas,
10. Nano tecnológicas,

entre otras. Este otro grupo conforma hoy solo un 0.8 % de las celdas FV que se producen y comercializan hoy. Unas tecnologías más maduras, otras más incipientes, todas continúan investigándose y desarrollándose. La competencia vs. celdas cristalinas de silicio (mono y poli) está establecida, pero es fuerte. Es grande el salto en los últimos años en la producción de celdas de distintos tipos, por ejemplo:

CdTe. En 2006, 181 MW; 2007, 400 MW; 2010, > 1400 MW (5.3 % de la producción mundial); 2011 (pronóstico) > 2000 MW.

CIS. En 2009, 180 MW; 2010, 439 MW; 2011 (pronóstico), 1285 MW.

TABLA I. Producciones del 1999 al 2010 en % por tipos de celda

%	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Si mon	37.4	34.6	36.4	32.2	36.2	36.2	38.4	43.3	42.2	38.3	34.1	33.2
Si poli	42.1	48.2	50.2	51.6	57.2	54.7	52.3	46.5	45.2	47.7	46.9	52.9
CdTe	0.5	0.3	0.5	0.7	1.1	1.1	1.4	2.7	4.7	6.4	9	5.3
a:Si	12.3	9.3	8.9	6.4	4.5	4.4	4.7	4.7	5.2	5.1	6.1	5
CIS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.5	1.0	1.7	1.6
Si cinta	4.1	4.1	5.6	4.6	4.4	3.3	2.9	2.6	2.2	1.5	1.4	1.2
Otros*								0.1		0.9	0.8	

*Otros: III-V, Dye, Orgánicas, Nano

Los incrementos del Si-c, son también impresionantes en términos absolutos y en porcentaje (Ver Tabla I).

Si-poli. En 2009, 5,400 MW (46.9% de la producción mundial); 2010, 14,400 MW (52.9% mundial); 2011(pronóstico), > 20,000 MW.

El predominio tecnológico de las celdas de silicio cristalino se mantendrá por muchos decenios, debido a:

- Es superabundante; representa el 26% de la corteza terrestre.
- Lidera la producción de los últimos 10 años por tipos de celdas.
- Tecnología madura; más del 86% de la producción mundial de celdas es de SI-C.
- La Producción de SI Sog (grado solar) galopa de unas 3000 Ton. en el 2001 a mas de 145 000 Ton. en el 2011.
- Disminuye el gasto eléctrico para obtener 1 KG de Si puro: pasó de mas de 240 KWh/Kg a menos de 50 KWh/Kg.
- Disminuye el precio del Si Sog.
- Disminuye el espesor de las obleas de Si.
- Disminuye la cantidad de Si por celda.
- Presenta la menor diferencia entre las eficiencias de celda de laboratorio vs. industrial.
- Continúa la I+D del Si, tanto en laboratorio como en la industria.
- Continúa su evolución tecnológica vs. otros tipos de celdas.
- Presenta la mayor eficiencia de los tipos de celda de mayores producciones industriales.
- Continúa el aumento de la eficiencia de las celdas industriales a mas del 20%.

- La nanotecnología también mejora las celdas de Si-C.
- Presenta gran accesibilidad para ser producidas industrialmente.
- Las mayores inversiones continúan haciéndose en fábricas de materiales, celdas y paneles FV de Si-c.
- Se perfecciona la automatización industrial de celdas y paneles FV de Si.
- Las de Si-c conforman módulos muy duraderos, mas de 25 años.
- Se abaratará en un futuro también por el reciclaje del Si puro, vidrio, soportes, etc.
- La disminución del costo del módulo FV de Si-C continuará

ix) Escaso desarrollo y aplicaciones en América Latina.

La producción de celdas y módulos FV se concentra en Asia; más del 80% de la producción mundial (ver Tabla II):

TABLA II.

