

Energía solar fotovoltaica, una alternativa sustentable para el futuro.

Báez, José. Forero, Ricardo.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Santo Tomás
Bogotá, Colombia
josebaez@usantotomas.edu.co
ricardoforero@usantotomas.edu.co

Resumen

A lo largo de la existencia de la humanidad y a partir del crecimiento poblacional, se ha incrementado la demanda energética global, generando una desmedida carrera por suplirla, de forma rápida y económica, lo que ha llevado a utilizar inconscientemente combustibles fósiles de forma inapropiada. El objetivo de este trabajo es plantear la energía solar fotovoltaica como una alternativa sustentable para la generación de energía eléctrica en Colombia y en el mundo, teniendo en cuenta factores importantes para la implementación de esta tecnología y sus beneficios, como son, los tipos de paneles solares existentes y sus características, las maneras de aprovechamiento y su sustentabilidad y los conceptos técnicos, tales como, la irradiancia e irradiación, para de esta manera, propender por un impacto positivo que coadyuve a la sostenibilidad del medio ambiente para las generaciones futuras.

Palabras clave

Demanda energética, Combustibles fósiles, Energía solar fotovoltaica, Alterativa Sustentable, Medio Ambiente, Irradiación, Irradiancia.

Tabla de Contenido

1. Introducción	2
2. Energía Solar Fotovoltaica.....	3
3. Tecnología celulas solares fotovoltaicas	5
4. Tipos de conexiones.....	6
4.1 Interconectados a la red eléctrica.....	6
4.2 Sistemas independientes	6
5. Radiación.....	6
6. Beneficios	8
7. Estudio de Caso	9
8. Discusión	10
9. Conclusiones	11
10. Bibliografía	12

1. Introducción

El elemento principal que ha permitido el desarrollo del hombre y su separación del mundo animal, ha sido la creatividad, la cual, con el paso del tiempo le ha permitido desarrollar conceptos importantes para la humanidad. Siendo uno de los más destacados la Revolución Industrial, desarrollada a mediados del siglo XVIII en Gran Bretaña y considerada una de las más grandes transformaciones sociales, económicas y tecnológicas del ser humano, gracias a la aplicación de nuevas formas de generación de energía (máquina de vapor Fig.1), con la cual, se pudo transformar materias primas más duras en productos terminados y a partir de esta, se implementa la industria como principal elemento productivo [1].

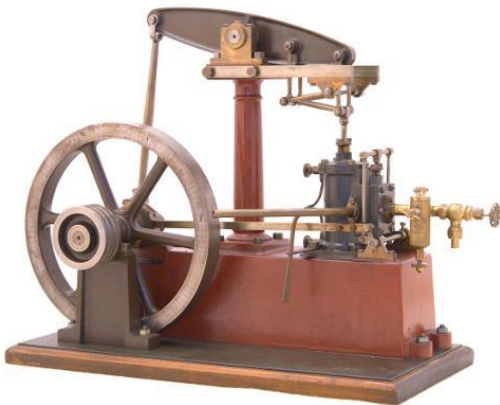


Fig.1 Máquina de vapor a utilizada en la revolución industrial [2].

A partir de ese momento el uso de combustibles fósiles (carbón) se convirtió en una de las principales fuentes de energía para la humanidad. Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), junto con la energía nuclear, hacen parte de las energías no renovables, llamadas así, ya que, al ser aprovechadas como fuentes primarias en la generación de energía útil, agotan sus yacimientos sin la posibilidad de ser sustentables en el tiempo [3].

El uso de las energías no renovables como principal fuente de generación de energía presenta dos grandes problemáticas, la primera es la cantidad limitada de combustibles fósiles existentes en el planeta, los cuales a la rata de consumo actual para el 2030 se habrán acabado [4], [5], y la segunda es el daño que le causan al planeta las constantes emisiones de CO_2 generadas al momento

de la combustión para generar energía, estas emisiones se quedan en la atmosfera reteniendo la radiación solar que entra al planeta como representa la Fig.2. Causando así el llamado “efecto invernadero”, calentando cada vez el planeta [6].

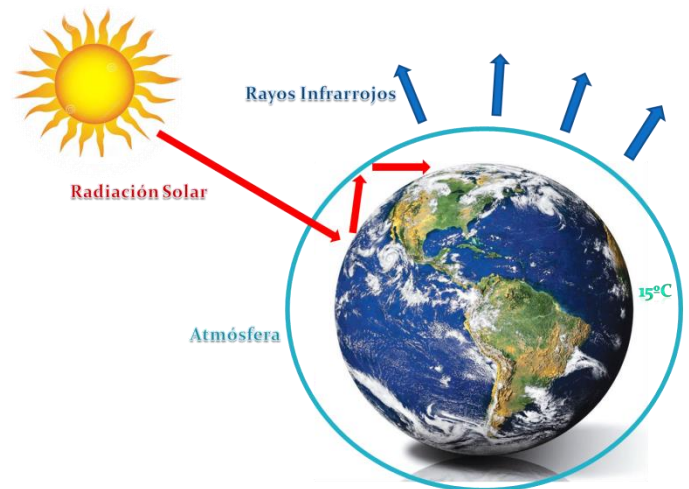


Fig.2 Esquema efecto Invernadero causado por la acumulación de CO_2 en la atmosfera [6]

Esta realidad que se está viviendo día a día, ha motivado el estudio de distintas alternativas para la generación de energía sin que sea necesaria la combustión de algún mineral, estas alternativas se denominan “energías renovables” o también se conocen con el nombre de “energías limpias”, llamadas así, pues la energía la produce la naturaleza es decir, que no se requiere que el ser humano la transforme para poder aprovecharla [3].

Los tipos principales de energías renovables son:

- Energía Solar
- Energía geotérmica
- Energía eólica
- Energía biomasa
- Energía hidráulica
- Energía a partir del mar

Cada una utiliza distintas fuentes de energía primaria (Ver Fig.3) y se pueden encontrar directamente en la naturaleza, como es el caso de la radiación solar cuya fuente inagotable es el sol. Las energías limpias presentan las siguientes ventajas [3]:

- Contribuyen a la mejora del medio ambiente
- Evita grandes emisiones de CO_2
- Aumenta la independencia energética
- Puede generarla cualquier persona u empresa

- Producción de energía de forma descentralizada
- Mejora la calidad del servicio eléctrico
- Reduce el consumo de petróleo y otros combustibles

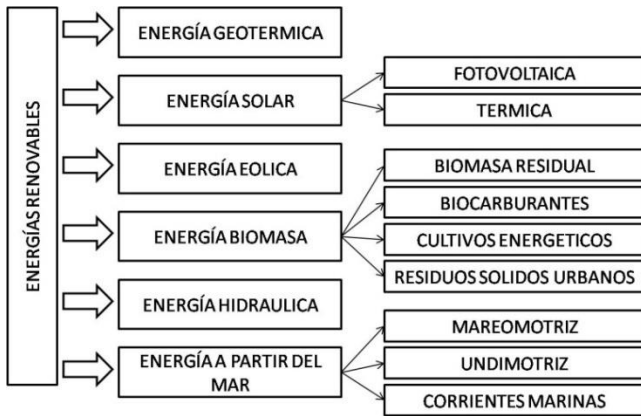


Fig.3 Fuente energética de las Energías renovables [3]

En la actualidad, ante el incremento de la demanda energética producto del crecimiento poblacional e industrial, la principal fuente de generación de energía sigue siendo a partir de las energías no renovables, teniendo que aproximadamente el 86% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles como el carbón, el gas y el petróleo y tan solo un 13% proviene de energías renovables, como lo muestra la Fig.4 [3].

