

**ALTERNATIVA EN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR ANTE CRISIS
ENERGÉTICA EN COLOMBIA**

**PRESENTADO POR:
LADY VIVIANA PINZÓN ARÉVALO
Profesional en Química**

**DIRIGIDO POR:
FERNANDO ORTIZ**



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE
LOS RECURSOS NATURALES.
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ
2016**

ALTERNATIVA EN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR ANTE CRISIS ENERGÉTICA EN COLOMBIA

ALTERNATIVE IN THE EXPLOITATION OF SOLAR ENERGY IN COLOMBIA TO ENERGY CRISIS

Lady Viviana, Pinzón Arévalo
Química, Analista Físicoquímico, Vitrofarma S.A
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá-Colombia, 2016
vivipinz@hotmail.com

RESUMEN

Colombia es un país que a pesar de su riqueza natural, ha centralizado sus fuentes energéticas, en métodos convencionales como las hidroeléctricas y combustibles fósiles, sistemas vulnerables y poco eficientes, como se ha venido demostrando en los últimos años, los fenómenos climáticos generan alertas que ponen en amenaza la continuidad del servicio. El uso de energías alternativas en el mundo es una tendencia cada vez más predominante, teniendo en cuenta que factores como la sobreexplotación de los recursos naturales y cambios climáticos, han obligado a la implementación de estos nuevos métodos de generación de energía, sin embargo el país aún no se incluye en ese panorama, aun sabiendo que posee varias ventajas que determinarían un uso eficiente de este tipo de energías renovables. Entre esas características favorables, se encuentra su gran potencial energético solar, el cual está influenciado por su posición geográfica y como consecuencia el clima que favorece todas las condiciones de brillo solar para que varias regiones del país, capten y transformen a través de tecnologías aplicadas la energía solar, la cual es una fuente inagotable y permanente.

Palabras Claves: Energía Alternativa, Energía solar, Brillo Solar, Celdas fotovoltaicas.

ABSTRACT

Colombia is a country that despite its natural wealth, has centralized its energy sources, conventional methods such as hydroelectric and fossil fuels, vulnerable systems and inefficient, how it has been demonstrated in recent years, where weather events generate alerts they put in threatening continuity of service. The use of alternative energy in the world is an increasingly prevalent trend, considering factors such as overexploitation of natural resources and climate change, have forced the implementation of these new methods of power generation, however the country It is not yet included in that scenario, even knowing that it has several advantages that would determine efficient use of this type of renewable energy. Among these favorable characteristics, is its large solar energy potential, which is influenced by its geographical position and consequently the climate that favors all conditions of sunshine for several regions of the country, capture and transform through technologies applied the solar energy, which is an inexhaustible and permanent source.

Key Words: Alternative Energy, Solar Energy, Brightness Solar, photovoltaic cells

INTRODUCCIÓN

La electricidad es un servicio indispensable en el desarrollo económico y social de un país o región, su disponibilidad, está asociada a la capacidad de captar, transformar y distribuir el servicio a sus habitantes, de forma eficaz, homogénea y permanente. En términos de generación de energía eléctrica, Colombia ha aprovechado la presencia de cuencas hídricas y el pronunciado relieve del país; condiciones ideales para el aprovechamiento de este recurso. Así, se evidencia que la matriz energética, del país sigue una tendencia diferente a la mundial, en la cual predomina el uso de combustibles fósiles, en este caso específico, es dominado por la generación hídrica [1].

La generación hidroeléctrica es considerada como una fuente convencional, dado su desarrollo de más de 100 años y su participación como fuente de generación eléctrica en el mundo. No obstante, hay que considerar que el agua es un recurso vital para la vida humana, por lo que el crecimiento de la población y la necesidad de abastecimiento de agua potable ha ocasionado una alta demanda por un recurso limitado y adicionalmente con disponibilidad desigual en todo el planeta. Por ello, cuando se trata el tema de generación eléctrica a partir del agua se hace mucho énfasis en la capacidad de las instalaciones, considerando que las grandes centrales hidroeléctricas son generadoras de mayores impactos en el medio ambiente [1].

Teniendo en cuenta lo anterior, más allá de la importancia de contar con electricidad, es necesario considerar que toda su cadena productiva iniciando con la generación, pasando por la transmisión, distribución y uso final, tienen asociados una serie de impactos ambientales o sociales. La creciente preocupación por el estado del medio ambiente, el cambio climático, la mayor información que tienen las comunidades exige hoy mayor rigurosidad en la Licencias o trámites para construcción de proyectos de generación y transporte de electricidad. Esto ha generado mucho interés por buscar alternativas de generación que tengan un menor impacto ambiental de tal forma que puedan satisfacer las necesidades crecientes de la población.

Actualmente, el país enfrenta una crisis energética debido al agotamiento de las fuentes convencionales de energía, fenómeno ocasionado por la sobreexplotación de los recursos naturales, la falta de planeación y prevención ante fenómenos climáticos, y la limitación en el estudio de otras fuentes alternativas, desatando gran preocupación por parte del Estado y la sociedad en general, de tal manera que se busca medidas correctivas como el racionamiento del servicio en las diferentes regiones. En el desarrollo de esta problemática, se evidencia la poca preocupación por incorporar medidas preventivas y aprovechar otras fuentes, teniendo en cuenta los grandes impactos ambientales que han ocasionado la implementación de hidroeléctricas en el país.

Así mismo, se ha podido evidenciar a través de los diferentes fenómenos, conflictos ambientales y sociales, que la generación de energía a partir de los recursos

convencionales, petróleo, carbón, gas, ha desatado la necesidad de invertir en el desarrollo y aplicación de energías alternativas, es decir, producción de energía que funcione con recursos renovables, los cuales provienen de recursos que están relacionados con los ciclos naturales de nuestro planeta, haciendo posible que dispongamos del recurso de manera permanente [2]

Para el estudio y desarrollo de esas energías alternativas, se ha distinguido, principalmente los siguientes tipos: Energía solar, eólica, de Biomasa, Mareomotriz, Geotérmica. La energía solar es la energía radiante del sol recibida en la tierra es una fuente de energía que tiene varias e importantes ventajas sobre otras y que, para su aprovechamiento, entre estas se destacan principalmente su naturaleza inagotable, renovable y la utilización libre de polución.

El presente artículo, muestra la energía solar cómo la más conveniente a implementar en Colombia, partiendo de los diferentes estudios realizados, en el que se identifica el panorama actual del sistema energético del país, comparado con la tendencia mundial, además se tiene en cuenta la disponibilidad de este recurso por la posición geográfica, y otros aspectos que determinan la viabilidad de su implementación así como las regiones más susceptibles a su aprovechamiento. Adicionalmente, se reconocen las ventajas en el uso y transformación de la energía solar, teniendo en cuenta los tipos de tecnologías que actualmente se utilizan, elementos o equipos de transformación, según los cuales se obtiene energía lumínica, calórica y eléctrica.