Región o país	2009		2010		2004	
	MW	%	MW	%	MW	%
China	4676	38	13000	48.7	51	4.1
Alemania	1850	15	2666	9.8	306	27.4
Japón	1544	12.5	2312	8.5	594	47.3
Taiwán	1503	12.2	3454	12.7		
Resto de Asia	1642	13.3	2203	8.1	54*	4.3
Malasia	784	6.4	1414	5.2		
EEUU	547	4.4	1265	4.6	142	11.3
Resto de Europa	543	4.4	816	3.3		
África y Medio Oriente	11	0.1	27	0.1		

Nótese que China pasó en la producción mundial, de un 4 % en el 2004 al 48 % en el 2010. Por otro lado, en ese mismo año el mercado de las aplicaciones de sistemas FV se concentró en Europa, curiosamente también en más del 80 % mundial, de acuerdo con la siguiente distribución: Alemania 42 %, Italia 21 %, Resto de Europa 18 %, EEUU 5 %, Japón 5 %, resto del mundo 9 %. Entre Europa, Japón y EEUU tienen el 91 % del mercado mundial, el resto del mundo solamente el 9 %, fundamentalmente Asia (China, India, entre otros). En los próximos años los porcentajes de EEUU, China, Japón, Australia, Corea del Sur e India aumentarán notablemente el mercado FV. Tanto en la producción como en el mercado y las aplicaciones, el aporte de América Latina es insignificante, a pesar del buen nivel de radiación solar que posee. En el año 2000 la potencia FV acumulada en el mundo era de unos **1450 MW y en el 2010 cerca de 40000 MW**, la mayoría en Europa, seguida de Asia, en Alemania (con 60 % menos de sol que Cuba) es hoy mayor a 16000 MW. En toda ALyC el total FV hoy instalado es apenas menor que 200 MW.

6. Costo de las componentes del sistema FV

El análisis lo concretaremos en los sistemas FV basados en silicio cristalino, por mostrar una tecnología madura y que, además, continúan mejorando sus parámetros característicos. El costo final de un sistema FV instalado y conectado a red está constituido por los costos parciales de producción de los elementos siguientes: silicio grado solar (Si sog), oblea virgen (wafer), celda solar, módulo, inversor, estructura (aluminio, acero), ingeniería de diseño, montaje, protección y otros. Cada uno depende de los costos de otros elementos que lo componen; por ejemplo, en el módulo (panel FV) intervienen: vidrio, láminas de EVA (etilvinilacetato) y de TEDLAR (fluoruro de polivinilo), marcos (aluminio), estaño, cableado, resinas y sellantes.

I. Costo del sistema FV por WATT pico

Las informaciones de las distintas empresas son disímiles; dependen de distintos factores, como nivel tecnológico, economía de escala, monto de las ventas, si son al contado o a crédito, etc. A partir del análisis y comparaciones, en la Tabla III se muestran rangos de costos parciales aproximados actuales por Wpico. Los más económicos corresponden a empresas líderes, que siguen las mejores prácticas productivas. La diferencia entre la columna de costo y la de precio es la ganancia; por cierto, bastante grande. La columna del porcentaje son promedios aproximados, que fluctúan eventualmente en un intervalo. No existe la empresa que sea líder en todas las partes de la cadena productiva. La tabla es sugerente para la determinación de factibilidades y de rutas críticas para el desarrollo integral FV en un país o región, que dictan posibles pautas para determinar prioridades y esfuerzos en cada momento.

TABLA III. Costos de los componentes de un sistema FV, por Wp

	COSTO \$ / Wp	PRECIO \$ / Wp	(+/-) 3 %
Si sog	de 0.25 a 0.35	de 0.45 a 0.52	13 %
Wafer (Panel)	0.25 0.35	0.35 0.45	12 %
Celda	0.20 0.40	0.35 0.55	13 %
Módulo	0.30 0.40	0.40 0.50	13 %
MODULO	0.95 1.50	1.55 2.05	51 %
Inversor	0.20 0.40	0.35 0.60	13 %
Aluminio	0.20 0.50	0.35 0.65	13 %
Ingeniería	0.15 0.30	0.25 0.45	10 %
Otros	0.10 0.25	0.15 0.50	13 %
BOS	0.65 1.35	1.05 2.00	49 %
TOTAL	De 1.65 a 2.95	De 2.65 a 4.05	100 %

