

**ARTÍCULO ORIGINAL**

**La energía FV: oportunidad y necesidad para Cuba**

**PV Energy: Opportunity for Cuba and Some Related Economic Aspects**

**Daniel Stolik Novygrad**

Facultad de Física. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales (IMRE),  
Universidad de La Habana, Cuba.

**RESUMEN**

En este artículo se presenta un análisis de varios aspectos relacionados con la energía fotovoltaica (FV), como el medio ambiente, la producción, los mercados, los costos, el predominio de las celdas cristalinas de silicio (Si-c), los análisis económicos y los pronósticos de la energía FV. Se caracterizan los componentes de los sistemas FV y la continuación de la reducción en la tendencia de los costos del kWh FV vs. kWh fósil. Finalmente, se analizan y proponen acciones de tipo económicas para promover un programa FV para Cuba de corto a largo plazo.

Palabras clave: costos de kWh eléctrico, energía solar FV, oportunidades de la FV, paneles solares, penetración FV, programa FV.

**ABSTRACT**

Various aspects are analysed related to the photovoltaic energy, namely: environmental aspects, production, markets, costs, crystalline silicon solar cells (c-Si) progress, economic analysis and forecast of photovoltaic (PV) energy. The paper comments on the characteristics of the components for PV systems, the reduction cost tendency for each kWh FV vs. kWh fossil. Some economic actions are suggested to promote a national PV program in Cuba.

Keywords: PV solar energy, solar panels, PV opportunity, kWh electric cost, PV penetration, PV program.

**Introducción**

Cuba no tiene independencia electroenergética. La importación de combustibles fósiles en USD, de la que por muchos años dependeremos, es mayor que la de los alimentos (Stolik, 1993). Con el paso del tiempo, las fuentes renovables de energía (FRE) deben desempeñar un importante papel para cambiar paulatinamente la situación. En Cuba hay varias posibilidades con este propósito: la biomasa cañera, la energía eólica, la hidroenergía y la energía fotovoltaica (FV). Todas las FRE se complementan; no obstante, responden a tecnologías muy diferentes, por lo que debe existir un programa específico de corto, mediano y largo plazo para cada una de ellas, con el fin de que queden integradas en una estrategia que defina una gran matriz energética que tienda a la disminución e, inclusive, a más largo plazo, a la

eliminación del componente fósil en la generación eléctrica. A continuación, nos referiremos al aporte de la energía FV.

### **La energía FV y el medio ambiente**

En el cálculo de costos de la generación eléctrica en base a combustibles fósiles, lamentablemente no se tiene en cuenta los daños ambientales, entre ellos: el precio que tiene lo que la naturaleza acumuló con bajísima eficiencia durante millones de años; el costo de recuperación del ecosistema alterado y la atención a enfermos por la contaminación. Por otro lado, una instalación FV de 1 kW evita la emisión promedio de los combustibles fósiles a la atmósfera de más de 100 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ahorra unos 400 l de agua cada mes (Nieuwlaar y Alsema, 1997). La energía solar FV no produce emanaciones nocivas durante los años de funcionamiento, en tanto los residuos contaminantes durante su fabricación se someten a controles; pero, aun no teniendo en consideración los costos ambientales, actualmente la energía FV compite económicamente en costos con los combustibles fósiles, elemento a favor de dicha energía.

### **Ventajas y desventajas de la energía FV**

Como ventajas (Stolik, 1993) podemos señalar que la energía FV:

- es renovable, disponible en todo el planeta, instantánea –de radiación solar a electricidad– sin partes móviles, modular;
- se aplica desde en un reloj, techo y hasta en una gran planta FV;
- genera desde fracciones de W y hasta cientos de MW;
- se traslada fácilmente;
- se instala rápidamente;
- utiliza poca agua, continúa abaratándose;
- es almacenable;
- participa en la generación de hidrógeno combustible;
- posee los costos menores de operación y mantenimiento;
- es versátil, silenciosa;
- tiene menos riesgos tecnológicos y
- provoca menos desastres naturales.

La energía solar que llega a la superficie terrestre es 10 000 veces mayor que la que se consume en todo el planeta, y la generación eléctrica FV posee la mayor densidad energética media global, 170 W/m<sup>2</sup> de todas las fuentes renovables de energía (FER) (Aubrecht, 2012). Se están desarrollando programas de reciclaje para después de su vida útil (de la energía FV) (entre 25 y 30 años), que además recuperan económicamente una parte importante de la inversión inicial (McDonald y Pearce, 2010).

Como desventajas, la energía FV:

- presenta una baja eficiencia, la que ha ido y seguirá aumentando; hoy no es el problema principal;
- tiene un alto costo que ha ido y continuará descendiendo;

presenta intermitencia (generación solo diurna), aspecto que limita la penetración FV pero que también ha ido aumentando por acumulación eléctrica –como en los sistemas remotos–, al realizar una correspondencia de la carga con la radiación mediante la acumulación natural, al hacer más «inteligentes», entre otros factores, la gestión de la red eléctrica (Stolik, 2013d).

### **Tasa de retorno energético FV**

Se ha dicho que la energía que se consume para fabricar las celdas y módulos FV es mayor que la energía eléctrica que genera durante toda su vida útil. Esta afirmación es falsa; hoy los módulos FV recuperan la energía para su fabricación en un periodo comprendido entre 6 meses y 1,4 años; producen electricidad limpia durante más del 95 % de su ciclo de vida, actualmente de unos 25 años con tendencia de incremento a 30 años (EPIA, 2013). El criterio para determinar los 25 o 30 años de vida útil del módulo FV es cuando su eficiencia inicial ha disminuido en un 20 %, o sea, que todavía generaría electricidad con una eficiencia del 80 % en relación con la inicial, aunque económicamente es necesario tener en cuenta que después de 25 o 30 años los módulos nuevos para la época tendrán eficiencias iniciales mayores y costos menores que los de sus predecesores (25 a 30 años atrás).

