



Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala

Technical and economic feasibility of a small-scale pv system

José D. Ortiz*

Fecha de envío: enero de 2013
Fecha de recepción: enero de 2013
Fecha de aceptación: febrero de 2013

Resumen

El presente artículo, pretende responder a la pregunta de investigación: ¿es viable la instalación y aprovechamiento de un sistema solar fotovoltaico de pequeña escala en la ciudad de Bogotá? Lo anterior implica satisfacer la curiosidad de la comunidad académica con respecto al principio físico que permite obtener electricidad a partir de la luz solar y al funcionamiento de este sistema para el suministro de energía eléctrica a los usuarios. Adicionalmente, se requiere un análisis de la opción técnica y económica de la implantación de tal sistema en Bogotá.

Palabras clave

Energía, viabilidad, fotovoltaico, sostenibilidad.

Abstract

This paper is intended to answer the research question ¿is it feasible to installation and use of a small-scale photovoltaic (PV) solar system in the city of Bogotá? This implies satisfying the curiosity of the academic community regarding the physic principle that allows obtaining power from sunlight and operation of such a system for supplying electric energy to users. Additionally, it requires an analysis of the technical and financial choices when implementing such a system in the city of Bogotá.

Key words

Energy, feasibility, photovoltaic, sustainability.

Introducción

Aunque el uso de fuentes alternativas o no convencionales dista mucho de mostrarse, en el corto plazo, como la solución definitiva a los problemas de abastecimiento de energía o como el sustituto de las formas tradicionales de obtenerla, en particular en las zonas más densamente pobladas, sí se han logrado avances importantes en la construcción y en la operación de sistemas fotovoltaicos a gran escala que podrían implicar un desarrollo más acelerado de esta tecnología y una reducción más pronunciada en sus precios.

Como ejemplo de lo anterior, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha lanzado recientemente la iniciativa Sunshot [1] basada en la colaboración nacional para lograr que, a finales de la década, el costo de la

* Ingeniero y magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia Investigación realizada para el Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad EAN, Bogotá (Colombia). dagobertortiz@gmail.com

tecnología fotovoltaica sea competitivo frente a otras tecnologías.

En Colombia, el parque eólico Jepírachi [2] con una capacidad efectiva de 18.42 MW¹ es muestra del uso de fuentes alternativas de energía respecto a la electricidad generada con combustibles fósiles; en esta medida, la Universidad EAN ha entendido su papel en el ámbito energético-ambiental y ha iniciado una serie de proyectos y actividades curriculares y de investigación sobre energías renovables y eficiencia energética, cuyo desarrollo es fundamental para la diversificación y mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles en Colombia.

Este artículo inicia con la descripción general del principio físico de funcionamiento, luego se tratan los diferentes aspectos relacionados con la operación del sistema fotovoltaico y de cada uno de sus elementos constitutivos, para finalmente establecer la base sobre la cual ha de sustentarse el posterior análisis de viabilidad de un sistema como el que nos ocupa.

1. Generalidades de los sistemas fotovoltaicos

Los sistemas solares fotovoltaicos se han venido empleando en Colombia desde los años setenta principalmente para el suministro de electricidad a sistemas de telecomunicaciones. En 1979 la extinta Empresa Nacional de Telecomunicaciones Telecom instaló Wp en el proyecto de telecomunicaciones “Primera Etapa” en zonas no conectadas al sistema interconectado nacional de energía [4]. En 1996 se instaló en Colombia la primera central solar en La Venturosa, departamento del Vichada, con una potencia pico de Wp [5]. A partir de entonces, ha crecido en Colombia el uso de esta tecnología principalmente en las zonas rurales y no conectadas a la red de energía

nacional mediante el apoyo institucional que brinda el Estado.

Respecto al recurso solar es imperativo acudir al atlas de radiación solar en el que se representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia [6], el cual indica que el país tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a $4,5 \frac{kWh}{m^2.día}$.

En el entorno local se ha realizado un análisis de la disponibilidad del recurso con base en la información de la estación del Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD), cuyo resultado ha sido resumido en el informe de avance de este proyecto de investigación [7]. Dicho análisis establece un potencial energético solar local para la ciudad de Bogotá entre 3,27 y $4,76 \frac{kWh}{m^2.día}$ con un promedio de $3,86 \frac{kWh}{m^2.día}$.

La figura 1 muestra el acelerado crecimiento mundial de la potencia instalada acumulada con tecnología solar fotovoltaica [8].

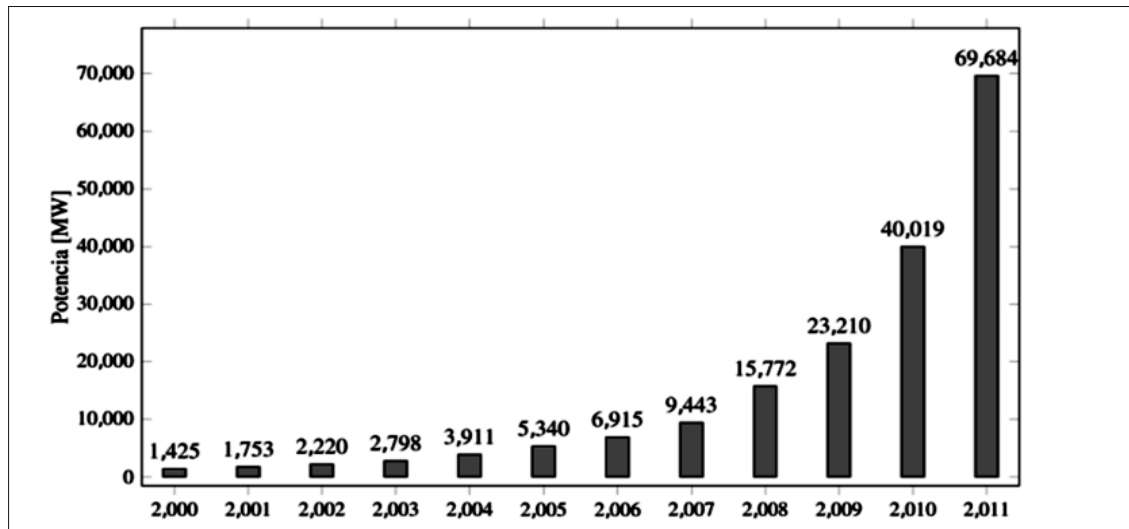
De acuerdo con la European Photovoltaic Industry Association (EPIA) [8], la energía solar fotovoltaica se ha convertido en la tercera fuente más importante de energía dentro del rango de las renovables, después de la hidráulica y la eólica, tomando como base la potencia instalada en el ámbito mundial.