II. El silicio SOG

El silicio grado metalúrgico (Mg-Si) se obtiene en hornos de arco eléctrico y posee una pureza del 96 al 99 % (promedio 98,5 %). Posteriormente la tecnología prevaeciente es convertirla en triclorocilano líquido y purificarlo en columnas de destilación después obtenerlo en reactores Siemens con purzas de 99.999999 a 99.999999999 % para dispositivos microelectrónicos y de 99.9999 para celdas FV (silicio grado solar, Si-sog). La producción del Silicio puro galopa: 40 t en 1980; 800 t en 1990; 2000 t en 2001 (20 % para la FV), 30000 t en 2007; 92000 t en 2009 (80 % para la FV), 145000 t en 2010 (90 % para la FV), Se pronostica: 200 mil en 2015 (> 97 % FV), 300 mil en 2030, >99 % FV. A mediados del 2008, debido a su gran demanda, el precio del Kg. de silicio sog sobrepasó los 300.00 USD, con grandes ganancias para sus productores. El costo bajó sustancialmente debido a el aumento de la producción, el aseguramiento del notable incremento de su demanda y la disminución del gasto eléctrico en su producción, sobre todo en los reactores Siemens (de > 200 KWh /Kg a < 50 KWh / Kg). El precio de venta se ha estabilizado en unos \$50.00/Kg pero debe continuar bajando más lentamente, para situarse en unos \$25.0/Kg en los próximos años, lo que se reflejará en mayor disminución del costo del Wp.

III. Wafer (obleas vírgenes)

Se obtienen a partir de los lingotes de silicio mono crecido por Czochralski o poli obtenido por HEM, cortado en partes más pequeñas, y al final en obleas delgadas por la tecnología de multihilos, cada vez en espesores más finos, que antes eran > 0.3 mm. En estos momentos los líderes tecnológicos logran industrialmente espesores de 0.16 mm, y < 0.1 mm a nivel experimental en laboratorios. La tendencia industrial en los próximos años es continuar disminuyendo hasta unos 0.1 mm, lo que constituye otro elemento que también seguirá reflejándose en la disminución del costo del Wp.

IV. La celda

El costo por Wp del procesamiento industrial de la celda solar de Si-c (no incluye el costo de oblea), continúa disminuyendo debido al aumento de la eficiencia de las celdas, automatización y la optimización fabril. Su producción es un aspecto tecnológico de la cadena de producción en que más se ha avanzado. Los líderes logran costos de producción menores a \$0,20/Wp; los que no logren esos niveles tendrán que salir del mercado. La disminución del costo del Wp por concepto de celda, será menor que las disminuciones que se producirán a cuenta de futuros costos del Si- sog y a la obtención de los wafers.

V. Los módulos

Es notable la disminución de los precios del Wp de los módulos (paneles) FV (incluye los costos parciales de: Si sog + wafer + celda + módulo), tendencia que continuará. Este factor es muy favorable, pero al mismo tiempo impone un reto a las producciones nacionales de módulos. Hoy es factible la compra al contado de módulos (paneles) FV a menos de \$1.30 el watt-pico, por lo que las producciones nacionales tienen que ser de costos similares y poder disminuir en un futuro en que se pronostican precios aún menores.

VI. Inversores

Los costos por Wp de los inversores han disminuido y decrece para mayor potencia. Los componentes (*hardware*) de un inversor constituyen su parte más barata (\$0.15/Wp para SMA y menos de \$ 0.08/Wp en otras empresas). La tendencia es a disminuir sus costos sobre la base de producirlos con las componentes mínimas necesarias, y obtener la excelencia con mejores sistemas de software. Los pronósticos indican que paulatinamente el precio de venta seguirá bajando hasta menos de \$0.20/Wp. para potencias mayores. Si el *hardware* se compra barato y el desarrollo del software es la parte de mayor valor agregado, se hace atractiva y factible posibles producciones futuras nacionales de inversores, lo que constituye otro elemento para la disminución del costo del sistema FV

VII. Estructuras de aluminio

En la medida en que el costo del módulo disminuye, el porcentaje del costo de las estructuras, como las de aluminio aumenta, para constituir una buena parte del costo final de los sistemas FV. Se prevé que en el futuro su costo tenderá a \$0.15/Wp. La cantidad de aluminio que se recupera como materia prima reciclada representa un gran ahorro de la energía que se requiere para producirlo a partir de la bauxita, y evita mayor contaminación de la atmósfera. Este es otro elemento para disminuir aun más los costos del Wp del sistema FV. En ALyC hay producciones de aluminio.

VIII. La ingeniería

El diseño y la instalación de los sistemas FV comprenden mas del 10 % de su costo total, una parte que no debe despreciarse en comparación con el resto de los factores. Las empresas en ALyC que poseen gran experiencia al respecto propician un aporte importante en la disminución del costo en divisas de las inversiones FV.

IX. Otros

Incluye costos como, sistemas de protección, cableados complementarios, bases de hormigón, transportación, gastos de operación y mantenimiento, que son pequeños, los más bajos en comparación con el resto de las fuentes generadoras de electricidad, y una gran parte de producciones nacionales.