Se requiere la implementación de este tipo de sistemas que aumenten el desarrollo sostenible del país y lo incorpore a un mundo en busca de la disminución de los gases de efecto invernadero, el uso convencional de combustibles y la minimización de los impactos ocasionados al medio ambiente por la sobreexplotación de sus recursos.

1. TENDENCIA DEL SISTEMA ENERGÉTICO MUNDIAL COMPARADO CON EL PANORAMA COLOMBIANO

A continuación se identifica los aspectos más importantes durante el desarrollo energético en el contexto mundial y nacional, teniendo en cuenta aquellos sistemas energéticos predominantes en el mundo y en Colombia.

1.1 CONTEXTO GEOGRÁFICO

El Área de estudio en la cual se evalúa el uso y aprovechamiento de la energía solar, se encuentra comprendido en el territorio Colombiano, país de América ubicado en la zona noroccidental de América del Sur, organizado constitucionalmente como una república unitaria descentralizada, su capital es Bogotá, su superficie es de 2.129.748 Km² de los cuales 1.141.748 Km² corresponde a su territorio continental y los restantes 988.000 Km² a su extensión marítima, de la cual mantiene un diferendo limítrofe con Venezuela, Limita al norte con Panamá y el mar Caribe, al este con Venezuela y Brasil, al sur con Perú y Ecuador y al oeste con el océano Pacífico [3]

La división político - administrativa del país está representada por 32 departamentos y un Distrito Capital (Bogotá D.C.), los cuales a su vez se subdividen en municipios, ciudades, veredas y pueblos, entre otros. Sin embargo, existe una tendencia de distribución desigual en las unidades, así las áreas con mayor densidad poblacional se encuentran más subdivididas y transformadas; presentándose una tendencia a la concentración poblacional mayor en las urbanas que en las rurales por diferentes factores económicos, políticos y de conflicto armado.

Según estudios realizados existen al menos 475 municipios de las 1.053 con los que cuenta el país, que por la acción humana no cuentan con vegetaciones naturales detectables a la escala de trabajo, aunque otros 252 tienen el 30% y el resto presentan una vasta cobertura vegetal, sin embargo son áreas cuya concentración poblacional es la menor. Por tal razón, la demanda ambiental las áreas de mayor índice poblacional son aquellas que demandan un suministro de bienes y servicios ambientales alto [4]

Además, su localización en la zona ecuatorial determina la existencia de una gran variedad de climas y ecosistemas. Debido a que la línea del ecuador atraviesa el país por el sur, toda Colombia queda en la zona tórrida o intertropical, región de bajas latitudes; lo que ocasiona que cuente con la misma iluminación solar todo el año, así como, los días y las noches cuenten con igual duración. Los rayos del Sol caen siempre con la misma verticalidad, de modo que no hay estaciones, por lo que se distinguen únicamente un invierno lluvioso y un verano seco [5]

1.2. FUENTES ENERGÉTICAS

Una Fuente de energía es todo recurso natural o fenómeno de la naturaleza en el que se presenta la energía en cualquiera de sus formas (mecánica, química, térmica...) y que podemos aprovechar para obtener energía [6]. Teniendo en cuenta su capacidad de regeneración, las fuentes energéticas pueden ser:

1.2.1 No Renovables, Convencionales

Son principalmente la energía hidroeléctrica y la utilización de combustibles fósiles mediante procesos térmicos, es decir la generación termoeléctrica a partir de carbón, gas natural o derivados del petróleo. Durante aproximadamente un siglo estas fueron las únicas fuentes de generación de electricidad hasta que hacia 1970 se desarrolla el uso masivo de energía nuclear, que utiliza el mismo principio de la generación térmica tradicional pero cambiando el combustible fósil por nuclear.

1.2.2 Renovables o Alternativas

Las fuentes renovables son aquellas fuentes primarias inagotables o con capacidad de regeneración en un periodo de tiempo inferior al de su uso. En general todas las fuentes provenientes directa o indirectamente del sol son consideradas renovables. Adicionalmente se clasifican como fuentes renovables el calor proveniente de la

tierra y las mareas ocasionadas por la atracción gravitacional entre la Tierra y la Luna [1]

Algunos de los principales inconvenientes de la explotación a gran escala de las energías renovables o en cantidades suficientes para desplazar energías convencionales radican en que su disponibilidad está sujeta a la geografía: recursos como el viento, el agua o el sol tienen altos potenciales de explotación en sitios específicos. Existe además una gran variabilidad en el recurso, esto es particularmente cierto para la energía eólica, solar e hidráulica sin embalse, cuya capacidad de generación está asociada directamente a la disponibilidad del recurso y este puede presentar grandes variaciones de una hora a otra o entre el día y la noche.[1]

La siguiente figura, muestra el esquema general de energías renovables

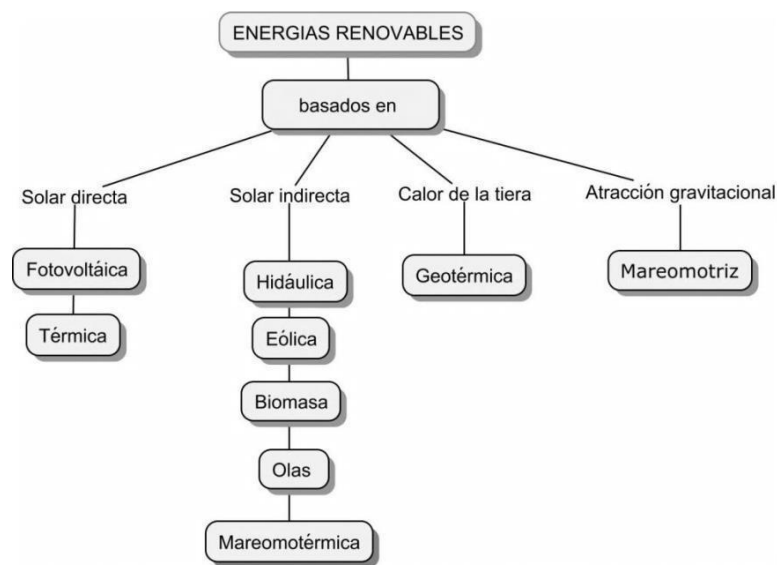


Figura 1. Esquema general de energías renovables
Fuente: Modificado de Fedesarrollo, 2013.

1.3. CONTEXTO MUNDIAL EN EL USO DE ENERGÍA

Aproximadamente el 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables. Actualmente, estas últimas se encuentran asociadas principalmente con el uso tradicional de la biomasa en aplicaciones como la leña para cocción de alimentos y calentamiento de espacios, y la hidroenergía para generación eléctrica.