Europa sigue representando la parte predominante del mercado fotovoltaico mundial, con un 75% de toda la nueva capacidad instalada en 2011, seguida de Japón (5 GW), Estados Unidos (4.4 GW) y China (3.1 GW).

Respecto a Centroamérica y América de Sur, se indica que aunque ambas regiones no han mostrado una gran actividad relacionada con la tecnología solar fotovoltaica hasta ahora, se espera conseguir una adecuada combinación

¹ Este parque eólico entró en operación comercial plena el 19 de abril de 2004 [3].

Figura 1. Evolución de la potencia instalada acumulada mundial 2000-2011



Fuente: [8].

de crecimiento económico, estabilidad política y disponibilidad de financiamiento para que se genere un mercado de rápido crecimiento en los próximos años.

2. Principio de funcionamiento de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)

2.1 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el principio físico sobre el cual se ha basado el desarrollo de la tecnología de aprovechamiento directo de la radiación solar para producir electricidad. Este efecto consiste en la propiedad de algunos materiales de aumentar su cantidad de electrones libres como respuesta a la incidencia de una radiación electromagnética (principalmente luz visible y ultravioleta).

Albert Einstein estableció que la emisión de electrones de la placa iluminada depende exclusivamente de la frecuencia de la luz y no de su intensidad. Por otra parte, aclaró que

la cantidad de electrones emitidos es, esta sí, proporcional a la intensidad del haz. En consecuencia, lo ideal es una intensa radiación con la frecuencia adecuada para tener una abundante liberación de electrones en el material [9].

2.2 Eficiencia de la conversión fotovoltaica

La eficiencia de conversión de una célula fotovoltaica o celda solar se ha definido como el porcentaje de la energía solar incidente que un dispositivo fotovoltaico es capaz de convertir en electricidad. Específicamente, la eficiencia de conversión puede tomarse ya sea como el porcentaje de la producción de energía con respecto a la energía recibida del sol o bien como el porcentaje de la potencia de salida con respecto a la potencia recibida del sol.

La figura 2, que registra los mayores logros a nivel de laboratorio, muestra de qué forma

está mejorando la eficiencia de las celdas solares como resultado de las diversas investigaciones que se adelantan y de las diferentes tecnologías empleadas, y que en el corto plazo se espera reducir la barrera del 50 % en términos de eficiencia.

2.3 Comportamiento corriente-voltaje de una celda solar

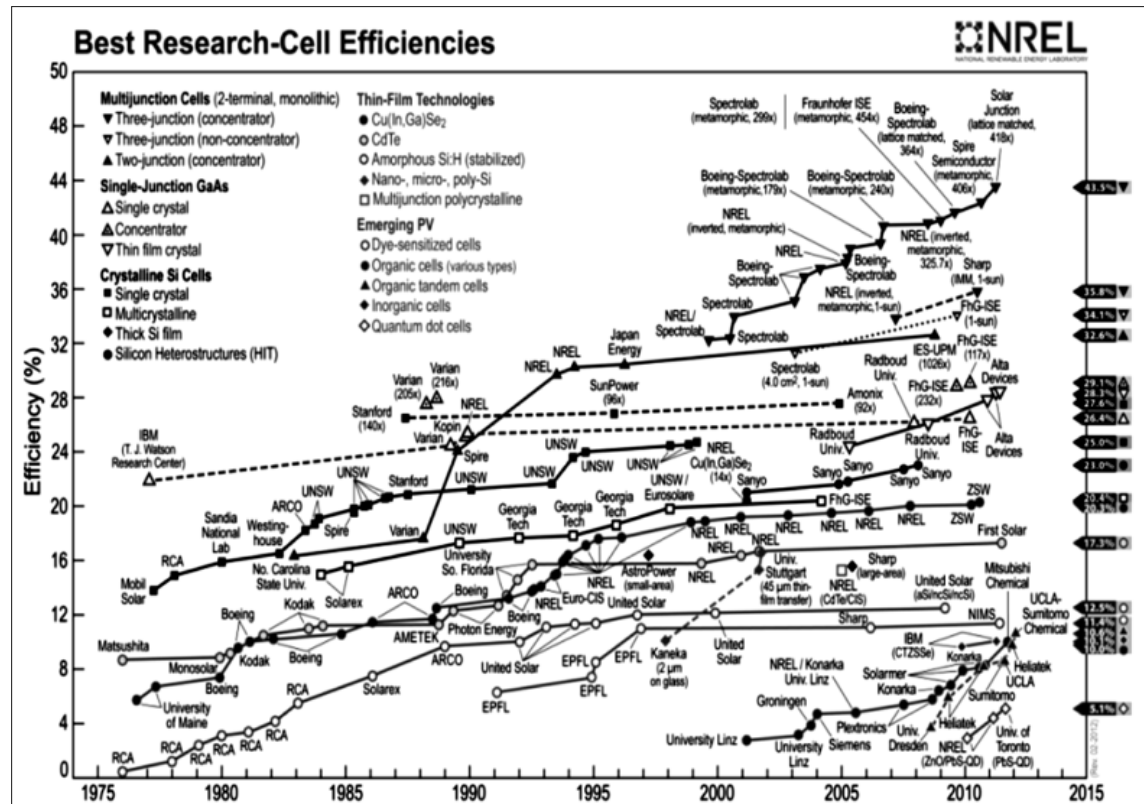
En términos generales pueden identificarse varios parámetros importantes en la figura 3: la corriente que la celda solar suministra cuando se conectan sus terminales en cortocircuito [I_{cc}], el voltaje entre terminales de la celda solar cuando no hay carga conectada o está en

circuito abierto [V_{ca}], y la pareja voltaje-corriente para la cual se obtiene la máxima potencia [I_m, V_m], mostrada como área sombreada. Para la identificación o selección técnica de los paneles solares se ha establecido la potencia pico (W_p) como el parámetro principal de identificación y selección.