### **El escenario FV mundial actual**

Hoy hay un ambiente global propicio para las FRE, un aumento significativo de la producción mundial FV así como una fuerte disminución de sus costos; predomina en más del 99 % la energía FV conectada a la red eléctrica; se logra la paridad del costo del kWh FV con el de la red convencional; hay un gran desarrollo tecnológico industrial automatizado y China consolida su liderazgo mundial FV; hay un predominio industrial de las celdas FV de silicio cristalino (Si-c), un escaso mercado e insuficientes instalaciones FV en América Latina y Cuba (Stolik, 2013a).

### **El sistema solar FV y sus componentes**

Un sistema FV (SFV) instalado consta de una celda solar «corazón del sistema», un módulo o panel, un inversor que convierte la corriente directa en alterna, un movimiento de tierra, un montaje de estructuras metálicas, soportes en techos y cubiertas, un diseño, operación y mantenimiento, una depreciación, entre otros gastos menores.

La mayoría de las celdas y módulos que se producen son de Si-c, y constan de:

- silicio grado solar, el cual debe ser puro;

- obleas (Wafers), cortadas de los lingotes de Si-c;
- celdas FV, procesamiento de obleas junto con otros insumos para la obtención del dispositivo FV, y
- un encapsulamiento final en paneles o módulos.

El SFV, finalmente, precisa de otros elementos para su instalación y funcionamiento, que se conocen en el argot FV del inglés como BOS (Base of System) y que denominaremos «resto del sistema», elementos que veremos más adelante (Stolik, 2012a).

### **La celda FV**

La celda FV es el dispositivo fundamental donde la energía solar se convierte en eléctrica. En los inicios constituía la mayor parte del costo del SFV pero ha ido cambiando notablemente debido a las mejoras tecnológicas, el aumento de eficiencias y el paso a una economía de escala.

### **Aumento mundial de la producción de celdas FV**

La tabla 1 muestra cómo el tiempo de la producción de celdas FV se ha multiplicado diez veces a partir del primer MW, obtenido en 1978.

Ninguna tecnología energética ha crecido con ritmo similar. Entre los años 2001 y 2012 hubo un crecimiento exponencial de la producción de energía FV; se ha duplicado aproximadamente cada dos años (Stolik, 2013c). Ha sido tan rápido su incremento que la duplicación de las producciones tendrá que suceder en un número superior de años.

En la tabla 2 se ofrece el aumento aproximado de la producción de las celdas FV en MW y su incremento en por ciento anual, entre el 2000 y el 2012, a escala mundial.

Para 2014, la producción de celdas debe estar por encima de los 45 000 MW y continuará aumentando; no obstante, debido a la economía de escala alcanzada, lo hará en por cientos menores, pero en grandes incrementos absolutos.

### **Tipos de celdas solares fundamentales**

La celda FV es el corazón de un sistema FV. La historia del desarrollo FV ha estado muy ligado a la disminución de sus costos, por lo que ha sido muy importante el tipo de celda que se debe producir desde el punto de vista económico. Las celdas FV que han dominado han sido las de Si-c, entre otras que detallamos a continuación:

- de Si-c hay tres tipos, 1.- monocristalino, 2.- policristalino (multicristalino) y 3.- cinta de silicio. Las celdas de Si-c 1 y 2 componen la mayoría del mercado FV;

- de TeCd (teluro de cadmio), CISG (cobre, indio, selenio, galio) y silicio amorfo (Si-a), que son las más importantes de capas delgadas;
- de AsGa (arseniuro de galio) que tiene las mayores eficiencias (récord en el laboratorio actual de 44,7 %), pero son extremadamente caras y se utilizan mayormente en el espacio;
- las orgánicas, las nanotecnológicas, entre otras (Stolik, 2012a,b).

Para demostrar cuantitativamente las celdas que predominan en el mercado, reflejamos en la tabla 3 el comportamiento aproximado porcentual en los últimos 15 años. Es necesario tener en cuenta que las disminuciones en por ciento no implican disminuciones en volúmenes de producción, debido al fuerte incremento anual de dichas producciones.

Como se advierte en la tabla anterior, la producción de celdas en base a Si-c (poli) ha aumentado sostenidamente. Para el año 2014 el pronóstico es que constituya el 92 % de la producción total, el monocristalino un 30 % y tenga un sorprendente 62 % el multicristalino (poli). Del 62 % multicristalino pronosticado, un 35 % se producirá en el año 2014 con tecnología estándar, y un 27 % con nuevas tecnologías de polisilicio más avanzadas, como serigrafía doble, implantación iónica, emisores selectivos, metal-wrap-trough (MWT), pase de los contactos delanteros a la parte posterior de la celda y pasivación de la superficie posterior de la celda; lo que denota la continuación de las investigaciones científico-técnicas (C-T) en celdas de Si-c. Por ejemplo, la poderosa Empresa FV China JA Solar anunció, recientemente, que ha logrado una celda comercial de 156 mm x 156 mm de polisilicio con un 19 % de eficiencia, que pondrá en producción en el segundo semestre del año 2014.

### **El módulo FV**

La combinación de celdas conectadas en serie y en paralelo (arreglo de celdas) se encapsulan fundamentalmente, con láminas de EVA (etilvinil acetato) por ambos lados, vidrio frontal, lámina de Tedlar (marca registrada de DuPont) posterior al EVA, marco de aluminio, contactos eléctricos y los sellantes. Estos insumos para la producción del módulo FV dan la posibilidad de integrar la tecnología FV con las necesidades de insumos en otras industrias como la del vidrio, la petroquímica, la del aluminio, acero y la de reciclaje.