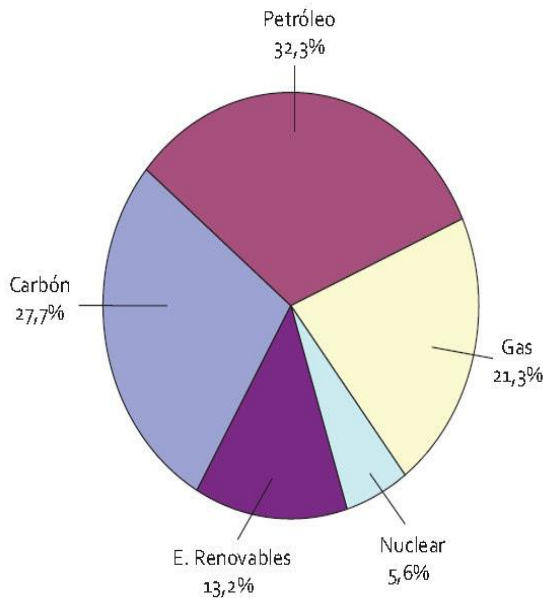


Fig.4 Distribución de los recursos energéticos primarios en el mundo en el año 2010.[3]

La necesidad de evitar efectos irreversibles en el cambio climático, ha llevado a la Unión Europea (UE) a comprometer a los países a reducir las emisiones de

gases de efecto invernadero de un 80% al 95% por debajo de los niveles de emisiones reportadas a 1990, antes del año 2050, esto implica una descarbonización casi por completo del sector energético de Europa, debido a la dificultad de reducir las emisiones en otros sectores. El logro de este objetivo tendrá importantes consecuencias para todo el sistema de generación energética de este continente [7], [8].

El aumento del efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles, sumado al crecimiento del mercado de las energías renovables, donde cada vez estas se convierten en alternativas al alcance de todos gracias a la disminución de sus costos y al aumento de su rentabilidad; posicionan a la energía solar fotovoltaica como una verdadera alternativa para la generación de energía eléctrica, además que su principal fuente de energía, la radiación solar, es una de las que más abundan en el planeta tierra y no genera contaminación alguna. [9].

2. Energía Solar Fotovoltaica

Desde finales del siglo XX, ha crecido la incorporación de la tecnología fotovoltaica en aplicaciones terrestres [10], pasando de algunas pequeñas instalaciones para la investigación, al desarrollo de las plantas de demostración y finalmente, a una fuerte implementación gracias a mecanismos de apoyo gubernamentales que han permitido alcanzar la madurez tecnológica en unos pocos años [11].

Países como Alemania, Italia o España han permitido desarrollar una economía de escala, que en zonas con buenos niveles de radiación solar está permitiendo llegar a la denominada “paridad con la red” (grid parity) [11], punto de inflexión, donde el coste de la energía de origen fotovoltaico es igual al coste de la energía eléctrica convencional [12].

La energía fotovoltaica se genera a partir del efecto fotoeléctrico, que consiste en que bajo ciertas condiciones, los fotones consiguen liberar electrones de los átomos a que pertenecen, produciéndose así corriente eléctrica. No obstante, para que se produzca la liberación de los electrones se requiere una cantidad de energía determinada, por lo cual, no toda la radiación solar cuenta con la capacidad de liberar dichos electrones, únicamente, aquella cuya longitud de onda conduce una energía asociada suficiente.

A la energía necesaria para liberar un electrón se le llama “banda prohibida” o “gap”, los fotones con energía mayor al “gap” interactúan con los electrones

covalentes que unen los átomos de silicio de la célula solar, rompiendo los enlaces, liberando electrones y permitiendo la generación de energía eléctrica aprovechable[13].

El silicio, principal elemento empleado para la construcción de los módulos fotovoltaicos, cuenta con una energía de gap de 1,1 eV (el electrónvoltio es la energía que un electrón adquiere al pasar a través de una diferencia de potencial de exactamente un voltio, numericamente un eV equivale a $1,6 \cdot 10^{-19}$ joules) [14], dado que la energía asociada a la radiación solar varía entre 0,59 y 5,9 eV, el silicio no resultará útil para aquella radiación cuya energía no este entre los 0,59 y 1,1 eV [13],[15].

La célula solar fotovoltaica, es el dispositivo capaz de capturar la energía del sol y convertir parte de ella en electricidad, gracias al efecto fotoeléctrico. Existen diversas tecnologías de células fotovoltaicas con sus características particulares y en distintas fases de desarrollo. Hay tecnologías maduras, como las células mono-cristalinas y poli-cristalinas, utilizadas ampliamente desde tiempo atrás en aplicaciones terrestres, mientras que otras como las células compuestas de “arsienuro de galio” son de reciente desarrollo y se dispone de menor experiencia con ellas.

Las células solares fotovoltaicas se asocian y encapsulan en módulos que serán el elemento constructivo utilizado para la implementación de los sistemas solares fotovoltaicos Fig.5 [16]. La potencia, tensión y corriente de un módulo dependerá del número de células solares asociadas y de las condiciones de trabajo (radiación, viento, inclinación, etc.). la radiación incidente y la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas determinan mayoritariamente los parámetros eléctricos de operación de un módulo fotovoltaico [16].

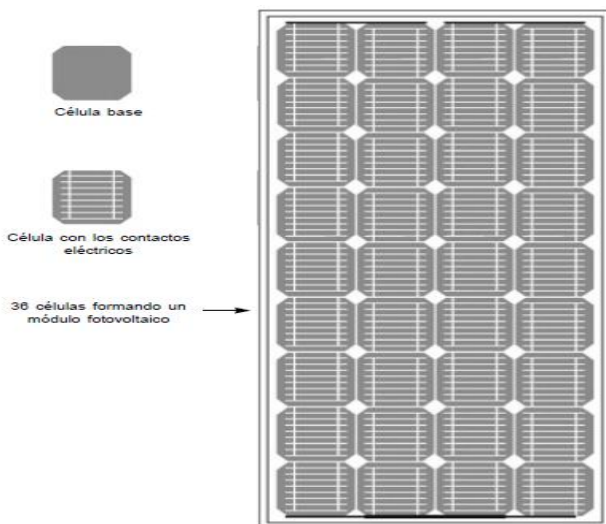


Fig.5 Esquema de un Módulo solar Fotovoltaico. [18]

Para incrementar la energía generada es habitual la utilización de más de un módulo fotovoltaico, formando lo que habitualmente se denomina “el campo solar fotovoltaico”. Mediante la conexión eléctrica adecuada de los módulos (ver Fig.6), se pueden alcanzar niveles de potencia necesarios para cualquier aplicación, existiendo sistemas desde los pocos vatios (como en algunas señales de tráfico) hasta del orden de los megavatios (grandes parques fotovoltaicos o huertas fotovoltaicas) [16].

Un dispositivo fundamental en las instalaciones fotovoltaicas es el inversor, el cual convierte la energía generada por los módulos fotovoltaicos en electricidad adecuada para su uso en las redes eléctricas convencionales [17].

El coste, el tamaño y el peso del inversor, han venido reduciéndose, debido a las mejoras técnicas y al progreso en el diseño del circuito del inversor y a su integración con funciones de control y protección necesarias para el circuito [18].