2.4 Influencia de la radiación solar

La corriente generada por las celdas solares es función de la irradiancia² incidente sobre la misma. A medida que aumenta la irradiancia aumenta también la corriente producida por la celda solar, como se muestra esquemáticamente en la figura 4. Esta característica obliga

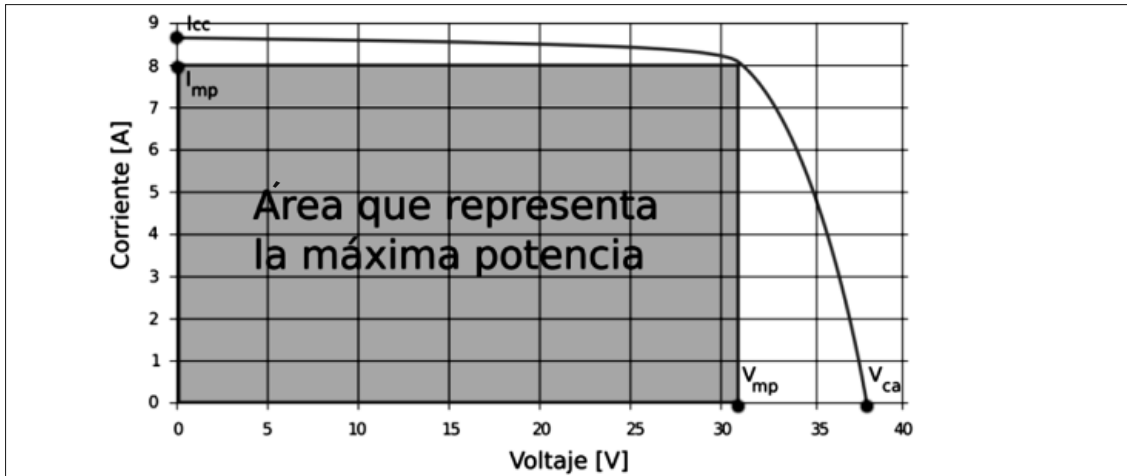
Figura 2. Evolución de la eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas solares



² Densidad de potencia de la radiación solar [$\frac{W}{m^2}$]

Fuente: [10].

Figura 3. Respuesta típica (I - V) de una celda fotovoltaica



Fuente: elaboración propia.

a que las celdas solares se mantengan la mayor cantidad de tiempo de cara al sol.

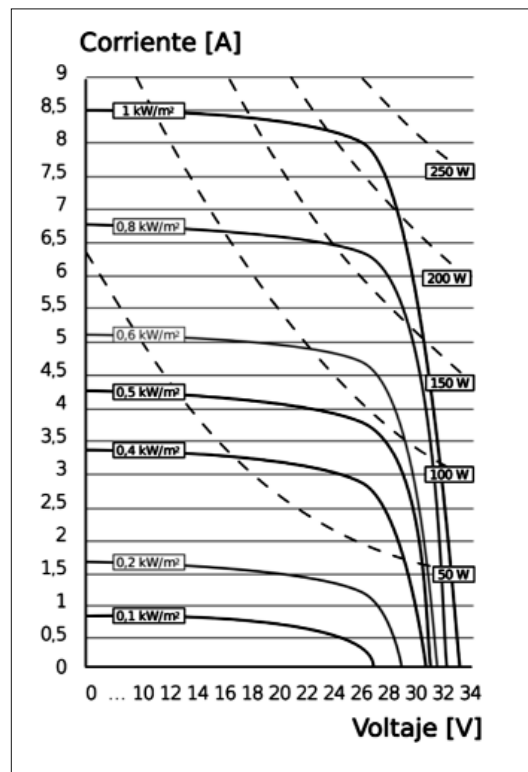
2.5. Influencia de la temperatura

Las células solares funcionan mejor a bajas temperaturas, según las propiedades de sus materiales. Todos los materiales pierden eficiencia a medida que aumenta su temperatura de funcionamiento, como puede apreciarse por la disminución del área bajo las curvas de la figura 5. Puesto que gran parte de la energía de la luz incidente sobre las células solares se convierte en calor, es recomendable hacer coincidir las características del material de las células con la temperatura de operación o, en su defecto, proveer un sistema de enfriamiento.

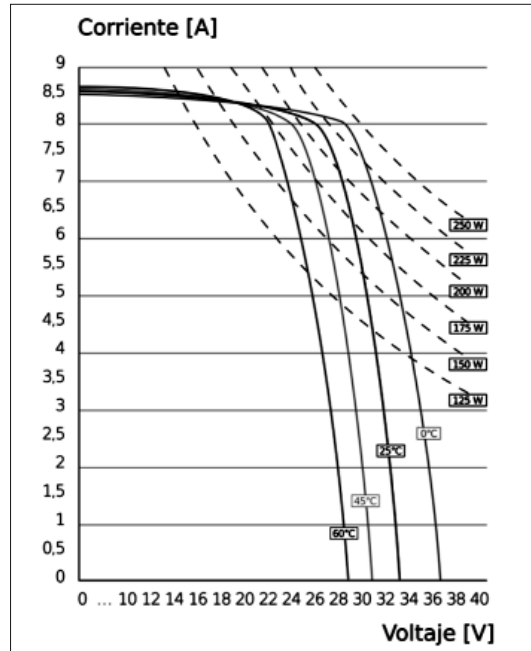
3. Componentes principales de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)

Se describen, a continuación, las características más relevantes de cada uno de los dispositivos que constituyen un SSF.

Figura 4. Variación de la potencia de las celdas solares en función de la radiación solar



Fuente: [11].