### **Productores mundiales de celdas y módulos**

Hoy el líder mundial de celdas solares es China con un 60 % de la producción mundial. Cinco empresas chinas de celdas: Yingli, Trina, Jinko, ReneSola y CSI producen el 32 % de la producción mundial y, de ellas, Yingli es la que mayor aporta con el 10 %.

### **Razones de la disminución de costos de módulos FV**

El silicio de pureza grado solar estaba en el 2008 a > 300 USD/kg; ha disminuido bruscamente hasta unos 20 USD/kg. El gasto eléctrico de > 200 kWh/kg que se

requería para obtener 1 kg de silicio puro ha disminuido actualmente a 35-40 kWh/kg. El espesor de la oblea de silicio ha disminuido de unas 350 micras a 160. Para el año 2020 se pronostica que el espesor será de unas 100 micras. La cantidad de silicio por celda ha pasado de unos 13 g/Wp a 7 g/Wp y continúa disminuyendo. En 1970 el costo de las celdas solares se estimaba en 100 dólares por vatio (\$/Wp) (Perlin, 1999). El precio del BOS o del resto de elementos de una instalación fotovoltaica supone ahora un mayor costo que los propios paneles. El costo de producción del módulo FV en el primer trimestre del año 2011 (hace 3 años), era aproximadamente en USD 1,20 por W; ya en el tercer trimestre de 2013 las empresas líderes lograban un costo del orden de 0,50 USD por W. Empresas chinas como Jinko, Trina, Yingli y ReneSola plantean costos de producción del módulo de Si-c de 0,36 USD/Wp para finales de 2017.

En la tabla 4 veremos la disminución de los precios de venta de los módulos FV.

### **EL resto del sistema FV**

El costo del módulo FV hace 20 años podría constituir más del 75 % del empleado en el SFV. Hoy está por debajo de un 40 %, por lo que los elementos del BOS, o sea, del resto del sistema FV, conformado por inversores, estructuras metálicas, cableados, obra civil y diseños, han aumentado su costo relativo, aunque también han disminuido, pero en una progresión menor que la de los módulos. El precio depende del país donde se instala; por ejemplo, hoy, en Alemania, es cerca de la mitad del costo que en los Estados Unidos. En un estudio de Stolík (2013c) se denota que, para las condiciones de Cuba, la inversión inicial puede fluctuar en alrededor de un 70 % (30 % módulos y 40 % el BOS) de la inversión total, donde el 30 % restante incluye los costos posteriores durante los años de vida del SFV (salarios, operación y mantenimiento, cableado, costo de capital, créditos, depreciación).

### **Instalación mundial FV**

La instalación mundial se ha concentrado en los países de Europa, con un incremento actual y en los próximos años en China, Japón y EE. UU. Los países de América Latina y el Caribe, no obstante una activación en los próximos años, muestran una bajísima cantidad de instalaciones FV a pesar de poseer una mejor y distribuida radiación de energía solar. En la tabla 5 se muestra el impresionante aumento de las instalaciones FV anuales a nivel mundial en términos de GW, o sea, en miles de MW.

En Europa, durante 2011 y 2012, las instalaciones FV superaron a la energía eólica y en 2013, mundialmente la energía FV ligeramente superó a la eólica. La potencia total acumulada de instalaciones FV en el mundo ascendía a 7,6 GW en 2007, 16 GW en 2008, 23 GW en 2009, 40 GW en 2010 70 GW en 2011. En 2012 superaba los 100 MW y a finales de 2013, se habían instalado en todo el mundo cerca de 140 GW de

potencia fotovoltaica (Prabhu, 2013). Se pronostica: 190 GW para 2014, 265 GW en 2015, 340 GW en 2016 (EPIA, 2013) y, a más largo plazo, 500 GW en 2020, 1 800 GW en 2030 y 20 000 GW en 2050.

La energía eléctrica generada por la fotovoltaica a nivel mundial, equivalía en 2012 a unos 110 000 millones de kWh (EPIA, 2013), suficiente para abastecer a más de 20 millones de hogares.

### Países con más instalaciones FV acumuladas en el 2013

Con más de 10 000 MW instalados se encuentran en orden descendente:

- Alemania: en 2010 más del 80 % de los 9 000 MW de FV que tenía entonces, se habían instalado sobre tejados (Gipe, 2010). Hoy posee 35 600 MW (Photon, 2014) y se ha planteado como objetivo producir el 35 % de la electricidad mediante energías renovables en 2020 y alcanzar el 100 % en 2050. Posee más de 1 500 000 puntos de SFV conectados a la red eléctrica.
- China: su ritmo ha crecido más rápido en los últimos tres años (BNEF, 2014), con una de las mayores industrias del país, productor mundial de celdas y módulos FV más importantes; cuenta con unas 400 empresas FV. A comienzos de 2014, se hizo público que China tenía cerca de 20 GW de potencia FV, tras instalar 12 GW en 2013 (Martin, 2014) con previsiones adicionales de añadir hasta 14 GW más durante 2014 (PV Magazine, 2013a). La potencia total instalada en China puede crecer hasta los 47-66 GW en 2017 (EPIA, 2013). La previsión para 2020 es de unos 100 GW. Fuentes del gobierno chino han afirmado que la energía FV presentará precios más competitivos que el carbón y el gas, con ello tendrá una mayor independencia energética a finales de esta década.
- Italia: presentó 19 000 MW en 2013 (Prabhu, 2013). Debido a la generación FV, varias centrales de gas pueden operar a mitad de su potencial durante el día. El sector ha facilitado trabajo a unas 100 000 personas, especialmente en el sector del diseño e instalación de dichas plantas solares. Durante 2012, la producción FV proporcionó el 5,6 % del total de la energía consumida en el país durante el año (PV Magazine, 2013b).
- Japón: La potencia total FV instalada en agosto de 2013 superó los 10 GW, desplazado casi en su totalidad al segmento residencial (97 % de la capacidad instalada en todo el país hasta 2012), tendencia que se está invirtiendo en instalaciones FV comerciales. Actualmente, tiene 15 700 MW instalados (CleanTechnica, 2012).