7. Costos totales de los sistemas FV

Los costos parciales más bajos, por mejores prácticas de cada elemento constitutivo del sistema FV, lo ostentan distintas empresas productoras, que sumadas, en un ejercicio formal, se obtiene un increíble costo final (sin ganancia) del sistema FV instalado de \$1.65/Wp, que se comercializa a \$2.95/Wp, con una ganancia de \$1.00/Wp. Los costos y precios más altos corresponden a empresas que probablemente estén tratando de disminuir sus costos para no salir del mercado. En el 2010, la ganancia en toda la cadena de de producción mundial FV fue de unos 16 mil millones de dólares. Esto demuestra que mundialmente, la energía FV no es la excepción del resto de las fuentes de generación eléctrica, de comportarse más como “negocio”, que “necesidad”.

8. Costo del KWh fotovoltaico

El costo del **KWh FV** depende de:

1. Costo del Wp del sistema FV
2. La radiación solar utilizable in situ (teniendo en cuenta las pérdidas) y
3. Los años de duración del sistema FV.

Para determinar dicho costo se deben sumar los costos parciales por Wp de cada elemento constitutivo del sistema FV. De acuerdo con el análisis realizado por el autor, el costo de producción final (sin la ganancia) del Wp de todo un sistema FV debe estar actualmente en un rango entre \$2.00 y \$3.00. Para el cálculo correspondiente para, por ejemplo: si la radiación solar es de **1825 KWh/m²/año**, como en una gran parte de ALyC, teniendo en cuenta las distintas pérdidas, se puede fijar, con un amplísimo margen, la utilización real de la radiación solar en 1450 KWh/m²/año (**1450 KWh/m²/año = 1450** horas pico de 1 KWp al año).

Si la vida útil del módulo es 25 años (el perfeccionamiento de los encapsulamientos tiende a garantizar aún más los años de duración), entonces: **1450** horas durante **25** años de

vida del módulo = **36 250 horas pico y 36 250 horas generando 1 KWp de potencia = 36 000 KWh de energía.** SI el costo total del sistema FV instalado es \$ 3.00 USD / Wp, en términos de centavos por KWh son 300 000 centavos / kWp. Dividiendo el costo del KWp instalado (300 000 centavos/ KWp) entre el número de horas (36 250 horas) generando una potencia equivalente de 1 KWp. Entonces el costo sería de menos de \$ 0.09 de USD por KWh, sumando los gastos de operación, mantenimiento, y de costo de capital en caso de financiamientos externos a los productores, el costo del KWh FV sería aún menor de \$0.12. De realizarse producciones nacionales el costo sería menor aún.

Observación: Para dos sistemas de iguales costos del Wp: a) de idéntica radiación solar, si uno de ellos dura el doble de años que el otro, entonces su KWh costará la mitad y b) el KWh FV en Cuba sería un 60 % menor comparado con otro igual montado en Alemania, debido a la diferencia de radiación solar.

9. Costo actual del KWh en base al crudo de petróleo

Si convertimos a KWh los 5.71 Gigajoules que como promedio contiene 1 barril de petróleo crudo, obtenemos que el contenido energético calórico que contiene 1 barril será de 1586 KWh/barril. Suponiendo que la eficiencia promedio de la termoeléctrica sea del 35 %, obtenemos que por cada barril (35 % de 1586 KWh.) se producen, solo por quemar, unos 555 KWh (eléctricos) / barril. A \$105 el barril solo por quemar, se obtiene el costo del KWh, dividiendo \$105 entre 555 KWh, que serán de unos: \$ 0.19 / KWh. A este costo sólo por quemar, hay que añadirle los costos y gastos derivados de: Inversión inicial, transporte, almacenamiento, pérdidas por generación, por transmisión y distribución, operación mantenimiento, escapes, accidentes, modernizaciones periódicas, contaminación y destrucción del medio ambiente, paro y gastos por roturas y reparaciones. Si \$0.19 / KWh es el costo total, entonces el costo añadido al “quemado”, de ser por lo menos de \$0.04 / KWh., el costo hoy del KWh- petróleo sería de unos: \$ 0.23 / KWh que continuará encareciéndose debido a los incrementos del precio futuro del petróleo. Para el gas combustible y el carbón los costos son menores, por lo que la primeras sustituciones por FV corresponden al petróleo crudo, y más aun para el fuel oil y el diesel.