Figura 5. Efecto de la temperatura en la potencia de las celdas solares


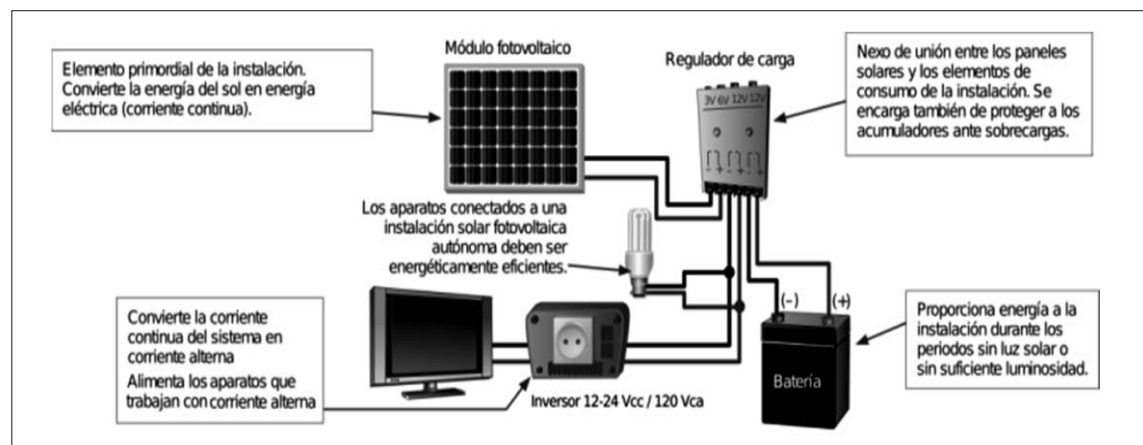
Fuente: [11].

La figura 6 muestra esquemáticamente la disposición de los diferentes elementos que componen el sistema de aprovechamiento

de la energía del sol para producir electricidad. El funcionamiento del sistema que este esquema representa es, someramente, el siguiente: la radiación electromagnética proveniente del sol incide sobre el módulo o panel solar, en este elemento se transforma la radiación solar recibida en electricidad unipolar o continua y se entrega al regulador-cargador que, a su vez, la lleva a la batería y al inversor. La batería almacena la energía recibida para utilizarla cuando no se disponga de la luz solar y el inversor se encarga de transformar la electricidad continua en electricidad alterna para los equipos o electrodomésticos que la requieran.

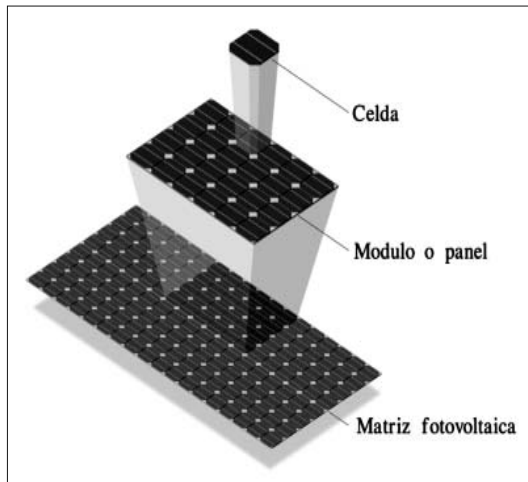
3.1. Módulos fotovoltaicos

Las celdas o células solares pueden considerarse comercialmente como el elemento más pequeño disponible en el mercado para transformar la radiación del sol en electricidad. La combinación de celdas solares con similares características permite incrementar tanto el voltaje como la corriente generada y conforman lo que se conoce como un módulo o panel solar fotovoltaico.

Figura 6. Esquema de un sistema solar fotovoltaico


Fuente: Imagen adaptada de [12].

Figura 7. Celda, módulo o panel y matriz fotovoltaica



Fuente: [13].

A su vez, los módulos pueden conectarse en serie, en paralelo o en combinaciones serie-paralelo formando una cadena o matriz fotovoltaica conocida también como un parque o arreglo solar (figura 7).

Los siguientes factores suelen considerarse cuando se determina el rendimiento de un panel solar fotovoltaico: la caracterización del rendimiento de la celda solar, la determinación de factores de degradación relacionados con el diseño y el montaje del panel fotovoltaico, la consideración de las condiciones ambientales y su efecto en la temperatura de funcionamiento de las celdas solares y el cálculo de la potencia de salida del panel solar.

3.2 Inversores

Los paneles fotovoltaicos suministran solamente corriente continua o unidireccional cuando son iluminados por la luz del sol. Por lo tanto, si se desean utilizar equipos que funcionen con corriente alterna es necesario acudir a un dispositivo que convierta esta co-

rriente eléctrica continua en alterna. Tal dispositivo es el “inversor” y funciona como un elemento de acople entre la electricidad continua generada por el panel solar fotovoltaico y la carga que requiera corriente eléctrica alterna.

Dentro de las características principales que debe tener un inversor se encuentran: voltaje de alimentación o de entrada, potencia máxima de salida y la eficiencia. El voltaje de operación o de entrada del inversor debe seleccionarse con base en el voltaje de suministro de panel solar fotovoltaico. Además de esto, los inversores deben actuar como elemento seleccionador del punto de potencia máxima del panel o paneles solares.

De igual manera, han de estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas, contar con la función de conexión y desconexión automática cuando no se requiera alimentación de corriente alterna, soportar demandas instantáneas de hasta el 200 % de su potencia nominal y cumplir, naturalmente, con los requisitos del Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas (RE-TIE) [14] y la normatividad Icontec.