En una menor medida, se aprovecha la energía proveniente de fuentes como el sol, la geotermia y la biomasa para su conversión en energía térmica a través del uso de

tecnologías relativamente modernas, seguidas de estas y otras fuentes como la eólica para la generación de energía eléctrica. Finalmente, se suman al aprovechamiento de fuentes renovables el uso de biocombustibles en el sector transporte y tecnologías en etapas incipientes de desarrollo como es el caso de la energía de los mares en forma de mareas, oleaje, gradientes térmicos o gradientes salínicos [7]

La dependencia mundial en el petróleo, el carbón, el gas natural y aun en los combustibles nucleares, como recursos fósiles disponibles en cantidades que pueden ser consideradas relativamente abundantes pero finitas, y las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas, con su distribución geográfica y su dominio, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta.

En ese proceso de búsqueda e implementación, en el 2004, solamente 48 países en el mundo contaban con políticas que directamente promovieran las energías renovables, hoy son más de 140 países con políticas formales en este campo [8]

Esto representa una mayor confianza en un futuro menos dependiente de combustibles fósiles como el petróleo o el gas, en algunos casos con metas más retadoras, pero en todos los casos con el tema renovable en su agenda política, lo cual es ya un gran paso. Está claro que las políticas promueven inversiones, es así que, del 2004 hacia fines de 2013 la inversión en nueva capacidad en ER aumentó de 39.5 a 214.4 mil millones de dólares americanos. Uno de las fuentes más destacadas, es la energía solar (fotovoltaica), cuya inversión pasó de ser 2.6 a 139 mil millones de dólares americanos. [9]



Figura 2. Países con políticas y metas de energías renovables, Inicios de 2015 **Fuente:** REN 21, 2015

Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes renovables anteriormente mencionadas en cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia relativa de una o varias de estas fuentes en algunas regiones favorecidas, las fuentes de energía renovables representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años.

1.4 CONTEXTO COLOMBIANO EN EL USO DE ENERGÍA

1.4.1 Sector Eléctrico en Colombia

El sistema eléctrico de potencia colombiano, Sistema Interconectado Nacional (SIN), a pesar de cubrir solo el 48% del territorio nacional provee energía a cerca del 98.2% del consumo total de energía eléctrica en el país. El resto de la demanda de energía se da en zonas remotas del territorio llamadas Zonas No Interconectadas. El SIN se encuentra en la Región Central o Andina y en la Costa Atlántica, con dos grandes subsistemas: el Central y el de la Costa Atlántica.

Colombia presenta dentro de su territorio dos realidades muy diferentes: por un lado un Sistema Interconectado Nacional – SIN compuesto por plantas de generación despachadas centralmente y redes de transmisión que llevan esta energía generada a una parte del territorio nacional, y por el otro las Zonas No Interconectadas -ZNI, caracterizadas por tener una baja densidad de población, encontrarse en sitio alejados, de difícil acceso y generalmente con reservas y parques naturales en sus territorios así como comunidades étnicas y afro, por lo tanto el perfil tanto geográfico como poblacional es muy diferente al del SIN.

De igual forma, la generación en el país se encuentra localizada por regiones. La generación hidráulica se ubica principalmente en la Región Central y la generación térmica en la Costa Atlántica y el Magdalena Medio. El potencial de generación hidráulico en Colombia se estima aproximadamente entre 50 y 90 mil GW, actualmente aprovechando unas pocas cuencas para proyectos de gran envergadura, correspondientes a las cadenas de los ríos Porce-Nechí y Nare-Guatapé en Antioquia; Batá-Guavio y Menores de Bogotá en la Cordillera Oriental; y Sinú, Magdalena y del Pacífico.

En cuanto a la generación térmica, la ubicación de las plantas de generación a gas coincide con el recorrido de los gasoductos de la Costa Atlántica y del centro del país, buscando las zonas de menor altura sobre el nivel del mar para mayor eficiencia, y en el Valle del Cauca, para dar confiabilidad al sistema en esa región. La generación a carbón se ubica en Norte de Santander, Boyacá y Cundinamarca, allí hay zonas de producción de este mineral.

El mix de generación eléctrica colombiana se concentra principalmente en dos fuentes, la hidroelectricidad con una participación del 63.9%⁸³ (67.7% incluyendo

menores hidráulicas) y la generación a gas natural que representa 26.3% de la capacidad instalada en 2014. Tal concentración hace que el sistema pueda ser vulnerable en el corto plazo debido a los ciclos hidrológicos en el país y su variabilidad, y en el mediano y largo plazo, a la disponibilidad de gas natural, por hallazgos en el país o por disponibilidad de importaciones [11]

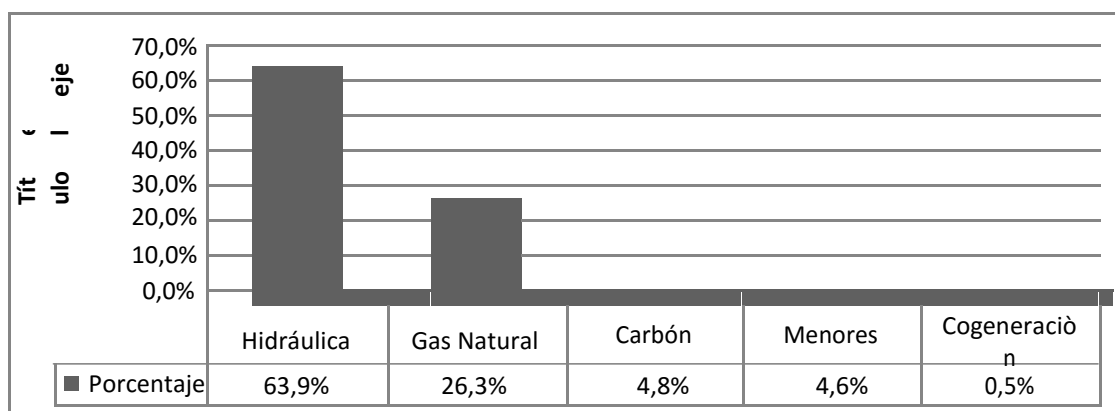


Figura 3. Participación por tecnología en la Matriz eléctrica
Fuente: Modificado de UPME

1.4.2 Vulnerabilidad del sistema eléctrico en Colombia

El elevado peso del componente hidráulico en la canasta de generación, es la mayor fuente de vulnerabilidad del sistema energético colombiano frente a fenómenos climáticos de sequía como el Fenómeno del Niño. Como resultado de los impactos generados por eventos extremos que se presentaron en el pasado y se han venido presentando actualmente el país cuenta con un respaldo de generación térmica que le ha permitido al sistema responder a las exigencias de los periodos de sequía en los últimos años. Sin embargo estas alternativas, cómo se ha mencionado anteriormente, siguen causando impactos ambientales que van en contravía a la búsqueda de disminuir los gases efecto invernadero [11].