10. Ciencia y técnica

La estrategia científico-técnica-formación debe garantizar la permanente actualización tecnológica, de hoy, mañana y a más largo plazo. Además debe estar conformada por centros I+D que jueguen un papel importante como centros de referencia y de certificación de la calidad. En la estrategia C-T se deben escoger líneas de investigaciones que ofrezcan gran perspectiva, optimizando lo prometedor con las posibilidades reales de ser aplicadas en la práctica y que el esfuerzo a reali-

zar esté al alcance nuestro, teniendo en cuenta que deben responder a tecnologías de punta pero que sean accesibles. La investigación-desarrollo en temáticas FV son multifacéticas y hay que atenderlas en disímiles centros de I-D altamente especializados, que tengan la función general de mantener el motor del desarrollo ulterior FV, estos centros, en su mayoría existen en ALyC.

11. Diferencia entre laboratorio e industria

Es importante que en ALyC tengamos grupos de I+D FV, que logremos la colaboración nos complementemos y que aportemos a producciones concretas, en este sentido se debe también tener muy en cuenta la diferencia entre el laboratorio FV y la industria FV. El papel intermedio de de las plantas pilotos es fundamental al respecto, comparemos la información de la Tabla IV.

Los records de eficiencia de las celdas de laboratorio son hoy : 43 % de AsGa 28 % Si-c mono concentración, 25 % Si-c mono, 21 % Si-c poly, 19 % CISG, 17 % CdTe, 12 % Si-a, 11 % Dye (sensibilizadas), 6 % Orgánicas. Las industriales son menores.

12. La accesibilidad tecnológica

Para lograr mayor independencia energética, existen dos factores a tener en cuenta. Primero, explotar las fuentes de energía con que cuenta el país; y segundo, contar con producciones tecnológicas propias para explotar las fuentes primarias de energía. La accesibilidad a una tecnología debe ser un factor de primerísimo orden a tener en cuenta a la hora de las decisiones.

Para ejemplificar, en una oblea de Si-c mono donde caben mas de 300 chips micro electrónicos, en cada chip se logra

=====
 TABLA IV.
 =====

Laboratorio FV	Industria FV
Producciones ínfimas	Producciones masivas
No importa el tiempo utilizado	El tiempo utilizado es fundamental
Procesos por lotes (BATCH)	Procesos continuos automatizados
No importa el número de pasos	Menos pasos de producción
Áreas muy pequeñas	Áreas mientras más extensas mejor
Poco material	Mucho material (economía de escala)
No importa cuántas veces sale mal	Es determinante salir bien (alto yield)

=====

hoy cerca del millón de transistores equivalentes, en total decenas de miles de millones de transistores equivalente, mientras que en una oblea de similar área se destina un solo dispositivo FV, mientras más grande mejor, esta última, aunque también puede ser compleja, sin duda es más accesible y posible de desarrollar. Pero si además se cuenta con las fuentes primarias, por ejemplo el sol, entonces aumenta sensiblemente la utilidad de apostar por la decisión.

13. Posible objetivo FV para America Latina

“Lograr el desarrollo un programa FV regional integral, de producción y aplicaciones FV, paulatino de corto a largo plazo, conectado a red. Que defina competencia con fuentes fósiles y nucleares de energía eléctrica e ir convirtiendo a la región en una potencia solar que tribute a las necesidades de los países latinoamericanos.”

Para ello ALyC, sus distintos países se complementan por contar con los recursos primarios necesarios, como son: obtención del Si-sog en lugares de energía eléctrica barata (en sus hidroeléctricas), vidrio plano texturado de alta transparencia, materiales encapsulantes (hoy a partir de la petroquímica), aluminio y sus perfiles, estaño para los contactos, cobre para los cableados, diseño, ingeniería y montaje, entre otros aspectos.

Todo lo anterior no es fácil, requiere de comprensión, promoción, acuerdos, voluntad, inversiones, de: gobiernos factores que toman decisiones, organismos regionales, empresas, entre otros. Para comenzar los centros de I+D con que cuenta la región en temáticas potenciales ligadas a la energía FV podrían establecer una Red y fundar además una Asociación Regional FV de ALyC para el desarrollo de la energía FV que aglutine los distintos elementos que tributen a este objetivo, con argumentos y estudios de factibilidad al respecto.

-
1. Scheer H. (2004), *Nuclear Energy Belongs in the Technology Museum*, WRCE, Update, 30 de September de 2006.