3.3 Dispositivos de almacenamiento

En sistemas solares fotovoltaicos aislados se requiere un equilibrio relativo en importancia entre las celdas solares, que son el corazón del sistema, y el sistema de almacenamiento de energía, debido a que no es frecuente que la radiación solar coincida perfectamente con los requerimientos de energía ni que el sol esté disponible todo el tiempo. En esta situación se necesita un sistema de baterías para el almacenamiento de energía suministrada por el sistema fotovoltaico. Sin embargo, el precio que se va a pagar por el uso de las baterías involucra una disminución en la eficiencia del

sistema fotovoltaico, ya que aproximadamente solo el 80% de la energía que se almacena en las baterías puede utilizarse. Adicional a esto, el banco de baterías ocupa espacio considerable, lo que puede implicar algunos riesgos y exige un mantenimiento periódico. Aun así, es la mejor manera de almacenar la electricidad fotovoltaica para su uso posterior.

En cuanto al tipo de baterías que pueden utilizarse deben mencionarse básicamente tres: baterías de plomo, baterías de níquel cadmio (Ni-Cd) y baterías Li-ion. Cada tipo de batería debe analizarse a la luz de su relación beneficio-costos.

3.4 Cargadores de batería o reguladores de carga

Entre los principales requerimientos de un regulador se encuentran [15]:

- Mantener la tensión de salida constante independiente de las fluctuaciones de la entrada, de las exigencias de la carga y de la temperatura.
- El voltaje de salida no debe contener componentes alternos (ripple = 0).
- La fuente debe poseer un sistema para limitar la corriente de salida (protección).

3.5 Dispositivos de protección

Todas las instalaciones deben cumplir con el RETIE [14] y las normas Icontec respectivas. Como principio general debe garantizarse un grado mínimo de aislamiento eléctrico para equipos y materiales; debe incluirse los elementos necesarios que garanticen la seguridad de las personas frente a contactos críticos, especialmente donde el nivel de voltaje de la instalación supere los 50 V de corriente alterna o 120 V de corriente con-

tinua; y debe contarse con todas las protecciones necesarias para la instalación contra cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones (internas y externas).

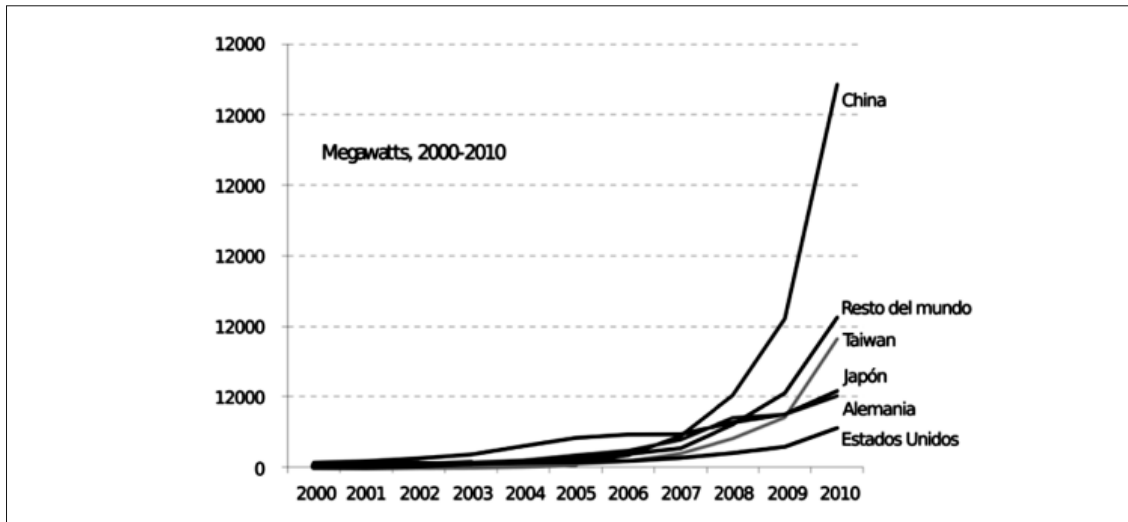
3.6 Elementos de anclaje y cables de conexión

Los paneles fotovoltaicos deben montarse en una estructura estable y duradera que además de soportar la matriz o el campo fotovoltaico resista los embates del viento, la lluvia, el granizo y otras condiciones adversas. Puede instalarse el montaje de los módulos solares de forma que realice un seguimiento a la trayectoria del sol con el fin de lograr que, durante el mayor tiempo posible, la radiación incidente sea perpendicular al panel solar. No obstante, en sistemas de pequeña escala resulta más económico el uso de estructuras estacionarias inclinadas a un ángulo fijo determinado por la latitud del sitio, los requisitos de la carga y la disponibilidad de la luz solar. Por su parte, los cables y conectores deben ser resistentes a los rayos UV, al ozono, a las exigencias mecánicas y a las variaciones extremas de temperatura.

Por otro lado, no debe descuidarse la regulación (caída de voltaje) entre la matriz fotovoltaica y el inversor. Los conductores para corriente continua deben tener doble aislamiento y ser alambres de cobre de acuerdo con las especificaciones del fabricante si no se cuenta con normatividad al respecto.

4. Mantenimiento

En el caso de los paneles solares la tarea se inicia con una inspección visual, una limpieza periódica y una verificación de su estado de operación poniendo especial cuidado en las conexiones eléctricas y en los valores de voltaje de circuito abierto, que deben estar

Figura 8. Producción anual de celdas solares por país

Fuente: adaptada de [17].

dentro de las recomendaciones entregadas por el fabricante.

En el caso de la batería, el proceso de mantenimiento depende del tipo de batería utilizado, en términos generales debe inspeccionarse los alrededores de las baterías en busca de evidencia de fugas o de humedad, revisarse las conexiones eléctricas y el voltaje de cada batería con el fin de ver si su valor se encuentra dentro de los valores establecidos por el fabricante.

En el regulador de voltaje el procedimiento es similar asegurando que las conexiones se encuentren en buen estado y que los parámetros de funcionamiento del regulador estén de acuerdo con lo establecido por el fabricante o proveedor del equipo.