1.4.3 Fenómenos del Niño y la Niña, su efecto en el sector eléctrico

Los fenómenos de El Niño y La Niña son fenómenos meteorológicos de gran impacto sobre el sector eléctrico. El primero consiste en el calentamiento por encima de lo normal de las aguas tropicales del océano Pacífico y que provoca un cambio en el patrón de comportamiento de los vientos y por ende en el patrón de comportamiento de las lluvias, con un déficit en las regiones Caribe y Andina [12]. Se caracteriza por temperaturas cálidas inusuales, con consecuencias significativas sobre el clima global. Por su parte, el fenómeno de La Niña el caso contrario a El Niño, consistiendo en el enfriamiento por debajo de lo normal de las aguas tropicales del océano Pacífico y que provoca un cambio en el patrón de comportamiento de los vientos. Como consecuencia,

El Niño causa prolongación de los periodos secos incidiendo directamente sobre los aportes hídricos a los embalses. Esto lleva a la disminución de la generación hidroeléctrica, al aumento de la generación térmica y, ocasionalmente al racionamiento de energía. También conlleva alzas en los precios de la energía en bolsa y en contratos. Induce un mayor consumo de combustibles, incrementos en el uso de aire acondicionado y en la demanda de agua para riego.

Por su parte, La Niña afecta negativamente las áreas que incluyen la mayor cantidad de embalses para la generación de energía eléctrica, ellas son: El norte y sur del departamento de Antioquia, occidente del Valle del Cauca, Cundinamarca y Tolima, así como parcialmente la región de Orinoquía. [12]

Entre los impactos que genera el fenómeno de La Niña en el sector eléctrico se pueden citar: la reducción de la demanda residencial por menor consumo de aire acondicionado, ventilación y refrigeración en general. La Niña genera deslizamientos e inundaciones provocando derribo de torres, atrapamiento de potencia y salida forzosa de activos del sistema durante la operación. Lo anterior se traduce en desatención parcial de la demanda, precios altos de la energía por gestión de las restricciones y generación de seguridad [13]

La siguiente tabla muestra un recuento histórico de los impactos que los fenómenos del Niño y la Niña han generado sobre el sector eléctrico durante los siguientes años: 92-93, 97-98, 2009-2010 y 2010-2011.

Tabla 1. Descripción de Impactos de fenómenos Niño y Niña en el sector eléctrico Colombiano

| PERIODO DEL FENÓMENO | IMPACTO SOBRE EL SECTOR ELÉCTRICO |
|-----------------------------|--|
| Niño, 1991-1992 | Generaron un impacto significativo en los niveles de los embalses y en la demanda de energía en el país. Esto condujo a un racionamiento de energía del 26% y causó pérdidas superiores a los US\$ 100 millones [14]. La generación eléctrica en ese momento pasó a depender principalmente de las termoeléctricas[15] |
| Niño, 1997-1998 | Reformas regulatorias y de política realizadas durante la primera mitad de la década, para mejorar la confiabilidad en el suministro, no en esta ocasión no fue necesario acudir al racionamiento; a zona que se vio más afectada fue la región Andina. |
| Niño, 2009-2010 | En 2010 la composición hidráulica-térmica de la generación se vio afectada por la finalización del evento del niño que venía del 2009, mientras que el fenómeno de la niña que se dio en el segundo trimestre de 2010 |

| | |
|-----------------|---|
| | <p>generó aportes muy altos [16]. Esto llevó a que los aportes de energía al Sistema Interconectado Nacional SIN por generación térmica llegaran a ser del 53.3% durante el primer trimestre del 2010 (Fenómeno del Niño) y que disminuyera al 17% del aporte total en el segundo trimestre. Como resultado de este evento la generación hidráulica del 2010 decreció un 1.6%</p> |
| Niña, 2010-2011 | <p>Para el evento de la Niña del 2011 se registró una caída del 1.1% en la demanda de energía para el mes de febrero, comparada con la del mismo mes del año anterior. Este cambio se dio por los cambios en la temperatura, que al ser más bajos, redujeron la demanda de energía en el sector residencial. Como resultado de que los aportes hídricos a los embalses fueron muy altos, al finalizar el año 2011, los embalses se encontraban en el 88.8% de la capacidad de almacenamiento útil. El 8 de Diciembre se registró un almacenamiento de 91.88%, algo sin precedencia en la historia reciente [17] Los incrementos en los niveles de los embalses crearon un incremento en la capacidad de generación, por lo que el aporte por generación térmica disminuyó en un 39.8% aportando solo el 16% del total generado.</p> |
| Niño, 2015-2016 | <p>Finalizando el segundo semestre de 2015 e iniciando el 2016, el fenómeno del niño, afectó notablemente el nivel de las principales represas funcionales para la producción de energía eléctrica, disminuyendo la capacidad de abastecimiento y sumado al no funcionamiento de la Hidroeléctrica de Guateque de EPM (Empresas públicas de Medellín) por cuatro meses y otras Hidroeléctricas, el gobierno anunció importación de energía de Ecuador además de uso de las reservas acumuladas en los últimos meses, lo que llevó a que las hidroeléctricas y las térmicas tengan que trabajar a plena capacidad [18]</p> |

Fuente: Elaboración propia, 2016

2. ASPECTOS QUE DETERMINAN LA VIABILIDAD EN EL USO Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

Colombia es un país privilegiado en cuanto a su posición geográfica y otros factores que determinan las principales características para el uso de energía solar como alternativa de abastecimiento del servicio, por esta razón es importante identificar cada uno de esos aspectos y reconocer su impacto en el buen uso y efectividad de esta energía alternativa.

2.1 ANTECEDENTES EN EL USO DE ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

2.1.1 Calentadores solares

Los inicios en el uso de energía solar en Colombia, datan del uso de calentadores solares, a mediados del siglo pasado, cuando en Santa Marta fueron instalados calentadores solares en las casas de los empleados de las bananeras, calentadores que aún existen aunque no operan. Más tarde, hacia los años sesenta, en la Universidad Industrial de Santander se instalaron calentadores solares domésticos de origen Israelí para estudiar su comportamiento.

Posteriormente, hacia finales de los setenta y estimulados por la crisis del petróleo de 1973, instituciones universitarias (la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional en Bogotá, la Universidad del Valle, entre otras) y fundaciones (como el Centro Las Gaviotas) sentaron las bases para instalar calentadores solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua para uso en centros de servicios comunitarios (como hospitales y cafeterías) [19].

Si bien los calentadores solares para una pequeña familia costaban ya a mediados de los ochenta y noventa el equivalente a US\$1000 por sistema (tanque de 120 litros, 2 m² de colectores solares) y representaban una inversión inicial medianamente alta, instituciones como el antiguo Banco Central Hipotecario, al hacer un análisis valor presente neto, comprendieron que era más económico emplear calentadores solares que emplear electricidad para calentar agua y obvió la inversión que harían los usuarios dotando a varias de sus urbanizaciones con estos equipos [19].