- EE. UU.: A mediados de 2013 superó los 10 GW de potencia FV (Montgomery, 2013). Actualmente, posee 11 933 MW instalados. En California una legislación requiere que el 33 % de la electricidad del Estado se genere mediante FRE para finales de 2020. Las empresas están adquiriendo grandes superficies con la intención de construir plantas mayores FV de varios cientos de MW.

Alemania, China, Italia, Japón y EE. UU. son los 5 países que sobrepasan los 10 000 MW instalados. Los países que, por su orden en MW de potencia instalada, le siguen en orden descendente son:

- España con 4 679 MW (en 2008 estaba en el segundo lugar);
- Francia con 4 598 MW;
- Australia con 3 100 MW;
- Bélgica con 2 779 MW;
- Reino Unido con 2 706 MW;
- Grecia con 2 523 MW;
- India con 2 180 MW;
- Rep. Checa con 2 085 MW;
- Bulgaria con 1 066 MW;
- Corea del Sur con 1 006 MW.

Con menos de 1 000 MW y más de 200 MW están:

- Canadá con 831 MW;
- Holanda con 665 MW;
- Eslovaquia con 523 MW;
- Austria con 418 MW;
- Suiza con 416 MW;
- Dinamarca con 394 MW;
- Tailandia con 359 MW;
- Ucrania con 326 MW;
- Israel con 250 MW;
- Portugal con 278 MW;
- Taiwan con 206 MW;
- Eslovenia con 200 MW.

Entre los 26 países con mayor volumen de instalaciones FV, 17 son de Europa, 7 de Asia-Oceanía, 2 de Norteamérica. Ningún país de América Latina y el Caribe está entre los 26 relacionados y los 33 países de la CELAC en diciembre de 2013 sumaban entre todos, a pesar de una animación actual, menos de 200 MW (Stolik, 2013a).

### **La FV en Cuba**

En Cuba, hasta el año 2012, las instalaciones FV sumaban en total < 3 MW en unos 9 000 SFV de baja potencia, casi todas remotas, no conectadas a red, en

lugares aislados donde no llega la red eléctrica (escuelas, consultorios, casas y centros de cultura) con una gran repercusión social. Pero, el motor impulsor del desarrollo mundial FV descrito ha sido la energía FV conectada a red. En nuestro caso la red eléctrica llega a más del 95 % de la población, por lo que es la vertiente que puede significativamente dar su aporte para disminuir la quema de combustible fósil en función de la generación eléctrica y puede tributar, paulatinamente, a una independencia electroenergética, junto con las otras FRE. En 2013, se dio un buen salto al instalarse 11 MW en parques FV, conectados a red, tendencia que debe ir aumentando de acuerdo con la voluntad existente y con los planes aprobados por el país, relacionados con las FRE.

### **Costo de producción del kWh fósil en Cuba**

Haremos una valoración aproximada del costo del kWh fósil en Cuba, que se diferencia de otros países por generar gas cubano, crudo cubano, fuel oil importado y diesel. Una estrategia debe comenzar con la sustitución de las más caras, como son las del fuel oil y el diesel (la más cara). Si se conoce el contenido calórico en términos de kWh de un barril de combustible fósil (aproximadamente, promedio de 1 586 kWh/barril), el costo del barril y su eficiente conversión en electricidad, entonces se puede calcular, fácilmente, el costo del kWh, pero sería exclusivamente debido a la propia «quema» del combustible. En la tabla 6 se expresan, como ejemplos, los costos en centavos de USD por kWh, de acuerdo con dos eficiencias termoeléctricas (30 % y 35 %) y varios costos del barril de combustible en USD (Stolik, 2012c).

Recalamos que al costo expresado solo por quema del combustible hay que agregar los costos y gastos por inversión inicial, transporte, almacenamiento, pérdidas en generación, pérdidas en transmisión-distribución, operación y mantenimiento, accidentes y escapes, inversiones periódicas por modernización, paros y gastos por roturas y reparaciones, paros por ahorros de «combustibles», salarios, costos de capital, asesorías, contaminación y daños al medio ambiente, imprevistos, entre otros.

Hay que destacar que si se sabe correctamente solo lo que vale el kWh por combustible fósil, se puede precisar la diferencia del costo del kWh FV y el fósil, así como también en cuántos años se recupera la inversión FV por el valor monetario del combustible fósil evitado. El precio de la producción del kWh FV se calcula dividiendo el costo total del sistema FV entre los kWh que genera dicho SFV durante su vida útil. Ese costo total incluye el de la inversión inicial más los gastos en que se incurren durante los años de funcionamiento del SFV. El costo inicial es mucho mayor que el posterior que incluye la operación, el mantenimiento, la depreciación, los salarios, los costos de capital y de créditos.

Para calcular los kWh que genera dicho SFV, es necesario conocer la potencia promedio diaria de un SFV, que depende de: a) la potencia de la radiación solar promedio del lugar (que cambia en función de la geografía), y b) la eficiencia del

módulo FV en cuestión. Este cálculo se simplifica, por un lado, con la introducción del parámetro «potencia pico» (Wp) del módulo, que no es más que la potencia eléctrica producida y medida a la salida del módulo FV cuando incide perpendicularmente en su entrada una potencia solar equivalente de 1 000 W por m<sup>2</sup> (1 kW/m<sup>2</sup>) y, por el otro lado, con el número de horas promedio que genera el módulo durante su vida útil (Stolik, 2011a). Por ejemplo, la generación solar promedio que recibe Cuba durante un año es de unas 1 820 horas de un kW por m<sup>2</sup>, o sea, un promedio de unas 5 horas diarias de un kW/m<sup>2</sup>. Debido a las pérdidas originadas por distintos factores, se hace necesario disminuir dicho número de horas. Para la radiación solar de Cuba, un SFV debe generar como promedio aproximadamente unas 1 500 horas al año, que constituyen unas 37 500 horas durante 25 años. Por ejemplo, si un conjunto de módulos FV suman 5 000 W (5 kWp), entonces, los kWh que genera durante su vida útil será de 5 000 Wp x 37 500 h = 187 500 kWh.