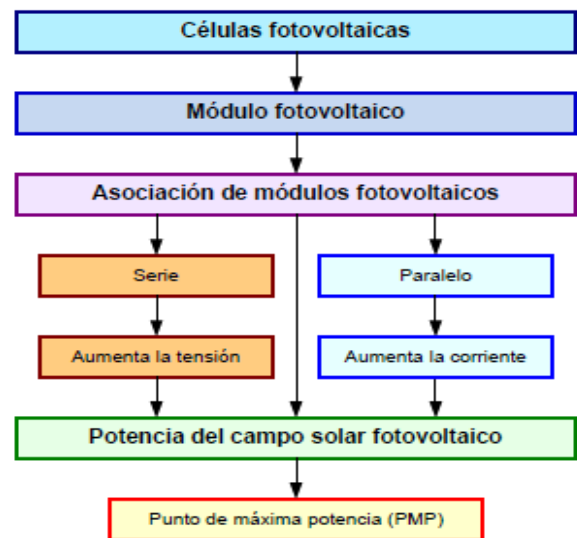


Fig. 6 Tipos de Asociación de los Módulos fotovoltaicos para distintas aplicaciones. [11]

De todos los posibles puntos de trabajo del campo solar fotovoltaico, el punto de máxima potencia o PMP, es un punto singular, dado que en este punto de trabajo el campo solar fotovoltaico genera la máxima energía para unas condiciones de operación determinadas (radiación, temperatura, viento, etc.), es por ello que para optimizar la generación de energía del sistema fotovoltaico, resulta necesaria la inclusión de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia, por lo cual, se ha incorporado esta, a las funciones del inversor [19], [20].

Las células solares que se han nombrado se clasifican dependiendo de los materiales de las que son fabricadas, entre los cuales se encuentran (ver Fig. 8) [21], [22]:

El PMP se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp}$$

Donde:

P_{mp} : Punto de potencia máxima

V_{mp} : Voltaje de máxima potencia

I_{mp} : Corriente de máxima potencia

Que son datos que se obtienen en la gráfica corriente-voltaje de la ficha técnica del fabricante de cada panel fotovoltaico (Fig. 7) [19].

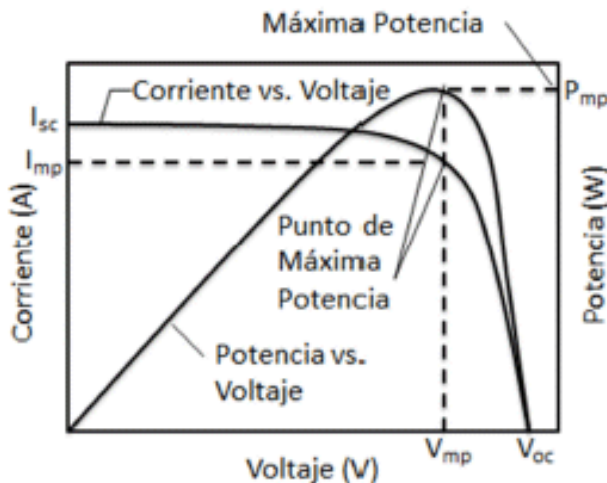


Fig. 7. Curva de productos corriente-voltaje y curva I-V [19]

Con el PMP se puede calcular la eficiencia en la conversión de energía del panel fotovoltaico utilizando la siguiente ecuación [19]:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{E \times A_c}$$

Donde:

E : Nivel de radiación sobre la superficie del panel (W/m^2), bajo condiciones estándar.

A_c : Superficie del panel fotovoltaico (m^2)

3. Tecnología células solares fotovoltaicas

- Silicio monocristalino (m-Si): el cual ha ocupado durante años el primer lugar en porcentaje de implementación en el mercado, su principal ventaja es la eficiencia energética (15 al 21%), pero su costo de fabricación es elevado [23].
- Silicio policristalino (p-Si): ha permitido en los últimos años el despegue del sector económico de la energía solar fotovoltaica, costo de fabricación inferior al del monocristalino y una eficiencia obtenida del orden del 16%
- Silicio amorfo (a-Si): resulta económico de fabricar, pero la alta degradación que sufre este material respecto a la potencia eléctrica generada han impedido su comercialización masiva hasta el momento actual, recientes tecnologías de “lámina delgada” que están en distintas fases de desarrollo presentan eficiencias entre el 6% y el 10%.
- Existen algunas tecnologías las cuales utilizan otros materiales semiconductores como (Cd, Te, C, Se,..) las cuales pueden llegar a eficiencias con valores cercanos al 15% en algunos casos.
- Las tecnologías compuestas de alta y muy alta eficiencia (pueden superar el 25%) son complejas de fabricar y muy costosas debido a la utilización de otros materiales semiconductores (Ga, As,...) reservándose para aquellas aplicaciones especiales donde el costo no es un factor importante [24].

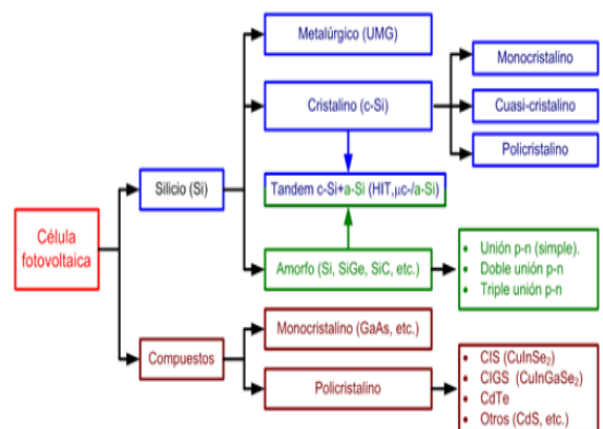


Fig.8 Tipos de células fotovoltaicas según su material [12].

Para evitar la reflexión de la luz al incidir sobre las células y procurar así, la mayor captación de energía, existe la posibilidad de aplicarles distintas capas anti-reflectivas, así como, el texturizarlas, que se puede hacer sólo en silicio mono-cristalino, que consiste en crear en

la superficie de la célula unas micro pirámides para captar más cantidad de luz [21], [25].

4. Tipos de conexiones

Los sistemas solares fotovoltaicos dependiendo de la locación y de la aplicación para la cual fueron instalados pueden ser de dos tipos [25]:

- Interconectados a la red
- Sistemas aislados

4.1 Interconectados a la red eléctrica

Sucede cuando el sistema fotovoltaico está conectado a la red eléctrica, cuando se genera más de la energía necesaria para el consumo diario, el excedente se aporta a la red eléctrica y de esta manera no se desperdicia, siendo beneficiario en algunos países a incentivos tributarios además de un pago por la venta de electricidad a la red eléctrica, cuando la radiación del día no es suficiente para generar la energía necesaria se toma energía de la red y de esta manera garantizar el servicio de energía de manera constante (Ver Fig. 9) [26], [27].

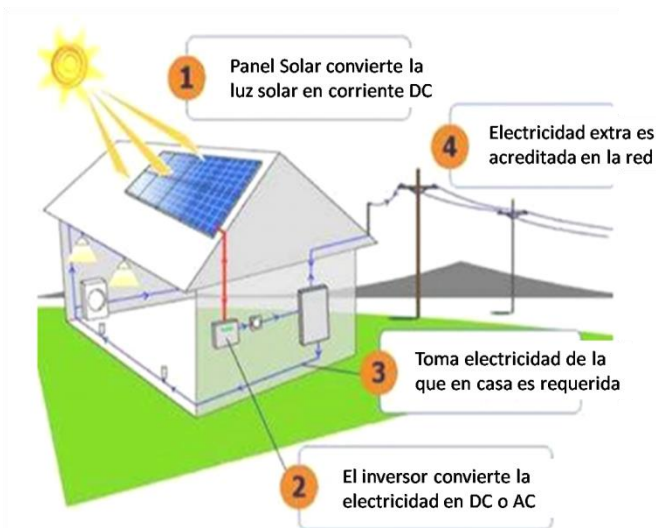


Fig. 9 Sistema solar fotovoltaico interconectado a la red eléctrica [26].