2.1.2 Sistemas Fotovoltaicos

La generación de electricidad con energía solar empleando sistemas fotovoltaicos ha estado siempre dirigida al sector rural, predominando los altos costos de generación originados principalmente en el precio de los combustibles, y los costos de Operación y Mantenimiento en las distantes zonas remotas, hacen que la generación solar resulte más económica en el largo plazo y confiable. Estas actividades surgieron con el Programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom a comienzos de los años 80, con la asistencia técnica de la Universidad Nacional. [20]

En este programa se instalaron pequeños generadores fotovoltaicos de 60 Wp (Wp: vatio pico) para radioteléfonos rurales y ya en 1983 habían instalados 2 950 de tales sistemas.

El programa continuó instalando estos sistemas y pronto se escaló a sistemas de 3 a 4 kWp para las antenas satelitales terrenas. Muchas empresas comenzaron a instalar sistemas para sus servicios de telecomunicaciones y actualmente se emplean sistemas solares en repetidoras de microondas, boyas, estaciones remotas, bases militares, entre otras aplicaciones.

Estos sistemas son hoy esenciales para las telecomunicaciones rurales del país. Según un estudio realizado, entre 1985 y 1994 se importaron 48 499 módulos solares para una potencia de 2.05 MWp [20]. De estos 21 238 módulos con una potencia de 843.6 kW en proyectos de telecomunicaciones y 20 829 módulos con 953.5 kWp en electrificación rural.

Como principal fuente de problemas se encontraron la falta de mínimo mantenimiento, suministro de partes de reemplazo (reguladores y lámparas) y sistemas sub-dimensionados. Estos problemas, que se suelen repetir aún hoy en día, indican la importancia que tiene el asegurar la sostenibilidad del suministro del servicio de energía para estos usuarios. Estas dificultades se han mostrado como una de las debilidades más graves del servicio de energía con estos sistemas. Y más que tratarse de un problema meramente técnico, el problema es de calidad del servicio y de atención al usuario. [20].

En los últimos diez años tampoco se han realizado estudios sobre el comportamiento de estos sistemas. En los programas de electrificación rural, el sistema convencional para hogares aislados ha constado de un panel solar de 50 a 70 Wp, una batería entre 60 y 120 Ah y un regulador de carga. Estos pequeños sistemas suministran energía para iluminación, radio y TV, cubriendo las necesidades realmente básicas de los campesinos.

La generación de electricidad con energía solar tiene, entonces, enormes perspectivas, teniendo en cuenta que en Colombia cerca de 1 millón de familias carecen del servicio de energía eléctrica en el sector rural. [20].

2.2 EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR

La energía solar hoy en día representa la segunda fuente avanzada de energía renovable de mayor penetración en el mundo, después de la eólica, con una producción que equivale a entre 0,85% y 1% de la demanda mundial de electricidad [21], lograda a través de una capacidad instalada de 139 GW a 2013. En el año 2013 está tecnología superó por primera vez en términos de crecimiento a la energía eólica con un incremento en la capacidad instalada de 39 GW (frente a 35 GW de eólica), presentando a la vez un crecimiento promedio del 55% anual para los últimos 5 años. Países como Alemania, China e Italia lideran los mercados de la energía

solar contando con capacidades instaladas del orden de 36, 19 y 18 GW, respectivamente [22]

La evaluación del potencial solar de Colombia se ha realizado empleando principalmente información de estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales), procesada para ser transformada de información meteorológica en información energética. Para la identificación de este aspecto determinante en el aprovechamiento de la energía solar, se ha publicado el Atlas de radiación solar en Colombia.

Este Atlas es un conjunto de mapas que representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia; en estos mapas se establece el valor promedio diario de radiación solar global, brillo y radiación ultravioleta solar que incide sobre una superficie plana por metro cuadrado. De cada una de estas variables se muestran los valores promedio en el tiempo mediante 13 mapas, uno para cada mes del año y un mapa promedio anual [23].

El Atlas es un documento de referencia para Colombia que contribuye al conocimiento de la disponibilidad de sus recursos renovables y facilita la identificación de regiones estratégicas que pueden ser más adecuadas para la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población.

En el país se cuenta con diversos tipos de estaciones meteorológicas dotadas de instrumentos para medir entre otras variables la radiación y el brillo solar, la temperatura y humedad. Algunas de ellas se encuentran en zonas que presentan problemáticas sociales de diferente índole o violencia, en condiciones particulares que afectan el adecuado funcionamiento de los instrumentos y de la continua toma de datos, perdiéndose meses o años completos de valiosa información Climática [23].

2.1.2 Potencial de energía Solar

La energía solar es la energía contenida en la radiación solar, que es transformada mediante los correspondientes dispositivos, en forma térmica o eléctrica, para su consumo posterior, según se requiera. [24] El elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil es el panel solar, pudiendo ser de dos clases: captadores solares térmicos y módulos fotovoltaicos.

La cantidad de energía que el sol vierte diariamente sobre la tierra es diez mil veces mayor que la que se consume al día en todo el planeta. Colombia esta favorecida por su situación geográfica y climatológica para aprovechar este tipo de energía [25]

Los datos de radiación solar en Colombia se obtienen después de evaluar el área bajo la curva de gráficas obtenidas de los registros de actinógrafos adicionalmente a partir de datos directos de piranómetros, se consignan en un mapa en el que se identifica el potencial mensual en las diferentes zonas del país.