Si suponemos, además, que el costo total de 1 kW FV es de 3 000 USD (que consideramos actualmente caro), entonces 15 kWp serían 15 000 USD. Al dividir 15 000 USD entre 187 500 kWh, obtenemos que el kWh tendría un costo de 8 centavos de USD. El costo del kWh fósil en base a fuel oil y diesel debe superar los 0,21 USD, pero en cualquier otra variante la diferencia con el kWh FV es sustancial (Stolik, 2011b).

### Tiempo de recuperación de las instalaciones FV

El costo del kWp FV, C (USD/kWp), dividido por los kWh que genera 1 kWp FV al año (kWh/(kWp por año)) y también dividido por el costo de 1 kWh fósil (USD/kWh), nos da el número de años en que se recupera la inversión por costo evitado de combustible fósil.

Por ejemplo, si tenemos que:

- el costo del kWp FV es de 3 000 USD/kWp (tomando hoy un precio elevado).
- el número de kWh que genera 1 kWp FV al año es de 1 500 kWh/(kWp por año).
- el costo de 1 kWh fósil es de 0,25 (USD/kWh) (que debe ser mayor).

Entonces, el número de años en que se recupera la inversión, debido al costo evitado de combustible fósil, será de unos 8 años.

Con el transcurso del tiempo, el valor monetario FV seguirá disminuyendo y el del fósil aumentando; por ejemplo, si somos capaces de que para el año 2020 ese valor FV total en Cuba esté en unos 0,06 USD (que actualmente se logra en China) y el del fósil en 0,30 de USD el kWh (menor que el costo actual en México), entonces dicha recuperación de la inversión, debido al costo evitado de combustible fósil, sería solamente de unos 3 años y medio.

### Aspectos primordiales para un programa FV en Cuba

Junto con las oportunidades que ofrece la energía FV para Cuba en términos de menores costos del kWh, el aumento paulatino de la soberanía electroenergética, el incremento de la industrialización del país, entre otros aspectos positivos, coexisten elementos que representan retos para lograr un desarrollo más audaz de la energía FV en Cuba, como son: mayor grado de penetración FV a alcanzar, financiamientos posibles de las inversiones y estrategia a largo plazo para lograr un programa con metas superiores.

### **Penetración FV**

El aporte en por ciento de la generación eléctrica FV vs. la total, entre todas las fuentes de energía eléctrica, tiene un límite debido, fundamentalmente, a que solo genera durante el día, lo que define un nivel de penetración FV en términos de potencia y de energía. La penetración FV es un tema que ha suscitado controversia en nuestro país, aspecto que, desde el punto de vista tecnológico, abordamos en otros trabajos, en donde planteamos la posibilidad de que la energía FV a muy largo plazo pueda llegar a constituir más del 25 % de la generación eléctrica del país; el resto lo deben afrontar, fundamentalmente, otras FRE. Nuestros argumentos para el aumento de la penetración FV se basan en (Stolik, 2013d):

El aumento de la generación eléctrica que se inyecta desde los bordes de la red, de tal forma que se consuma más a nivel de distribución en una zona y se inyecte menos a la transmisión de alta tensión.

El consumo al máximo posible, como autoconsumo eléctrico, y que una menor parte tribute al resto de la red. La diferencia con la anterior es que en lugar de consumirse en una zona de muchos clientes, se consume solo en una de un gran cliente como una fábrica, un frigorífico, un acueducto, un comercio, los hoteles, entre otros.

La inyección a la red (sin autoconsumo), la cual debe ubicarse lo más cerca de los lugares de consumo. Se trata, fundamentalmente, de los parques que se instalan por parte de las grandes empresas de generación eléctrica, como la Unión Nacional Eléctrica (UNE), en un rango de potencia muy amplio, casi siempre > 1 MWp, pero que puede llegar a cientos de MW.

La combinación de la energía FV con otras FRE (eólica, hidro-, bioeléctricas), para «llenar» los huecos que por intermitencia no supe la energía FV, sobre todo el del pico fatal con otras FRE. En este aspecto se ha abundado bastante, inclusive en el caso de llenar los «huecos» con fósil, sobre todo con gas fósil. Si el gas esquisto se impone, los estudios del Citigroup y el Deutsche Bank plantean que los más beneficiados serían la energía FV y la eólica, al resolver sus intermitencias.

La priorización de las instalaciones de acumulación natural (bombeo de agua). La necesaria elevación del agua con motores eléctricos representa una acumulación natural, ya que se puede priorizar el bombeo en horas de

sol y se puede utilizar el agua bombeada las 24 horas. Por ejemplo, los acueductos de Cuba poseen más de 3 000 equipos de bombeo que consumen más de 660 GWh/año, lo que podría permitir varios cientos de instalaciones FV solo con este fin, como son las de los acueductos, los trasvases, el riego y las cisternas de edificios.

La priorización de la correspondencia carga-radiación (climatización). Es otro ejemplo en el que se potencia el aumento del consumo en horas diurnas. A más sol, más calor, los compresores de todos los distintos sistemas de refrigeración trabajan con más frecuencia en horario diurno, como son los casos de frigoríficos, climatización, refrigeradores.