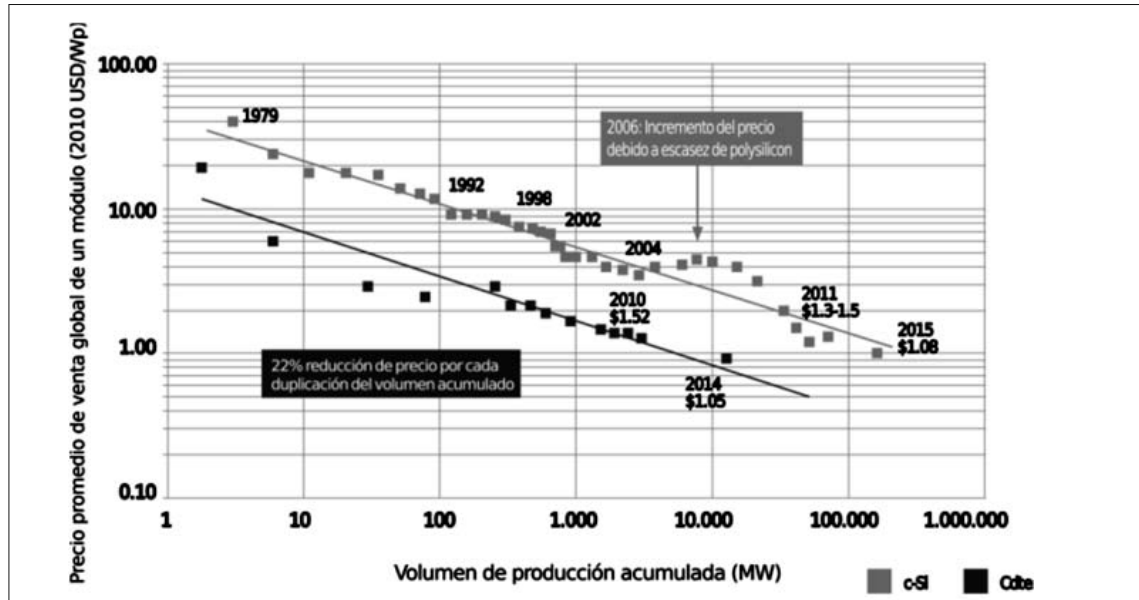
5. Viabilidad económica

En el ámbito internacional Alemania tiene el costo más bajo del sistema fotovoltaico para el mercado residencial a pequeña escala

(<5 kW) con un promedio de US\$3.8/W. En comparación, el costo promedio para sistemas fotovoltaicos instalados en 2011 en Italia, España, Portugal y los Estados Unidos estuvo entre 5.7 y 5.8 US\$/W [16].

Mientras que en el ámbito internacional los costos de módulos han bajado significativamente en la última década, el resto de los costos asociados a los sistemas fotovoltaicos siguen siendo un obstáculo para la masificación de esta tecnología.

La creación de incentivos para instalaciones solares en varios países llevó a muchas empresas a entrar en la industria fotovoltaica. Algunos fabricantes en China y Taiwán continúan expandiéndose rápidamente para obtener economías de escala y reducir los costos unitarios (ver figura 8). China en la actualidad exporta más del 90% de los módulos fotovoltaicos que produce, y ha iniciado la implementación de políticas orientadas a desarrollar el mercado interno de esta tecnología.

Figura 9. Precio global de los módulos fotovoltaicos de c-Si y CdTe entre 1979 y 2015


Fuente: adaptada de [16].

La figura 9 muestra con claridad la reducción que se ha tenido en el precio promedio de los módulos solares. El costo de los módulos fotovoltaicos se encuentra, por lo general, entre un tercio y la mitad del costo total del capital de una instalación fotovoltaica, dependiendo del tamaño del proyecto y el tipo de módulo fotovoltaico [16].

De igual manera, la figura 10 muestra la evolución del precio de los módulos de silicio cristalino para los últimos 35 años. El enorme crecimiento de la demanda después de 2003 condujo a un aumento de los precios debido a un mercado con oferta restringida, que luego se transformó en un mercado impulsado por la demanda, lo cual llevó a una reducción significativa de los precios debido al exceso de módulos en el mercado.

Ambas figuras (9 y 10) muestran semejanza en la curva de aprendizaje hasta 2010, para los

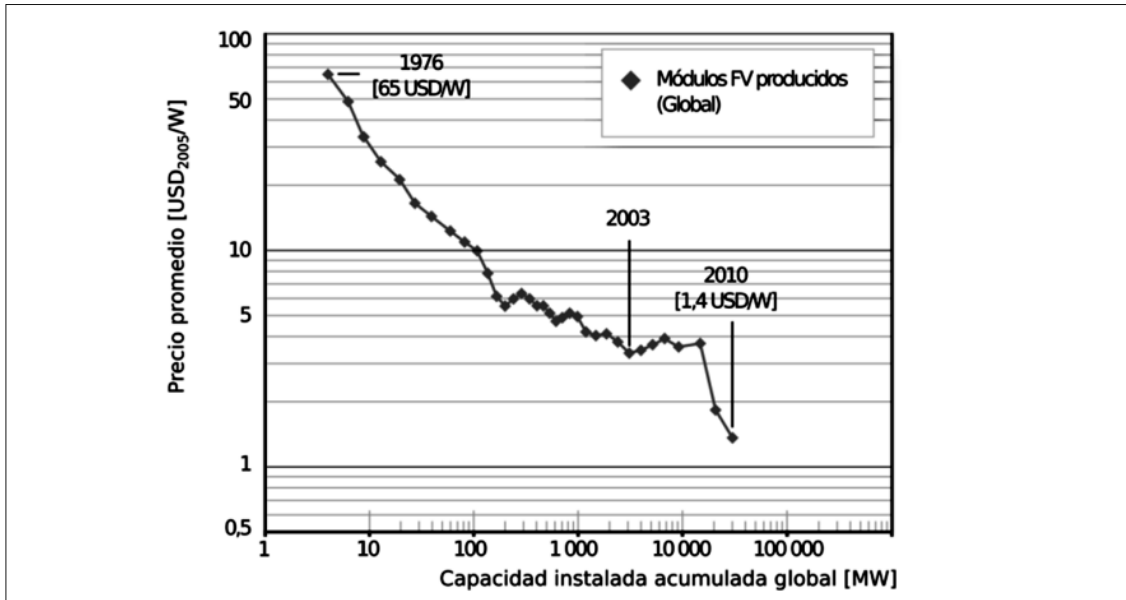
módulos de silicio cristalino. Sin embargo, la figura 9 aventura un pronóstico de reducción en los precios hasta el 2013, luego un incremento en el 2014 y una fuerte reducción en el 2015.