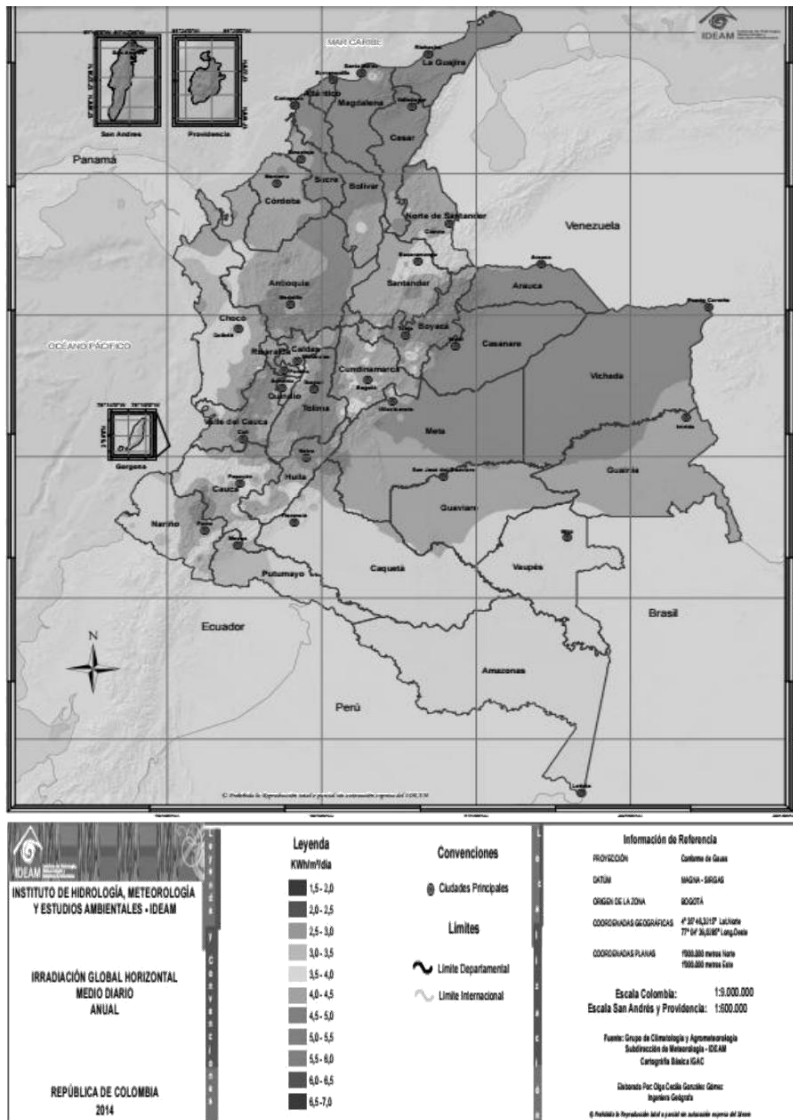


Figura 4. Mapa de radiación solar, Colombia. Promedio multianual.
Fuente: IDEAM, 2014.

La medida a la intensidad se indica en el mapa mediante convenciones. La unidad de la energía utilizada corresponde al kilovatio hora, por metro cuadrado y diario.

El país está caracterizado por las regiones: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia. La intensidad de la radiación solar en la región Andina Colombiana muestra que las zonas de los valles del Cauca y Magdalena poseen el mayor potencial de esta región, y a medida que se asciende hacia las cimas de las cordilleras ese potencial va disminuyendo gradualmente, con excepción de algunos núcleos localizados en zonas llamadas altiplanos, allí se observa un potencial solar mayor comparado con el de las laderas.

En las regiones costeras: atlántica y pacífica, los resultados de la evaluación del recurso solar del país muestran en la región noreste de la costa atlántica (La Guajira) un potencial solar promedio diario entre 5,0 y 6,0 kWh/m², el mayor del país. Este valor va disminuyendo

Gradualmente en dirección sur-oeste hacia la costa pacífica, se presenta el menor potencial solar del país, con valores menores de 3,5 kWh/m², aunque posee una gran zona con valores entre 4,0 y 4,5

Las regiones de la Orinoquia y Amazonia, que comprenden las planicies de los Llanos Orientales y zonas de las selvas colombianas, presentan una variación ascendente de la radiación solar en sentido suroeste-noreste, verificándose valores asimilables a los de La Guajira en el noreste (Puerto Carreño) [26].

La siguiente tabla ilustra los rangos de disponibilidad de energía solar promedio multianual por regiones:

Tabla 2. Atlas de Radiación

| REGIÓN | KW/H/m²/año |
|-----------------|-------------------------------|
| Guajira | 1.980 – 2.340 |
| Costa Atlántica | 1.260 – 2.340 |
| Orinoquia | 1.440 – 2.160 |
| Amazonía | 1.440 – 1.800 |
| Región Andina | 1.080 – 1.620 |
| Costa Pacífica | 1.080 – 1.440 |

Fuente: IDEAM, 2014

Estas fuentes disponibles de información de recurso solar indican que el país cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m²/día, la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/día) país que hace mayor uso de la energía solar fotovoltaica nivel mundial, con aproximadamente 36 GW de capacidad instalada a 2013 [26]

2.1.3 Brillo solar

Para conocer la cantidad de energía que se puede obtener del Sol, es necesario medir la cantidad de radiación solar (directa más difusa) que recibe realmente una región. Esta cantidad de radiación disponible para convertir en energía útil en una localidad depende de varios factores: posición del Sol en el cielo, que varía diaria y anualmente; condiciones atmosféricas generales y del microclima; altura sobre el nivel del mar y la duración del día (época del año). La máxima cantidad disponible sobre la superficie de la Tierra en un día claro, fluctúa alrededor de 1 000 vatios pico por metro cuadrado [27].

Tabla 2. Radiación solar según tipo de cielo

| TIPO DE CIELO | RADIACIÓN SOLAR EN KW/H |
|------------------------|--------------------------------|
| Constantemente Nublado | Menos de 0,3 |
| Nubosidad media | Entre 0,3 y 0,4 |
| Nubosidad Mínima | Entre 0,4 y 0,5 |
| Cielo despejado | Más de 0,5 |

Fuente: UPME, Energías Renovables, Descripción, tecnologías usos finales.

La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad [28]. El conocimiento adecuado del régimen de brillo solar permite, estimar características cuantitativas de la nubosidad y radiación solar de forma que se pueda tener una idea sobre la disponibilidad luz del sol para el aprovechamiento de la energía solar en el país.

El Heliofanógrafo es el instrumento que nos permite medir la duración del brillo solar. El siguiente mapa ilustra una aproximación de promedios anuales diarios del número de horas de sol, brillo solar, sobre el territorio colombiano. El valor suministrado corresponde al número de horas que en promedio durante un día de cada mes o año se puede el Sol observar en el cielo.

De esta forma se evidencia que la tendencia es que las zonas con un alto potencial de nivel energético (mapa de radiación solar) tienen un brillo solar más alto en tiempo, alcanzando hasta 10 horas de la disponibilidad total diaria de la energía proveniente del sol, para su aprovechamiento. Cabe mencionar que esta propiedad es más alta en unos departamentos que en otros, como se mencionó anteriormente, aquellas zonas en las que se evidencia mayor potencial y tienen dificultades de generación de energía eléctrica por las condiciones antes expuestas, pueden generar energía eléctrica a partir de la energía solar, aprovechando las condiciones que su posición y clima les otorga.