La utilización de la energía FV para aumentar sensiblemente el desarrollo industrial y agropecuario del país. Se produce al priorizar fábricas e instalaciones de todo tipo que consuman electricidad, fundamentalmente, en horario diurno, esto tiende a «subir» la curva de carga en horas diurnas. Por ejemplo, en Alemania, que tiene más de 1 500 000 instalaciones de un rango amplio de potencia FV, con más de 35 GW FV, se utiliza la energía FV como plantas picos diurnos, y ha llegado a satisfacer más del 40 % del suministro de energía pico hacia el mediodía.

El privilegio de la instalación en disímiles lugares de mayor consumo diurno y en la promoción de las instalaciones «FV del lado del cliente» de consumo mayormente diurno. Por ejemplo, además de fábricas con horarios diurnos, frigoríficos y climatizaciones, están también como posibilidades hoteles, escuelas, hospitales, bancos, universidades, empresas, ministerios, centros de investigaciones, comercios de atención diurna, oficinas de atención al público, cooperativas, cuentapropistas, entre otros. Esto aumenta el perfil de consumo de la curva de carga en horas diurnas, lo que tributa a ir logrando una curva de carga más propicia con relación al pico fatal vespertino-nocturno que tanto atenta contra las FRE intermitentes, como la energía FV y la eólica.

La utilización de la distribución dispersa de instalaciones para disminuir las fluctuaciones de la radiación solar. El aumento de la distribución geográfica inteligente de las instalaciones FV, que aplanan las fluctuaciones de tensión de la red, debido a que tiende a promediar estadísticamente la radiación solar en todo el territorio, es un factor sumamente importante.

La utilización de las grandes bondades de los inversores FV para mitigar las fluctuaciones de tensión y frecuencia de la red, debido a sus posibilidades cada vez mayores de participar en la gestión del despacho automatizado de la red eléctrica como, por ejemplo, el suministro de potencia reactiva por su capacidad de cambiar el factor de potencia.

La utilización de la acumulación de energía eléctrica con el consiguiente aumento de la generación FV. Actualmente, se investigan y desarrollan diversos tipos de sistemas de acumulación de energía eléctrica. Aunque algo

caros aún, paulatinamente sus costos continúan disminuyendo, por lo que cada año estos sistemas participan en forma creciente en la acumulación de energía eléctrica, la que paralelamente irá resolviendo el carácter intermitente de la FV. Por ejemplo, este mercado de sistemas de acumulación para SFV fue de 3,2 MW en el año 2012; el pronóstico para el año 2017 será de 2 700 MW, lo que representa un crecimiento de unas 700 veces en 5 años.

El desarrollo de las redes y del despacho eléctrico en condiciones de «red inteligente». Es uno de los elementos clave para aumentar el escalamiento de las FRE en la generación eléctrica, por el carácter distribuido que va adquiriendo dicha generación; eso complica la gestión de red ya que se hace necesario mantener la estabilidad (tensión y frecuencia) de ella (la red) para un gran número (miles y cientos de miles) de sitios que la inyectan, por ello hay que lograr una completa automatización de la gestión eléctrica a nivel de distribución de la red en forma «inteligente». Estas redes de nuevo tipo comienzan a desarrollarse en varios países.

El desarrollo de microrredes inteligentes, que se pueden considerar como un subcapítulo de las redes inteligentes, con la característica de que tributan a una cierta región del país, sin la necesidad de aportar electricidad a una red central. El análisis de las posibilidades de las microrredes inteligentes puede aportar un incremento de la penetración global del país.

La disminución de consumos en horas vespertinas nocturnas, o sea, el ajuste de las tarifas en horas de pico «fatal». Tema de muchas aristas, además del despilfarro que en forma continua desde hace mucho tiempo se combate; tiene que ver también con la eficiencia energética, la que debe profundizarse en los horarios del pico vespertino nocturno. Sin pretender agotar el tema, se pueden tomar más medidas, como por ejemplo, diferenciar la tarifa eléctrica durante las horas del día, con la colocación del kWh más caro durante las horas del pico «fatal»; evitar todo tipo de producciones, reuniones u otras actividades, que se puedan hacer diurnas a nivel nacional, sobre todo con la utilización de climatizaciones; hacer rutas críticas de las producciones que disminuyan el consumo durante dichas horas, entre otras.

## **Financiamientos**

La electricidad en base a fósiles es la de mayor peso en el precio de los combustibles, el cual continúa aumentando. La energía FV se concentra en la inversión inicial, que continuará disminuyendo, pues el «combustible» es gratis, y los gastos de operación y mantenimiento son mínimos. Ante la ausencia de recursos financieros necesarios para afrontar el costo de las inversiones iniciales, se hace imprescindible abordar variantes de financiamientos factibles. El tema es complejo. A continuación, brindo algunas ideas que tributan a una reflexión que se puede seguir desarrollando con un estudio económico más profundo que tienda a garantizar un mayor financiamiento a un programa FV. La mayoría de estas decisiones corresponden a la alta dirección del país. Se debe:

Realizar alianzas productivas en celdas, módulos e inversores con empresas FV líderes, que aporten una parte sustancial del financiamiento inicial, con riesgos menores compartidos y se recupere una parte de las inversiones, a través de las exportaciones y las aplicaciones nacionales – considero que la mejor alternativa es con China.

Invertir en la energía FV solo un pequeño porcentaje de la subvención anual en divisas, dedicada a la cuantiosa compra de combustible fósil para la generación eléctrica.