Por su parte, la figura 11 indica una tendencia convergente de los precios de los sistemas solares fotovoltaicos para Europa, Estados Unidos y Japón hasta el 2004 e incluso el 2005. Sin embargo, a partir de entonces la convergencia de precios no es tan evidente. Adicional a esto, se observa que los precios mínimos en Europa están siempre por debajo de los precios mínimos en Estados Unidos en una magnitud aproximadamente constante entre 1998 y 2010.

En lo que respecta a Colombia, la tabla 1³ muestra los costos de algunos tipos de sistemas solares fotovoltaicos con capacidades de 2.38 kWp y 1.7 kWp instalados en zonas remotas de la zona Andina de Colom-

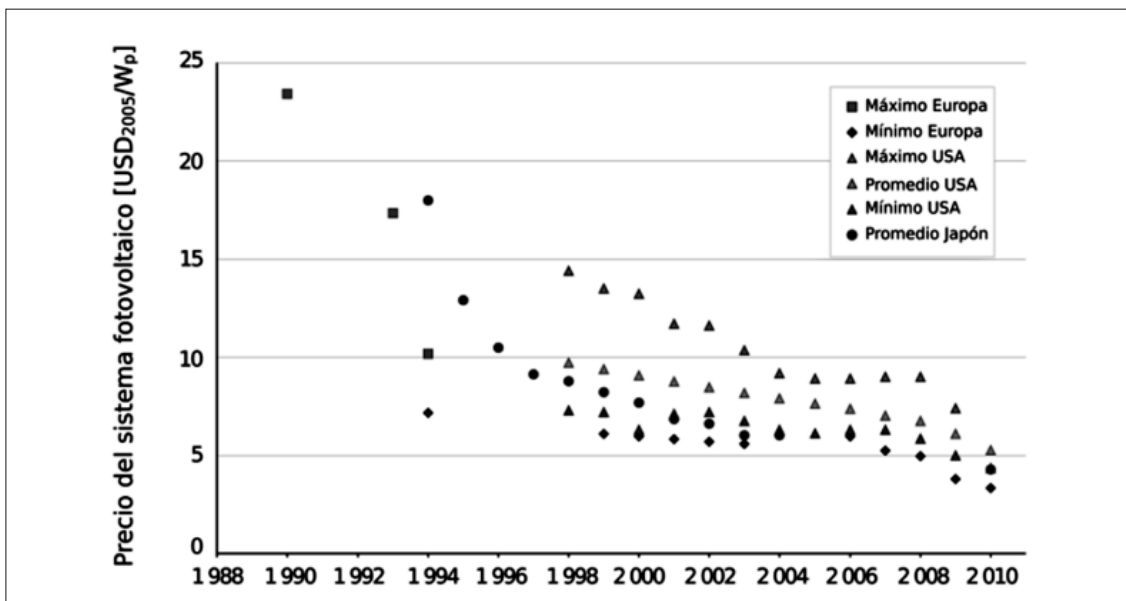
³ Tabla tomada del documento *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia* [19], estudio contratado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).

Figura 10. Curva de aprendizaje respecto a los precios de módulos fotovoltaicos de silicio



Fuente: [18].

Figura 11. Costo de sistemas fotovoltaicos instalados de menos de 100 kWp en Europa, Japón y los Estados Unidos



Fuente: [18].

Tabla 1. Costos nacionales de algunos tipos de sistemas solares fotovoltaicos

Componente	SFV 2,38 kWp		SFV 1.7 kWp	
	US\$	%	US\$ %	%
Módulos	16211	50%	11579	45%
Regulador	863	3%	863	3%
Baterías	7579	24%	6095	24%
Inversor	3079	10%	3079	12%
Subtotal componentes	27732	86%	21616	85%
Estructura	2393	7%	1921	8%
Montaje	1989	6%	1989	8%
Subtotal instalacion	4382	14%	3910	15%
Total sin iva	32114	100%	25526	100%
IVA	5138,24	16%	4084	16%
Total con iva	37252,24		29610	
US\$/Wp inst sin IVA	13,49		15,02	
Impuesto IVA	2,16		2,40	
US\$/Wp inst con IVA	15,65		17,42	

Fuente: elaboración propia.

bia para el suministro de 2 kW AC con diferentes horas de servicio y calculados como valor promedio de cotizaciones de algunos proveedores nacionales.

Como puede verse en la tabla 1, el costo total en Colombia de estos sistemas solares fotovoltaicos es en promedio cercano a $16,5 \frac{USD_{2010}}{Wp}$. Si se compara esta cifra con las cifras para el 2010 reportadas en la figura 11, puede concluirse que en Colombia un sistema solar fotovoltaico instalado puede costar hasta tres veces más de lo que cuesta a nivel internacional.

Ahora bien, tomando los datos de la tabla 1 con 25 526 USD se tendría un sistema solar instalado con un potencia pico de 1700 Wp. Asumiendo, de forma exagerada, un radiación permanente y constante de 5 horas al día y que el panel solar siempre entrega la potencia pico, se tendría un suministro de energía de

origen fotovoltaico de $1700 \times 5 = 8.5 \text{ kWh.día}$. Esto implica que en un mes la energía obtenida del sistema fotovoltaico alcanzaría los 255 kWh por mes.

Con un precio por kWh de \$378 para el estrato 4 en Bogotá se tiene que el valor de la energía generada con el sistema solar fotovoltaico bajo análisis sería de por mes. Considerando un tasa representativa de mercado de pesos por dólar el tiempo de recuperación de la inversión sería:

$$\text{Años} = \frac{\text{ValorSSF}[USD\$] \times TRM}{\text{Valorenergía}[\$] \times \text{Mesesaño}}$$

$$\rightarrow \frac{25526 \times 1800}{96390 \times 12} = 39.72 \text{ años}$$

Este tiempo de recuperación de la inversión hace que el sistema no sea viable económicamente a pesar de haberse realizado suposiciones favorables para el sistema SSF.