4.2 Sistemas independientes

Estos sistemas funcionan de manera independiente a la red eléctrica, el sistema debe ser diseñado para generar más energía de la necesaria, con el fin de almacenar el excedente en baterías para su posterior uso (ver Fig. 10), en algunos casos pueden estar conectados a algún tipo de

generador de respaldo para garantizar el servicio de energía [28].

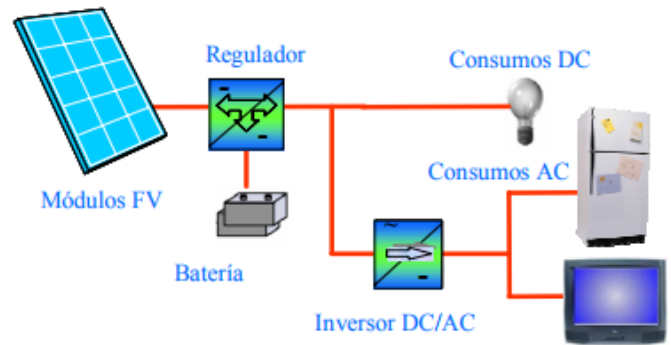


Fig.10 Estructura básica sistema solar fotovoltaico independiente de la red eléctrica [28].

En Colombia las zonas interconectadas a la red eléctrica representan el 34% del territorio nacional, donde vive el 96% de la población total, censada en 44.7 millones de personas por el DANE en el año 2009 Fig. 11 [29].

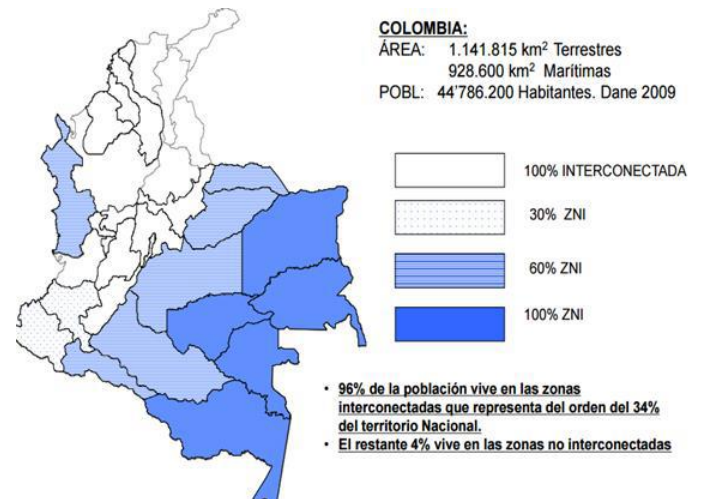


Fig. 11 zonas interconectadas y no interconectadas en Colombia [29].

5. Radiación

La radiación es uno de los factores más importantes en cuanto a lo que tiene que ver con la generación de energía solar fotovoltaica, debido a que la producción de energía depende directamente de la radiación solar incidente en la célula solar, esta radiación depende de la zona geográfica en que se ubique, la estación del año, la presencia de nubes y la inclinación respecto a la perpendicular con el sol [30].

En Colombia se encuentran zonas donde la radiación incidente está entre 3,0 Kw/h/día y 6,0 Kw/h/día por

metro cuadrado (ver figura 12) [31], razón por la cual las condiciones del país son favorables para la implementación de esta tecnología debido a su buen nivel de radiación incidente, en especial en las zonas del norte del país como en los departamentos del Cesar, Magdalena, Atlántico y la Guajira.

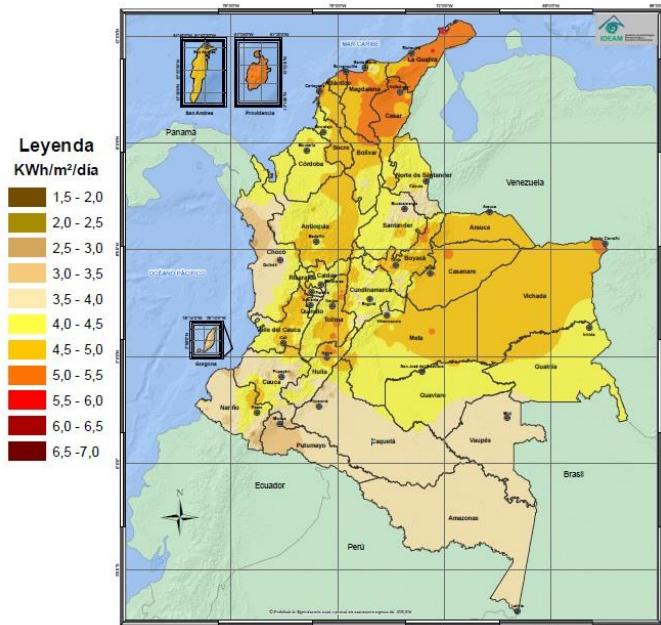


Fig. 12 Irradiación Global Horizontal República De Colombia 2014 [31].

Si se compara la energía solar fotovoltaica con los combustibles fósiles, la radiación al ser la fuente de la cual proviene la energía de esta tecnología, es equivalente a la gasolina o al carbón, de los cuales se produce energía con su combustión, pero con la diferencia de que la radiación la tomamos directamente del sol, sin necesidad de realizar ningún proceso de transformación, y sin que sea necesario desbastar el entorno con todos los costos y riesgos que esto conlleva [32].

Existen dos términos importantes que se deben saber sobre la Radiación [30]:

- La Irradiancia: es la energía que incide sobre una superficie por unidad de área, se mide en watts sobre metro cuadrado (W/m^2), la irradiancia máxima que llega a la superficie terrestre es de $1100W/m^2$.
- La Irradiación: es el valor acumulado de la irradiancia en un determinado tiempo se mide en watt hora sobre metro cuadrado (Wh/m^2)

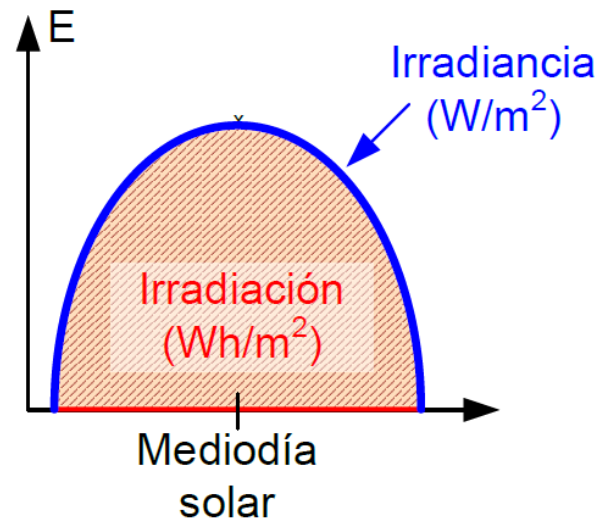


Fig.13 Grafica de Irradiancia e irradiación respecto al tiempo [30].

Para el cálculo de la generación de energía eléctrica a partir de los paneles fotovoltaicos, se debe tener en cuenta, las horas denominadas “pico”, las cuales son en las que más irradiación hay (Fig.14) y que coinciden para Colombia normalmente con el medio día Fig. 13 [33], [34].