Tener en cuenta que las compras al contado y en mayores volúmenes, son mucho más ventajosas; los créditos en divisas originan pagos de intereses que encarecen el kWh, notablemente, y es un aspecto difícil de salvar. Hacer que resulte mutuamente atractivo compartir el financiamiento de las inversiones iniciales FV con clientes solventes: empresas, fábricas, regiones, cooperativas; sobre todo, a partir de la tarifa eléctrica de 5,00 CUP/kWh para consumos > 5 000 kWh al mes; este tipo de instalación «del lado del cliente» es una gran oportunidad para muchos consumidores.

Promover instalaciones del SFV conectados a red, en formas mutuamente atractivas para compartir los financiamientos de las inversiones iniciales FV con clientes que pagan el fluido eléctrico en CUC o MLC a > 0,23 CUC/kWh.

Reinvertir ganancias anuales y costos evitados de combustibles en divisas que se obtengan por cualquier actividad FV, en el aumento de la capacidad productiva FV, de las instalaciones nacionales y de posibles exportaciones que tributen al autofinanciamiento del programa FV.

Establecer requisitos para incluir, en las nuevas inversiones, la instalación del SFV conectados a red, como en hoteles, centros turísticos, frigoríficos, fábricas, acueductos, comercios.

### **Estrategia a mediano y largo plazo**

La estrategia de desarrollo depende del mencionado grado de penetración FV que seamos capaces de instrumentar en la red eléctrica nacional, por lo que además de aspectos tecnológicos que analizamos más profundamente en otros trabajos, la estrategia debe cumplir con ciertas premisas tales como: no tronchar en ningún momento la cultura productiva FV alcanzada, escalar la producción de módulos ensamblados en Pinar del Río hasta un máximo, hacer más importante el aporte eléctrico de la energía FV, hacer más atractivas las alianzas mixtas con países líderes, nunca recomenzar de nuevo en cero, lograr un desarrollo consolidado y ascendente, aprovechar al máximo la cultura FV que se vaya alcanzando, continuar el desarrollo de empresas FV creadas, aprovechar la disminución de los costos FV en el tiempo, aumentar el empleo por la vía de la rama FV, descentralizar las instalaciones FV (cooperativas, otros), tributar a gran escala el desarrollo industrial del país, potenciar la

presencia FV de Cuba en la CELAC y en otras organizaciones de América Latina (AL), contribuir a la exportación material y de servicios, continuar perfeccionando toda una estructura lograda, tender a una economía de escala en la energía FV, tender paulatinamente hacia el año 2020 a disminuir el costo del kWh FV en < 0,05 USD (Stolik, 2011d; 2012c, d; 2013b).

## Conclusiones

La energía FV es una tecnología moderna pero accesible, a diferencia, por ejemplo, de la energía nuclear. En los últimos diez años, la energía FV se ha desarrollado a pasos agigantados en países con mucho menos «sol» que en Cuba. Brinda magníficas opciones para acometer acciones con concepciones integrales de producción FV, de corto, mediano y largo plazo, conectadas a red y remotas, que contribuyen a la disminución de las fuentes fósiles de energía eléctrica de conjunto con las otras, muy importantes también como son las FRE, y a la soberanía electroenergética. De convertirnos a largo plazo en una potencia solar, se podrá contribuir no solo a las necesidades nacionales sino también a la exportación, ya que la energía FV ha comenzado a crecer más rápidamente en América Latina y el Caribe, región esta última que posee una propicia distribución y nivel mundial de radiación solar. En los países de más desarrollo económico, el consumo mayor y costo de la electricidad convencional es diurno, lo que permite un mayor grado de utilización (penetración) de la energía FV a diferencia de Cuba, donde el pico eléctrico fatalmente es vespertino nocturno, reto que debemos cambiar.

Entre la importación de combustible fósil, alimentos del agro y productos industriales, el país eroga muchos miles de millones de dólares cada año. Para un necesario desarrollo industrial y agropecuario del país, es necesario incrementar la generación de electricidad diurna, de tal forma que el pico de consumo eléctrico sea extendido durante las horas de sol, aspecto que debemos encarar tecnológicamente y que responde a una gran necesidad económica. La falta de financiamiento FV, que se caracteriza por tener su peso en la inversión inicial, debido a que posteriormente el combustible «sol» es prácticamente gratis, es una realidad que requiere buscar alternativas posibles para viabilizar, en la medida de lo posible, este gran obstáculo. Hoy el estado del arte mundial FV alcanzado muestra un gran desarrollo, es un importante punto de partida actual. Considero que la estrategia a afrontar hasta el año 2030 debe tener en cuenta sabiamente cómo continuarán aumentando las fortalezas de la energía FV (Stolik, 2011a), para lo que el país cuenta con centros de C-T en estas temáticas, sobre todo en nuestras universidades. A la altura del año 2030 la energía FV (Stolik, 2013) pudiera tener un monto de instalaciones de unos 2 000 MW (menos de lo que tienen hoy países como República Checa o Grecia), con un aporte porcentual en 2030 a la generación eléctrica de un 15 %, pero de mantener la sostenibilidad del programa puede llegar a > de 30 % a largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubrecht, G. (2012): «Renewable Energy: Is the Future in Nuclear?», <<http://osumarion.osu.edu/news/dr-gordon-aubrecht-talks-renewables-tedx-columbus>> [2013-07-10].
- Bloomberg New Energy Finance (BNEF) (2014): «BNEF: China Installed at Least 12 GW of Solar PV in 2013», <<http://www.solarserver.com/solar-magazine/solar-news/archive-2014/2014/kw04/bnef-china-installed-at-least-12-gw-of-solar-pv-in-2013.html>> [2011-04-12].
- CleanTechnica (2013): «China to Double 2015 Solar PV target to 40 GW», <<http://cleantechnica.com/2012/09/18/china-to-double-2015-solar-pv-target-to-40-gw/>> [2013-07-10].
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (2011): «Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015», <<http://www.heliosenergy.es/archivos/eng/articulos/art-2.pdf>> [7/6/2013-06-07].
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (2012a): «Global Market Outlook for PV until 2016», <[www.pv-magazine.com/.../Global\\_Market\\_Outlook\\_2016.pdf](http://www.pv-magazine.com/.../Global_Market_Outlook_2016.pdf)> [2013-06-07].
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (2012b): «Sustainability of Photovoltaics System. The Energy Pay Back Time», <[http://www.epia.org/uploads/tx\\_epiafactsheets/110513\\_Fact\\_Sheet\\_on\\_the\\_Energy\\_Pay\\_Back\\_Time.pdf](http://www.epia.org/uploads/tx_epiafactsheets/110513_Fact_Sheet_on_the_Energy_Pay_Back_Time.pdf)> [2013-06-07].
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (2013): «Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017», <[http://www.epia.org/fileadmin/user.../GMO\\_2013\\_Final\\_PDF.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user.../GMO_2013_Final_PDF.pdf)> [2013-06-07].
- Gipe, P. (2010): «Germany to Raise Solar target for 2010», <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/06/germany-to-raise-solar-target-for-2010-adjust-tariffs?cmpid=WNL-Friday-June4-2010>> [2013-06-07].
- Martin, C. (2014): «China Installed a Record 12 Gigawatts of Solar in 2013», <<http://www.bloomberg.com/news/2014-01-23/china-installed-a-record-12-gigawatts-of-solar-in-2013.html>> [2013-07-10].
- McDonald, N. C. y J. M. Pearce (2010): «Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules», Energy Policy, n.º 38, pp. 7041-7047
- Montgomery, J. (2013): «US Joins 10 GW Solar PV CLUB, Prepares For Liftoff», <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/07/us-joins-10-gw-solar-pv-club-prepares-for-liftoff>> [2013-06-07].