Como análisis alternativo, si se tomaran los precios internacionales más bajos para un SSF instalado de 3 US\$/Wp (figura 11) se tendría un costo total del sistema de que se amortizarían en 8 años, lo que tampoco lo hace viable económicamente.

Por otro lado, en el futuro inmediato, el punto de corte entre la tendencia de reducción en los costos de la electricidad generada con tecnología fotovoltaica y la tendencia de incremento en los precios de la energía de la red convencional al usuario final⁴ marcará el inicio del desarrollo de un mercado solar fotovoltaico [20].

6. Conclusiones

La lectura del presente documento pone de manifiesto en primer lugar que desde el punto de vista técnico no existe ninguna dificultad o inviabilidad para la instalación, puesta en funcionamiento y operación de un sistema solar fotovoltaico de pequeña escala en la ciudad de Bogotá, ya que tanto la tecnología como el recurso solar están disponibles para su implantación.

No obstante la viabilidad técnica, es poco probable obtener un resultado económicamente atractivo con la instalación de este tipo de sistema de aprovechamiento de la energía solar. La razón principal radica en los altos costos de adquisición y de instalación del sistema solar fotovoltaico que no tornan competitiva esta tecnología frente a la electricidad disponible en la red nacional que abastece los centros urbanos, a un costo considerablemente menor dado su origen principalmente hidráulico.

No ocurre lo mismo en las zonas no interconectadas en donde el costo de la electricidad generada con combustibles hace que estos

proyectos sean más atractivos desde un punto de vista económico-social.

Sin embargo, es claro que la presión internacional por el uso de energías renovables como la fotovoltaica puede acelerar la reducción en los precios y hacer económicamente viable este tipo de proyectos, al menos en el mediano plazo.

Por otra parte, se requiere actuar sobre el mercado de manera que los beneficios de los bajos precios internacionales se puedan trasladar a Colombia con el fin de reducir el costo total de la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.

Finalmente, es deseable que se logre una pronta reducción en el costo total de estos sistemas fotovoltaicos de manera que se alcance la paridad de precios con la red y se estimule de esta forma el mercado de esta tecnología.

Por el momento, el mercado natural para estos sistemas continúa siendo en las zonas no conectadas a la red de interconexión nacional.

Referencias

- [1] US Department of Energy (DOE). (s. f.). EERE: SunShot Initiative Home Page. [En línea] disponible en <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/>.
- [2] A. Pinilla, L. Rodríguez, y R. Trujillo. (2009). *Performance evaluation of Jepirachi Wind Park*. Vol. 34, n.º 1. [En línea] disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001481>
- [3] Empresas Públicas de Medellín. (s. f.). Parque Eólico Jepirachi. [En línea]

⁴ Se le conoce a este corte como el punto de paridad con la red (grid-parity).

- disponible en <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/ParqueE%C3%B3lico.aspx>.
- [4] Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA). (1996). *Censo y evaluación de sistemas solares fotovoltaicos instalados en Colombia*. [En línea] disponible en http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/potencialidades/Censo_Solar_Fotovoltaico.pdf.
- [5] M. H. Rodríguez. (2009). *Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas*. [En línea] disponible en <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/a9%2028.pdf>.
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). *Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana*. [En línea] disponible en http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf.
- [7] M. M. Sierra, “Análisis de viabilidad técnico y económico para instalar un sistema energético basado en tecnología solar a pequeña escala, en un área de la universidad EAN”, Informe de avance, 2011.
- [8] European Photovoltaic Industry Association (EPIA). (2012). *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016*. [En línea] disponible en <http://files.epia.org/files/Global-Market-Outlook-2016.pdf>.
- [9] G. W. Castellan, *Fisicoquímica*. 2ed. México: Fondo Educativo Interamericano S. A., p. 450, 1974.
- [10] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s. f.). *Best Research-Cells Efficiencies*. [En línea] disponible en http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [11] Photowatt International. (2010, mayo). PW2050 – *The high efficiency photovoltaic module for your most challenging projects*. [En línea] disponible en http://www.photowatt.com/documents/produits/PW2050_EN.pdf.
- [12] T. Díaz y G. Carmona (2010). *Unidad 1. Componentes de una instalación solar fotovoltaica*. McGraw Hill. [En línea] disponible en <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>.
- [13] Small Solar Electric System Components. (s. f.). [En línea] disponible en http://www.energysavers.gov/downloads/cell-module-array_jpg.zip. (Imagen adaptada).
- [14] Ministerio de Minas y Energía. (2008, 6 agosto). *Resolución 181294 - Anexo General – Reglamentos Técnicos de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. [En línea] disponible en <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/3337.pdf>.
- [15] J. Huircán, (s. f.). *Reguladores de voltaje*. [En línea] disponible en http://146.83.206.1/~jhuircan/PDF_CTOSII/reguieee.pdf.
- [16] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2012). *Renewable energy technologies: cost analysis series - Solar Photovoltaics*. Vol. 1, n.º 4/5. [En línea] disponible en <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/>

RE\ Technologies\ Cost\ Analysis-SOLAR_PV.pdf.

- [17] M. D. Platzer. (2012). *U. S. solar photovoltaic manufacturing: Industry trends, global competition, federal support*. [En línea] disponible en <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R42509.pdf>.
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation* (special report). [En línea] disponible en http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf.
- [19] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y CORPOEMA, C. E. (2010, diciembre). *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia*. Vol. 2. [En línea] disponible en http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf.
- [20] C. Breyer, y A. Gerlach. (s.f.). *Global overview on grid-parity event dynamics*. [En línea] disponible en http://www.qells.com/uploads/tx_abdownloads/files/11_GLOBAL_OVERVIEW_ON_GRID-PARITY_Papr.pdf.