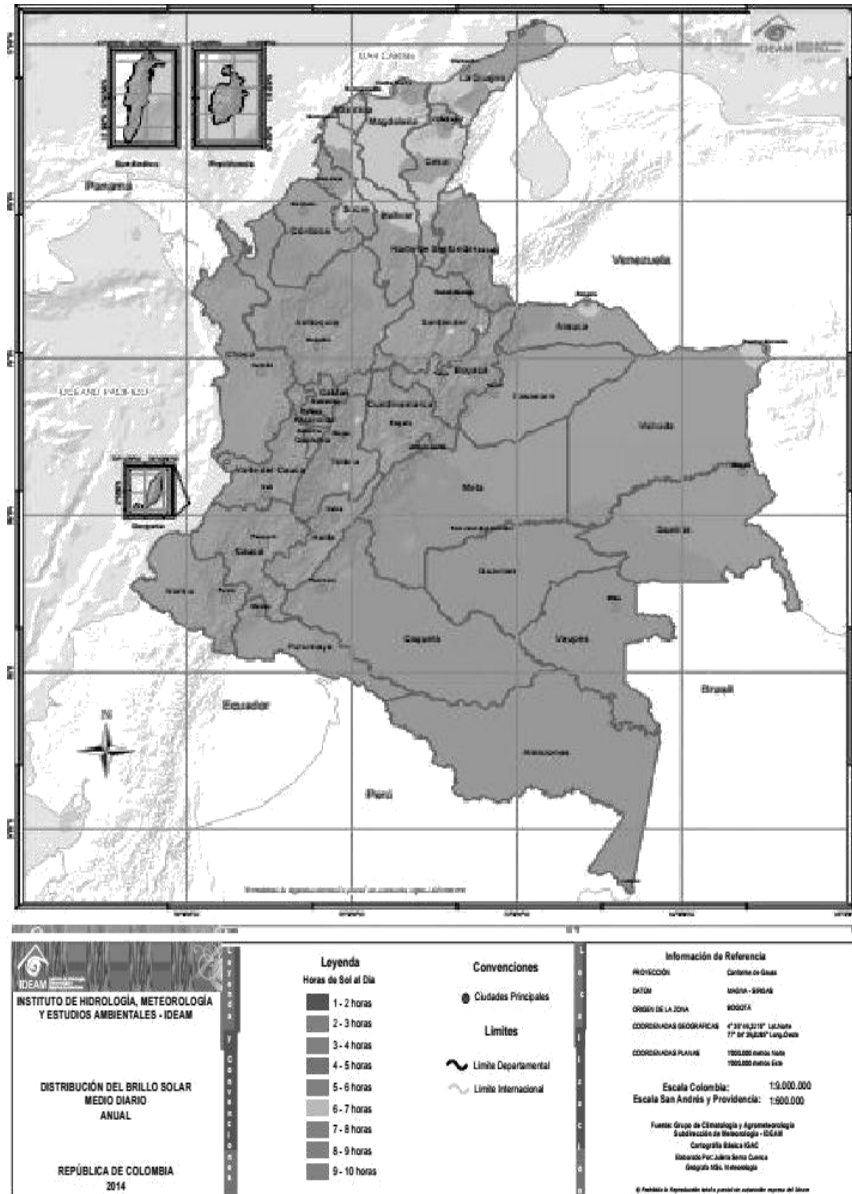


Figura 5. Mapa de Brillo solar, Colombia. Promedio multianual, 2014
Fuente: Atlas de Radiación Solar. Colombia, IDEAM

3. TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA

Anteriormente se mencionó las debilidades del sistema energético del país, debido a su gran dependencia del sistema hidroeléctrico, el cual se ve muy afectado por los cambios climáticos. Se mencionó además las condiciones favorables que hacen de Colombia un país privilegiado en cuanto a energía y brillo solar disponible, factores determinantes en la efectividad del proceso de captación de energía solar, ahora se identificará las tecnologías más usadas y viables para realizar el proceso de transformación de energía solar a eléctrica.

Para transformar la energía solar se utilizan principalmente tres tipos diferentes de tecnologías: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica

3.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (FV)

La luz del Sol se puede convertir directamente en electricidad mediante celdas solares, conocidas también como celdas fotovoltaicas, que son artefactos que utilizan materiales semiconductores. La corriente eléctrica puede ser utilizada inmediatamente o puede ser almacenada en una batería para utilizarla cuando se necesite [29].

Una celda fotovoltaica típica puede ser cuadrada y medir 10 centímetros por lado y producir cerca de 1 vatio de electricidad, más que suficiente para que un reloj de pulsera funcione, pero no para encender un radio. Las celdas individuales se ensamblan para formar módulos (40 celdas); si se necesita generar más electricidad los módulos se agrupan para formar lo que se conoce como arreglo (10 módulos).

3.1.1 Funcionamiento

Un sistema solar fotovoltaico funciona cuando el campo de módulos fotovoltaicos convierte en corriente eléctrica directa la energía solar que recibe durante el día. Dicha corriente transporta y almacena la energía eléctrica en la batería para ser utilizada en el momento que el usuario lo requiera para el televisor, radio o iluminación. La energía eléctrica que los módulos fotovoltaicos envían a la batería y que ésta suministra a la carga pasa por el controlador de carga, cuya función es proteger a los otros elementos del sistema contra sobrecargas o descargas excesivas, altas corrientes y bajos voltajes.

El sol libera gran cantidad de partículas de energía, entre ellas los fotones, los cuales son necesarios para generar la energía solar fotovoltaica. La palabra "foto" significa luz y la palabra "voltaico" significa voltaje o electricidad. El panel solar convierte la luz del sol en electricidad gracias a una reacción eléctrica que se produce en las células de silicio del panel cuando chocan en ellas los fotones del sol. Cuando la capa negativa de silicio se expone orientada al sol, los fotones chocan contra ella liberando una gran cantidad de electrones. Estos electrones se dirigirán a cubrir los espacios presentes en la capa de silicio positiva, generándose así una corriente eléctrica entre ambas capas de cargas opuestas.

Por sí sola una célula solar produce poca energía, pero muchas células unidas entre ellas mediante un hilo conductor pueden llegar a producir mucha energía. La unión entre paneles aún generará más energía suficiente para cubrir grandes consumos eléctricos [30]

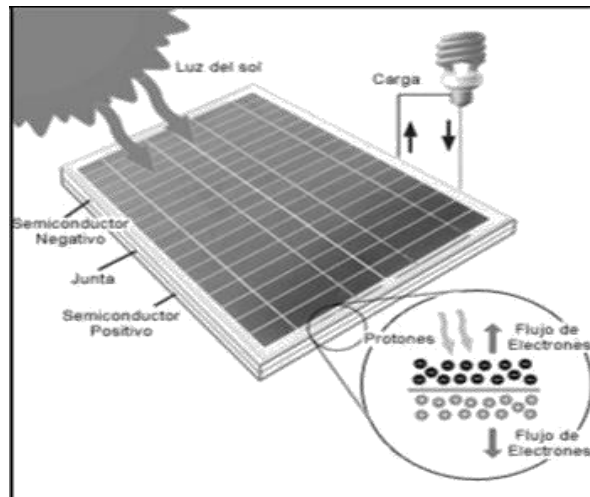


Figura 6. Captación energía solar por celdas fotovoltaicas
Fuente: DamiaSolar. 2016

3.1.2 Uso de Celdas Fotovoltaicas en Colombia

Anteriormente se mencionó los antecedentes históricos en la implementación de esta tecnología en Colombia, pero además se tienen varias razones que llevan a considerar en la energía solar FV un nicho de oportunidad con potencial para brindar beneficios importantes al sector energético nacional. Primero que todo están los costos decrecientes de la tecnología, en especial de los módulos o celdas solar FV, que han llevado a que el costo nivelado de la energía solar FV hoy en día resulte competitivo en algunos casos con las tarifas del mercado minorista de energía eléctrica, especialmente a niveles comercial y residencial.