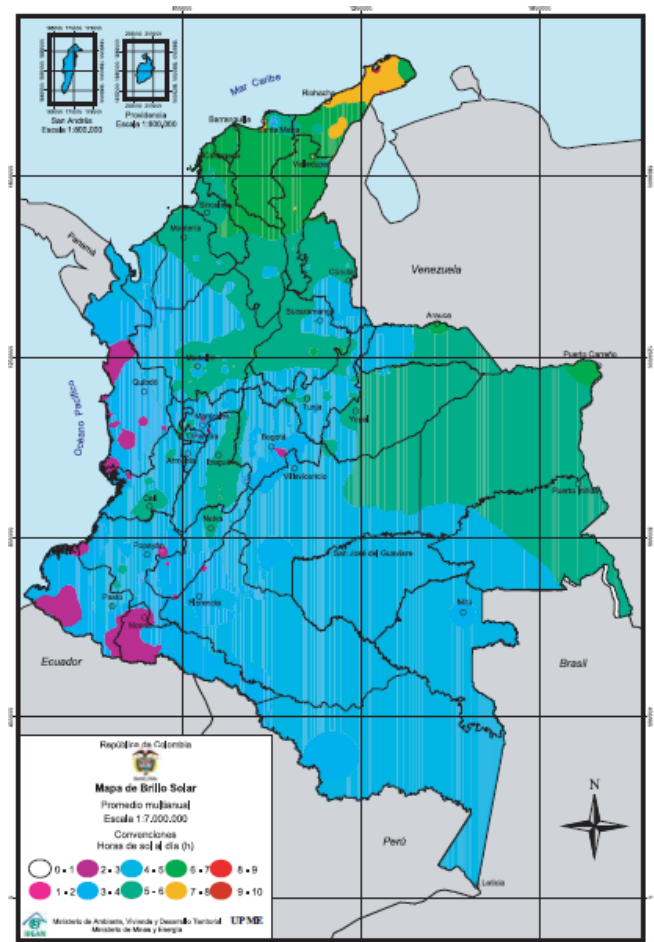


Fig. 14 Mapa de Brillo Solar República De Colombia 2014 [34].

Un requisito fundamental para el diseño y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico es la revisión de las tablas de radiación de la locación donde se va a implementar el sistema, dichas tablas se encuentran en la página web de la NASA [35] en donde se registran la latitud y longitud de la locación de donde se obtienen las tablas de radiación por cada mes y en promedio anual, de esta manera teniendo la radiación promedio y las horas pico promedio de la zona donde se desea implementar la energía solar fotovoltaica, podemos aproximar la totalidad de la radiación incidente y la cantidad de paneles necesarios para cada aplicación.

6. Beneficios

La implementación de sistemas a partir de la energía solar fotovoltaica en Colombia tiene beneficios gracias a la ley 1215 de 2008, la cual, exonera a los cogeneradores de energía de pagar la contribución de 20% sobre la energía que generen para su consumo, además, de unos incentivos tributarios los cuales están reglamentados por la ley 1715 del 2014 [36], [37], [38].

Al igual que en Colombia en muchos otros países, la tendencia está en apoyar estas tecnologías introduciendo incentivos tales como, precios de compra preferenciales para la energía generada dentro de las redes nacionales y subsidios de dinero para instalaciones solares, debido al “compromiso” de los países de hacer algo respecto al cambio climático, razón por la cual la implementación de esta tecnología en el mundo incrementa cada año (Fig. 15) [39], [40].

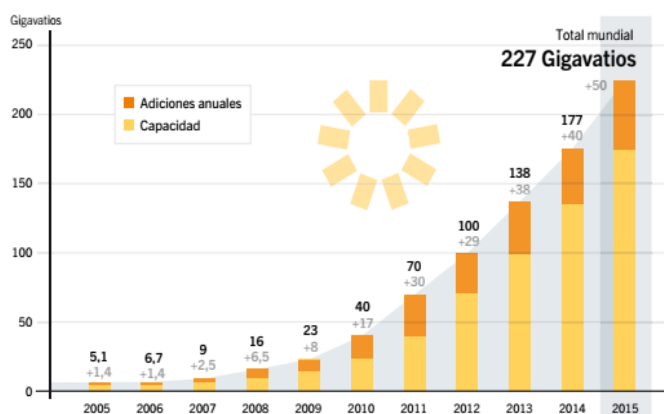


Fig. 15 Capacidad y adiciones anuales de energía solar fotovoltaica 2005 – 2015 [9].

Debido a esto, en Colombia ya se puede encontrar el primer gran proyecto para la implementación de energía solar fotovoltaica, como lo es el proyecto Celsia Solar, ubicado en Yumbo (Valle del Cauca), el cual considerado la Granja de energía solar más grande de

Colombia fue terminado en septiembre del 2017 y tiene la capacidad de generar 16.5 gigavatios hora (Gwh) al año, lo equivalente al consumo básico mensual de energía de 8.000 viviendas, evitando así, la emisión de 6.600 toneladas de CO_2 al año a la atmosfera [41].

También es posible encontrar proyectos exitosos de aplicación de energía solar fotovoltaica a menor escala en Colombia, como los implementados en instituciones tales como [42]:

- Institución Educativa Martinica: ubicada en zona rural de Montería, es el primer colegio en Colombia que funciona con energía solar y cuenta con una instalación de 16 paneles solares que garantizan luz durante 24 horas.
- Universidad Autónoma de Occidente: ubicada en Cali, cuenta con 638 paneles solares cuyo objetivo es la investigación para el uso de la energía solar fotovoltaica en Colombia y el apoyo del suministro eléctrico de la universidad.
- Institución Pública Ramón B. Jimeno: ubicada en Bogotá, cuenta con 100% de iluminación producida por energía solar gracias a la instalación de 148 paneles solares.

Un gran beneficio de la energía fotovoltaica resulta el costo mínimo de mantenimiento y operación que esta posee, razón por la cual el único gasto significativo de esta tecnología está al momento de comprar e instalar los equipos y en caso de utilizar baterías en el cambio de las mismas cada 5 años, pero aparte de estos gastos, por aproximadamente 25 años que es la vida útil de los paneles solares [43], solo se percibirían las ganancias por la generación de energía eléctrica, puesto que lo único que necesita es radiación solar y esta es gratis [44].

Por cada kilovatio hora (Kwh) que se genera por medio de energía solar fotovoltaica se reducen las emisiones de CO_2 en 0,6 kg eso quiere decir que por cada kilovatio hora (Kwh) generado, se evita que 0,6 kg de CO_2 lleguen a la atmosfera causado daño a la capa de ozono y generando calentamiento al planeta [45].

Un estudio realizado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de la Universidad de Princeton, sostiene que el aumento de las temperaturas de las aguas causado por el calentamiento global, alimenta la intensidad de los huracanes y está también relacionado con la frecuencia de los mismos [46].

En Colombia, debido al desarrollo incipiente de la tecnología fotovoltaica, aún no es posible encontrar datos estadísticos los cuales permitan realizar una

comparación entre costos de energía generada con métodos convencionales y con energía fotovoltaica, razón por la cual se toman datos del exterior, como en México donde según la Asociación Mexicana de Energía Fotovoltaica, los precios de esta tecnología en el año 2014 fueron aproximadamente 75% menores que en el año 2009, gracias a esto es posible encontrar costos de \$0,08 dólares por cada Kwh generado en proyectos fotovoltaicos de gran escala, sin subsidios, esto equivale a \$240 pesos colombianos, lo cual es menor a los \$440,8 pesos que cuesta el Kwh en Bogotá para el estrato 4 y \$374,7 pesos para el estrato 3, según la tabla de precios de Codensa [47], [48].

Una de las principales ventajas de la fotovoltaica es la escalabilidad, ya que siguiendo procesos de diseño similares, es posible desarrollar una planta de unos pocos kilovatios o una planta de varios megavatios [17]. Y gracias al crecimiento de la capacidad de fabricación en Europa se ha venido apreciando una estabilización en relación a las diferencias de precios que pueden obtenerse en función del volumen de compra como muestra la Fig. 16. Esta tendencia responde al proceso de conversión del panel solar en un producto genérico (commodity) que muchos analistas auguran a mediano plazo [49], [50], [51].