- Nieuwlaar, E. y E. Alsema (1997): «Environmental Aspects of PV Power Systems», <[www.energycrisis.com/Apollo2/pvenv1997.pdf](http://www.energycrisis.com/Apollo2/pvenv1997.pdf)> [2013-06-07].
- Perlin, J. (1999): From Space to Earth: The Story of Solar Electricity, Harvard University Press.
- Photon (2014): «Germany adds 3.3 GW of new PV Systems in 2013», <[http://www.photon.info/photon\\_news\\_detail\\_en.photon?id=83914](http://www.photon.info/photon_news_detail_en.photon?id=83914)> [2013-06-07].
- Prabhu, R. (2013): «Global Solar Forecast-A Brighter Out Look for Global PV Instalations», <<http://www.mercomcapital.com/global-solar-forecast-a-brighter-outlook-for-global-pv-installations1>> [2013-12-09].
- PV Magazine (2013a): «Chinese PV installations to reach 12 GW in 2014», <[http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/chinese-pv-installations-to-reach-12-gw-in-2014\\_100013486/#axzz396DvzBBs](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/chinese-pv-installations-to-reach-12-gw-in-2014_100013486/#axzz396DvzBBs)> [2013-10-10].
- PV Magazine (2013b): «Italian Grid Operator Announces a 2012 Boom in Photovoltaic Production», <[http://www.pv-magazine.com/.../italian-grid-operator-announces-a-2012-boom-in-photovoltaic-production\\_100009818/](http://www.pv-magazine.com/.../italian-grid-operator-announces-a-2012-boom-in-photovoltaic-production_100009818/)> [2013-01-15].
- Stolik, D. (1993): «Estado actual y perspectivas de la energía fotovoltaica», Revista Cubana de Física, vol. 13, n.º 1, pp. 5-70.
- Stolik, D. (2011a): «Necesidad de un programa fotovoltaico para Cuba», Energía y Tú, n.º 53, enero-marzo, pp. 15-22.
- Stolik, D. (2011b): «Costos del kWh FV y de la Paridad», conferencia, 1.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, septiembre.
- Stolik, D. (2011c): «Logros y tendencias actuales de las tecnologías FV en el mundo», conferencia, 1.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, septiembre.
- Stolik, D. (2011d): «Proyectote programa integral FV de corto-largo plazo en Cuba», conferencia, 1.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, septiembre.
- Stolik, D. (2012a): «Primera parte de 100 preguntas y respuestas sobre la energía FV», Energía y Tú, n.º 58, abril-junio, pp. 8-15.
- Stolik, D. (2012b): «Segunda parte de 100 preguntas y respuestas sobre la energía FV», Energía y Tú, n.º 59, julio-septiembre, pp. 7-11.
- Stolik, D. (2012c): «Costo actual y prospectivo de los sistemas FV», conferencia, 2.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, noviembre.
- Stolik, D. (2012d): «La energía FV en Cuba a mediano y largo plazo», conferencia, 2.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, noviembre.

Stolik, D. (2013a): «Perspectivas y retos científico-técnicos-productivos de América Latina y el Caribe para el desarrollo de la energía FV», Revista Mexicana de Física, n.º 59, marzo, pp. 56-65.

Stolik, D. (2013b): «Costo, paridad del kWh FV hoy y futuro en Cuba. Recuperación de la inversión FV», conferencia, 3.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, octubre.

Stolik, D. (2013c): «Estado del arte FV: actual y prospectivo», conferencia, 3.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, octubre.

Stolik, D. (2013d): «Penetración actual y futura FV en Cuba», conferencia, 3.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, octubre.

Stolik, D. (2013e): «Programa FV en Cuba a mediano y largo plazo», conferencia, 3.º Taller Nacional «Cuba FV», La Habana, octubre.

RECIBIDO: 1/3/2014

ACEPTADO: 17/3/2014

Daniel Stolik Novygrad. Facultad de Física. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, Cuba. Correo electrónico: [dstolik@fisica.uh.cu](mailto:dstolik@fisica.uh.cu)