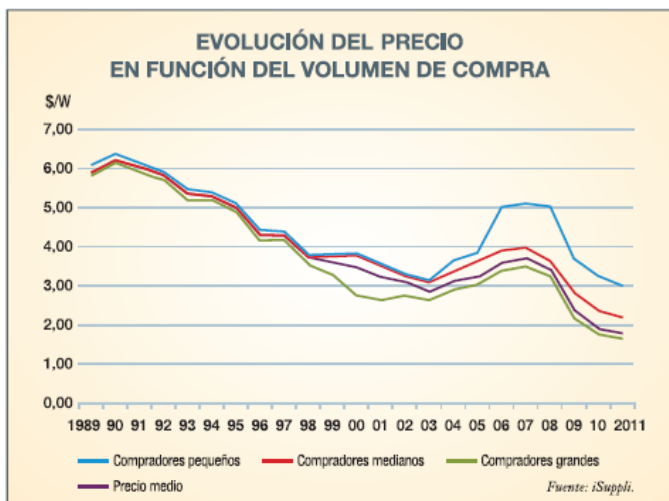


Fig.16 Evolucion del precio en funcion del volumen de compra [49].

Gracias a esto, son cada vez más las aplicaciones en las cuales se puede encontrar la energía fotovoltaica, tales como [52]:

- Electrificación de viviendas
- Bombeo de agua, riego
- Telecomunicaciones: repetidores de señal, telefonía móvil
- Tratamiento de aguas: desalinización, cloración

- Señalizaciones: marítima, ferroviaria, terrestre y aérea
- Alumbrado público
- Sistemas de telecontrol vía satélite, detección de incendios
- Soluciones de movilidad: automóviles, motos, barcos
- Electrificación de industrias: maquinaria, bandas transportadoras, etc.

7. Estudio de Caso

En el municipio de San Antero, departamento de Córdoba, se realizó un análisis para la implementación de energía solar fotovoltaica; con el fin de reducir el costo del servicio eléctrico de una aplicación cuya demanda energética es de 3,6 Kwh.

Para dicho análisis se tuvo en cuenta variables como:

- **Ubicación Geográfica:** Longitud 9,3775°N
Latitud -75,7602°W
- **Radiación Solar:** 4,0 – 4,5 Kwh/m²/día
- **Horas Pico de Radiación:** 6 – 7
- **Demanda energética:** 3,6 Kwh
- **Costo Kwh:** \$480 Pesos Colombianos

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso una alternativa de un sistema fotovoltaico en el cual, la energía producida por el sistema se consumirá directamente en la aplicación. Durante las horas de exposición solar los paneles producirán la energía que se necesite y durante la noche o en las horas de menor radiación solar, la red eléctrica seguirá proporcionando la energía. De este modo se podrá reducir la dependencia a la red eléctrica, sin desconectarse de la misma y por tanto obtener una reducción considerable en el costo mensual de energía.

La inversión para este sistema fotovoltaico, es de \$27'468.754 pesos colombianos, donde se incluye 12 Paneles solares de tecnología poli-cristalina con una potencia de 320 Watts, 1 micro inversor de salida monofásica de 1200 Watts, un transformador de 3,6 Kva, la estructura para el montaje de los paneles y el cableado necesario para la instalación del mismo.

Con esta propuesta el costo mensual del servicio eléctrico, se reducirá en un 30%; lo cual es equivalente a \$4'638.851 pesos colombianos al año.

Con los valores de la inversión y del ahorro anual, fue posible calcular la tasa interna de retorno (TIR) del proyecto, con la cual se encontró que para el séptimo año esta será igual a cero, lo que significa que en ese momento se recuperó la inversión inicial y lo que se genere en adelante por los 18 años restantes de vida útil de los paneles solares será solo ganancia.

8. Discusión

Una de las mayores discusiones en cuanto a la utilización de combustibles fósiles, en lugar de la energía solar fotovoltaica es la eficiencia. Se dice que los sistemas de generación de electricidad convencionales pueden alcanzar valores de hasta 50% en los mejores casos (35% en promedio), lo cual, es mucho mayor al 19% de eficiencia que ofrece la tecnología mono-cristalina, pero en estas comparaciones no está considerando todo el proceso de obtención de estos combustibles, en el cual si se tiene en cuenta todo el proceso de transformación desde que la energía solar es absorbida por las plantas por medio de la fotosíntesis antes de su fosilización, más los propios rendimientos de los procesos de recuperación y transformación hasta convertirla en energía útil para el ser humano, se obtendría una eficiencia de alrededor de 0.175%, la cual, es muy inferior a la obtenida por cualquier tecnología fotovoltaica [53].

Es claro que la producción de electricidad con energía fotovoltaica no emite contaminación, no produce gases de efecto invernadero y no utiliza combustibles fósiles. Por lo cual, los beneficios ambientales de la energía fotovoltaica son grandes [18]. Así a la pregunta ¿cuánto tiempo tiene que tener un sistema fotovoltaico para recuperar la energía gastada en la elaboración del sistema? se estima que la recuperación de energía para los sistemas fotovoltaicos es de 3 años para los sistemas que utilizan módulos fotovoltaicos poli-cristalinos de silicio, 2 años para los módulos de película delgada o amorfos y 1 año para los módulos mono-cristalinos, Con retornos de energía de 1 a 3 años y vida útil de 30 años en promedio se concluye que el retorno energético será muy rápido considerando todos los años extra que va a generar energía [54], por lo cual, la idea de que la energía solar fotovoltaica no puede pagar su inversión en energía es simplemente un mito. De hecho, los investigadores Dones y Frischknecht encontraron que en la fabricación de sistemas fotovoltaicos y combustibles fósiles, la producción de energía tiene períodos similares de recuperación de energía (incluyendo los costos de minería, transporte, refinación y construcción) [55].

Además, según un estudio realizado por la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF), las obleas o celdas

fotovoltaicas son las responsables del 60% al 80% de la energía consumida en la fabricación de un módulo fotovoltaico, pero cuando una oblea o celda es reciclada ahorra aproximadamente el 80% de la energía primaria que se consumiría comparada con una oblea o celda que se fabrica nueva, por lo cual reciclando se podrá disminuir en un 50% el periodo de retorno energético [53].

También, se dice que la superficie disponible en el planeta no es suficiente para suplir la demanda energética mundial, siendo esto falso puesto que en realidad esta demanda energética podría ser suplida con un área de 0.15 millones de Km^2 en paneles solares, lo que equivale a un cuadrado de 380km x 380km según los cálculos realizados por la asociación de la industria fotovoltaica ASIF (Fig. 17) [53].

- La energía eléctrica consumida mundialmente se atiende con 0,15 millones de km^2 de fotovoltaica(*):

necesidades eléctricas mundiales = cuadrado de 380 km x 380 km

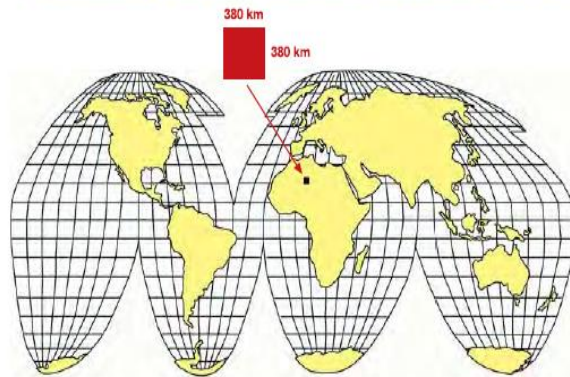


Fig. 17 Necesidades eléctricas mundiales en energía fotovoltaica [53].

En si el principal problema de la energía solar fotovoltaica resulta ser la acumulación de la energía generada, puesto que algunos métodos pueden ser costosos y a pesar que esta tecnología puede progresar mucho sin necesidad de la acumulación de energía, se requerirá de esta para que estas tecnologías se conviertan en los componentes principales de generación de energía [56], [57].

La necesidad de crear nuevos y capaces sistemas de acumulación de energía eléctrica se plantean debido a la crisis de suministros de petróleo, la cual, mostro, las grietas existentes en la estructura de los sistemas de generación de energía [58]. Bajo el punto de vista económico, para nadie es un secreto que la disminución de los precios de los sistemas fotovoltaicos, han hecho que el almacenamiento con baterías de plomo-acido pase a ser una fracción significativa de la inversión total requerida en la instalación fotovoltaica (del orden del

50%), además, de los problemas ambientales que genera la fabricación y los desechos de las baterías [59].

Razón por la cual se empiezan a proponer líneas de investigación y desarrollo con el fin de alcanzar nuevas maneras óptimas de acumulación de energía, entre las cuales se encuentran [60]:

- **Energía Térmica:** Con este procedimiento se debe transformar la energía eléctrica en calor (con resistencias eléctricas, etc.) y almacenar la energía térmica en materiales que sufran procesos de calentamiento.
- **Energía Mecánica:** la energía eléctrica se puede transformar en mecánica y almacenarse en un disco rotatorio o volante de inercia, que este acoplado a un motor-generator que funcione como motor durante la carga (horas de sol) y como generador cuando se desea recuperar la energía almacenada.
- **Energía Hidráulica:** este procedimiento se basa en bombear agua hasta un depósito superior, en las horas de exceso de energía eléctrica (horas de sol), para dejarla caer a un depósito inferior cuando se desea recuperar la energía almacenada por medio de un sistema bomba-turbina, motor-generator; procedimiento idóneo para almacenamiento de energía a gran escala.
- **Aire Comprimido:** se almacena energía eléctrica utilizando su exceso para comprimir aire y almacenarlo en un depósito, generalmente natural. La energía almacenada se recupera permitiendo la expansión del aire, a través de una turbina de expansión que acciona un generador.
- **Energía Eléctrica:** la utilización de condensadores para almacenar energía eléctrica resulta adecuada cuando se trata de pequeñas cantidades de energía durante tiempos cortos.
- **Electroquímica:** dos posibilidades son viables con este sistema de almacenamiento, la primera es la conversión directa de energía solar en hidrógeno a través de las células de efecto Becquerel [61] y generación de electricidad, la segunda es con células solares convencionales las cuales se utilizan para descomponer el agua y generar hidrógeno.

Teniendo en cuenta todas las posibles opciones para acumular la energía eléctrica generada por la tecnología fotovoltaica, se encuentra que las baterías no son la única opción, si no que por el contrario se tiene una amplia posibilidad con la cual trabajar haciendo aún más

sustentable la utilización de energía solar fotovoltaica como principal fuente de generación eléctrica [62].

Pese a existir bastantes alternativas para el almacenamiento de energía eléctrica, una opción viable para evitarlo, es la venta del excedente de energía que se genere en horas del día (cuando la demanda es mayor) a la red eléctrica, para que de esta manera sea aprovechada al máximo.

9. Conclusiones

En este artículo se analizó la realidad energética en la que se encuentra inmersa la humanidad, teniendo en cuenta que a pesar de los efectos ambientales por la utilización de combustibles fósiles por casi dos siglos, aun se prefiere la utilización de estos para la generación de energía.

Pero mucho de esto es causado también por la desinformación a la que la mayoría de personas están sometidas y en algunos casos a intereses particulares de personas a quienes no les interesa que la humanidad se dé cuenta que hay soluciones viables que evitarían la contaminación a partir de CO_2 .

La energía solar fotovoltaica pasó de ser solo un sueño y se ha convertido cada día más en una realidad firme, la cual combinada con las demás energías alternativas pueden dar solución al planeta.

El hecho generar un Kw de energía con sistemas fotovoltaicos, ahora puede ser tan rentable como la generación de energía con los otros medios convencionales, no es lo único que vuelve llamativa esta tecnología; si no también que por cada Kw generado se está evitando la emisión de grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, evitando así los efectos devastadores del calentamiento global de los cuales ha sido testigo la humanidad, como es el caso de la generación de 3 huracanes al tiempo en el Caribe causando innumerables desastres.

Si se compara la eficiencia de un panel fotovoltaico con la del proceso completo de obtención de combustibles de principio a fin, es mucho mayor la eficiencia que se encuentra en la tecnología fotovoltaica, previniendo también posibles accidentes como los que pueden ocurrir en los procesos de extracción de crudo para el petróleo y demás combustibles fósiles, además del hecho de que lo único que se necesita para generar energía es la radiación proveniente del sol.

En Colombia gracias a las políticas adoptadas para el apoyo de las energías renovables, la disminución de los precios de esta tecnología en el mercado global y los buenos niveles de radiación incidente, la implementación de la energía solar fotovoltaica se torna cada vez más sostenible, viéndose así mejores y más grandes proyectos puestos en marcha, los cuales ponen al país un paso más cerca de las energías renovables.

Conforme pasa el tiempo la tecnología seguirá progresando, haciendo aún más efectiva la generación y el almacenamiento de energía, razón por la cual, queda claro que la energía solar fotovoltaica es verdaderamente una alternativa sustentable para suplir las necesidades eléctricas mundiales, lo único que se necesita es darle la oportunidad y trabajar para demostrar al mundo que si es posible y hacerlo realidad.

10. Bibliografía

- [1] C. Gonzales, "Revolucion Industrial y cambios sociales: impacto en la humanidad," Universidad de Murcia, Murcia, España, Feb-2011.
- [2] "¿Cómo funcionan las máquinas de vapor?" [Online] Available: <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/2010/12/21/%C2%BFcomo-funcionan-las-maquinas-de-vapor/> [Accessed: 23-sep-2017].
- [3] S. Seguí-F.J Gimeno, S. Orts, "Energía Solar Fotovoltaica." Departamento de Ingeniería Electronica, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España, Jul – 2016.
- [4] R. Fernandez, "El Inicio del fin de la era de los Combustibles Fosiles." Rev. Viento Sur, Madrid, 2006.
- [5] M. Rodot, "Energía Solar una Respuesta Razonable," Energía Solar Fotovoltaica, Rev. Mundo Electrónico, ISBN: 84-267-0572-3, pp. 9-13, Barcelona, España, 1998.
- [6] L. Bird, J. Molinelli "El calentamiento global y sus consecuencias." 2011.
- [7] EPIA, "Connecting the sun, Solar photovoltaics on the road to large-scale grid integration," European Photovoltaic Industry Association, pp. 1-120, Sep-2012.
- [8] ASIF, "Hacia Consolidacion de la Energia Solar fotovoltaica en España," Asociacion de la Industria Fotovoltaica, España pp. 1-88, 2009.
- [9] "Home - REN21." [Online]. Available: <http://www.ren21.net/>. [Accessed: 15-sep-2017].
- [10] P. Cheremisinoff, T. Regino "Principles & Applications of Solar Energy," Ann Arbor Science, ISBN: 0-250-40247-5, pp. 9-15, Michigan, USA, 1978.
- [11] S. Seguí, S. Orts, F. J. Gimeno, "Módulos Fotovoltaicos." Centro De Formación Permanente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Jul – 2014.
- [12] J. Hauff, D. Rendschmidt, "Enabling the european consumer to generate power for self-consumption." SunEdison, US ,pp. 1-52, Nov-2011.
- [13] A. Soria, "Aprovechamiento electrico de la radiacion solar: Principio de funcionamiento del modulo fotovoltaico." Departamento de Ingeniería Termica Y de Fluidos, Universidad Carlos III De Madrid, Madrid, España, 2008.
- [14] "Definition of an electron volt" [Online] Available: https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/comment2_ast15jan_1/ [Accessed: 12-oct-2017].
- [15] "Tecnología de módulos," SMA Solar Technology AG.
- [16] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016.
- [17] S. Seguí, S. Orts, F. J. Gimeno, "Inversores Fotovoltaicos en instalaciones de conexión a red." Centro De Formacion Permanente, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España, Jul – 2014.
- [18] IEA, "Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments," International Energy Agency, Tokyo, Japon, Dic-2012.

- [19] S. Edwin and T. Salamanca, "AN OPEN-SOURCE HARDWARE I-V CURVE TRACER FOR MONITORING PV OUTPUT IN BOLIVIA," vol. 2, no. 14, pp. 42–64, 2014.
- [20] CT, "Power Factor Correction ." Carbon Trust, UK, Mar – 2012.
- [21] Anonimo, "Energía Solar Fotovoltaica en el país vasco." Ente Vasco de la energía, Bilbao, España, Oct – 2000.
- [22] C. Magistris, "Producción De Módulos Fotovoltaicos," Trina Solar.
- [23] SNL, "Single Crystal Silicon Cells." Photovoltaic Systems Research & Development, Sandia National Laboratories, USA, Oct – 2008.
- [24] SNL, "Multijunction Devices ." Photovoltaic Systems Research & Development, Sandia National Laboratories, USA, Oct – 2008.
- [25] Sun Power Application Note, "Sun Power Discovers the Surface Polarization Effect in High Efficiency Solar Cells 2005"[Online]. Available: [www.sunpowercorp.com /](http://www.sunpowercorp.com/). [Accessed: 20-sep-2017].
- [26] S. Krishnamurthy, "Aplicaciones de sistemas Fotovoltaica." P-13, 2015.
- [27] J. De Cusa, "Energía solar para viviendas," Monografías CEAC de la Construcción, ISBN: 84-329-2967-0, P.190, Barcelona, España, 1988.
- [28] M. Abella, "Sistemas Fotovoltaicos." Laboratorio de energía solar fotovoltaica, CIEMAT, Madrid, España, 2010.
- [29] E. Barrera, "Revisión de CO2 en Colombia por la generación energía eléctrica para el sistema interconectado nacional en época de fenómeno del niño," Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, Jul-2017.
- [30] S. Seguí-F.J Gimeno,S. Orts, "Instalaciones Solares Fotovoltaicas De Conexión a Red." Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Jul – 2016.
- [31] IDEAM, "Irradiación global horizontal medio diario anual," Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia, 2014.
- [32] P.reyes, "Combustibles fosiles y contaminacion." Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, pp. 87-93, Bogota, Colombia, 2008.
- [33] J. Rodriguez, "Energía Solar Fotovoltaica." Universidad de Sevilla, Sevilla, España, P- 155, 2010.
- [34] IDEAM, "Mapa de Brillo Solar," Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia, 2014.
- [35] "Surface meteorology and Solar Energy." [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETSscreen/>. [Accessed: 20-sep-2017].
- [36] "Informe economico." Camara de comercio cali, Abril-2016.
- [37] "Ley 1715 de 2014." Congreso de la Republica de Colombia, Mayo-2014.
- [38] H. Rodríguez, F. Gonzales, "Formulación de un Plan de desarrollo Para las Fuentes no Convencionales De Energía en Colombia (PDFNCE)," Corpoema-UPME, Vol. II. Diagnóstico de las FNCE en Colombia, P. 137-152, Bogotá, Dic-2010.
- [39] H. Benavides, G. Leon, "Gases de efecto invernadero y el cambio climatico." IDEAM, Colombia, Dic-2007.
- [40] B. Richard, C. Gudel, S. Rollier, "Solar Installations Control & Protection," Bodos Power Systems, jun-2009.
- [41] Celsia, "A la Vanguardia de las Energías Renovables en Colombia," Celsia Solar Yumbo, Colombia, Sep. - 2017.
- [42] "Top Proyectos Exitosos de Energía Solar en Colombia" [Online] Available: <http://www.laguiasolar.com/top-5-proyectos-exitosos-de-energia-solar-en-colombia/> [Accessed: 2-nov-2017].

- [43] "TSM-PDG5 The most durable Module," Trina Solar.
- [44] C. F. Morales Sánchez, "Cálculo de una Tarifa de Alimentación para Instalaciones Fotovoltaicas Residenciales en Colombia *," *Semest.Económico*, vol. 16, no. 34, 0120–6346, p. 13–40, Octubre, 2013.
- [45] "Greenpeace and EPIA - Solar Generation 6, Solar photovoltaic Electricity Empowering the World." Bruselas, pp. 1–100, 2011.
- [46] "Global Warming and Hurricanes" [Online] Available: <https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/> [Accessed: 01-nov-2017].
- [47] "Costos de energía fotovoltaica" [Online] Available: <http://www.asolmex.org/costos.html> [Accessed: 23-oct-2017].
- [48] "Nuevos valores del kilovatio en Colombia" [Online] Available: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye> [Accessed: 23-oct-2017].
- [49] ASIF, "Hacia el crecimiento sostenido de la fotovoltaica en España," Asociación de la Industria Fotovoltaica, España, pp. 1-126, 2011.
- [50] REN21 "Renewables 2013 Global status Report," Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2013.
- [51] A. Garcia, "Southern European markets are reaching grid parity despite the situation," *Energetica International*, Trina Solar, Vol 129, Mar-2013.
- [52] "Energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones" [Online] Available: <http://www.gie.com.co/es/productos/energias-renovables/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones> [Accessed: 23-oct-2017].
- [53] ASIF, "Prejuicios y Mitos sobre la tecnología solar fotovoltaica." Asociación De La Industria Fotovoltaica, Valencia, España, 2010.
- [54] N.G. Dhere, H.P. Patil, S.M. Bet, A.U. Pai, V.V. Hadagali, "Investigation of Defradation Aspects of Field Deployed Photovoltaic Modules," National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting, 24.-26.03.2003, Dever, Colorado, NREL, CD-520-33586, pag.958, jun - 2003.
- [55] "Energy efficiency and renewable energy," U.S. Departamen of Energy, USA, Washington D.C., Ene-2014.
- [56] "Renewables 24/7 Infrastructure needed to save the climate," Greenpeace, European renewable energy council, 2009.
- [57] V. Fthenakis, "Enabling Solar and Wind Energy Technologies on Grand Scale," Center For Energy & Life Cycle Analysis, Earth and Environmental Engineering, Columbia University, P. 357, Oct-2008.
- [58] F. R. Kalhammer, "Sistemas para Almacenar Energía," *Investigación y Ciencia*, pp. 8-19, Feb-1980.
- [59] J. Duffie, W. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes," University of Wisconsin-Madison, ISBN: 978-0-470-87366-3, 4th Edition, P-910, USA, 2013.
- [60] J. Fullea, C. Sánchez, "Acumulación de Energía Eléctrica de origen Fotovoltaico I," *Energía Solar Fotovoltaica*, Rev. Mundo Electrónico, ISBN: 84-267-0572-3, pp. 130-138, Barcelona, España, 1985.
- [61] F. Graña, C. Sánchez, *Matelec Industry*, Rev. Mundo Electrónico, Edicion-85, 2016.
- [62] F. Vanek, L. Albright, L. Angenent, "Energy Systems Engineering Evaluation and Implementation," Mc Graw Hill, ISBN: 978-0-07-178778-9, 2^h Edition, P-640, USA, 2012.