Por otra parte, a través de la implementación y masificación de pequeños sistemas de autogeneración distribuida se pueden lograr impactos positivos, como son el permitir a los usuarios generar su propia energía, reduciendo así el riesgo de los usuarios a estar sometidos a cierta volatilidad y usuales incrementos en los costos de electricidad.

De igual manera, el uso de la energía solar FV está en capacidad de producir un desplazamiento marginal de la generación de plantas térmicas de mayor impacto ambiental, teniendo en cuenta que

de acuerdo con los análisis de ciclo de vida de diferentes tecnologías, los factores de emisiones asociados con los sistemas solar FV se encuentran en el orden de 50 kg CO₂ eq/MWh, frente a valores por encima de 450 kg CO₂ eq/MWh para plantas operadas con combustibles fósiles [30]

Para tener una aproximación de las ventajas en el uso de este tipo de energía, a continuación se relacionan varios proyectos exitosos en el País, en los cuales su fuente energética principal es el sol.

- **Primer Colegio en Colombia que funciona con energía solar:** La Institución Educativa Martinica en la zona rural de Montería se convirtió en la primera en contar con un sistema autónomo de energía solar que le permitirá abastecerse a cero costo. La instalación de los 16 paneles solares que garantizan energía 24 horas al establecimiento educativo estuvo a cargo de la Alcaldía de Montería en una apuesta por incentivar el uso de energía limpia. [31]
- **Universidad Autónoma de Occidente:** El proyecto de energía fotovoltaica coordinado por el Grupo de Investigación de Energías – GIEN – apoyado por la universidad y desarrollado gracias a la alianza con la empresa de energía del pacífico, Epsa, cuenta con 638 paneles solares distribuidos en zonas estratégicas del campus que además permitan generar sombras sobre los techos y los suelos de los parqueaderos reduciendo el consumo de aire acondicionado en estos sectores. [32]
- **Institución Pública Ramón B. Jimeno en Bogotá:** La capital de Colombia, Bogotá, muestra avances importantes en el uso de energía solar. Durante el mes de mayo del 2015 fue inaugurado el Colegio Ramón B. Jimeno de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá – EAB – Esta institución cuenta con 100% de iluminación producida con energía solar gracias a la instalación de 148 paneles solares. La inversión que realizó la EAB lo convierte en uno de los pioneros en el cumplimiento de la ley 1715 de 2014. [31]

3.2 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

El aprovechamiento de la energía solar térmica basa su tecnología en la captación de la radiación por medio de elementos denominados colectores o concentradores, los cuales disminuyen las pérdidas de calor y aumentan la energía absorbida y, en algunos casos, cuentan con seguidores de Sol para mejorar este propósito. Estos sistemas están diseñados para proveer energía eléctrica a la red o para usos térmicos de naturaleza industrial, a través de la transferencia de calor a un fluido térmico; se destinan a suplir grandes demandas y no se utilizan en aplicaciones que requieran bajas capacidades de carga o calor. [32]

3.2.1 Funcionamiento

El colector o panel solar capta los rayos del sol, absorbiendo de esta manera su energía en forma de calor, a través del panel solar hacemos pasar un fluido (normalmente agua) de manera que parte del calor absorbido por el panel es transferido a dicho fluido, el fluido eleva su temperatura y es almacenado o directamente llevado al punto de consumo.

Las aplicaciones más extendidas de esta tecnología son el calentamiento de agua sanitaria la calefacción por suelo radiante y el precalentamiento de agua para procesos industriales. Otras aplicaciones son el calentamiento de agua para piscinas

cubiertas o a la intemperie y usos emergentes como el de climatización o frío solar alimentando a bombas de absorción.

Teniendo en cuenta que la realización de proyectos que utilizan este tipo de energía han sido posible hasta este momento bajo un esquema normativo que impide la entrega de excedentes a la red, y que la Ley 1715 de 2014 introduce la posibilidad de entregar dichos excedentes para manejar un esquema de créditos de sistemas de autogeneración de pequeña escala, este nuevo escenario seguro propiciará el desarrollo de un mayor número de proyectos dado que la entrega de excedentes representará ahorros o eventualmente ingresos al usuario que harán económicamente más atractiva su inversión es este tipo de sistemas.

4. CONCLUSIONES

Los diferentes fenómenos climáticos y ambientales que afronta el mundo en esta época, han obligado a los países a buscar procesos más sostenibles, que disminuyan el impacto ambiental y social. Sin embargo, países como Colombia, están fuera de ese contexto mundial teniendo en cuenta su proceso productivo y económico se mantiene en el margen de los mecanismos convencionales, así la generación de energía eléctrica, aún no está abierta a las energías alternativas, su porcentaje de uso es todavía muy bajo con respecto a otros mecanismos de producción.

El uso de energías alternativas en los países que han adoptado esta modalidad, ha disminuido sustancialmente el impacto ambiental, en cuanto a la emisión de gases de efecto Invernadero y otros aspectos ambientales, mejorando así su sistema productivo y económico, de tal forma que se hacen más competitivos y ambientalmente sostenibles. Por esta razón, varias políticas buscan incluir este sistema alrededor del mundo y garantizar de una forma más eficaz, la disponibilidad de los recursos naturales.

El sistema de producción de energía eléctrica en Colombia, es altamente vulnerable, su disponibilidad y eficiencia depende en gran porcentaje de las reservas hídricas para la obtención por hidroeléctricas, significando esto que alteraciones naturales tan recurrentes en el país como el fenómeno del Niño y la Niña, impacten directamente sobre el sistema y alteren el comportamiento normal de estos procesos, afectando el recurso energético en el país y su producción.

La energía Solar en Colombia, es una gran alternativa de uso, es un país beneficiado por su posición geográfica, y en general por su cercanía a la línea del Ecuador. Este factor geográfico, hace que la energía solar, sobre el país llegue con unas características energéticas y de temporalidad más altas que en otras partes del mundo, una energía solar de $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ y brillo promedio de 6 horas/día, significan un factor determinante para la captación, transformación y uso de esa energía en el país, sabiendo que países como Alemania, lugar con el mayor uso de la energía solar fotovoltaica en el contexto mundial, con aproximadamente 36 GW de capacidad instalada, sólo cuenta con una irradiación promedio de $3,0 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$.

Las celdas fotovoltaicas cómo mecanismo de transformación de la energía solar, cuentan con características químicas y físicas que permiten el aprovechamiento de este tipo de energía, su eficiencia y utilidad dependerán de los aspectos tenidos en cuenta para su diseño, como lo son: Lugar, ángulo de posición, sistema de acumulación, cantidad de energía necesaria, tamaño y otros aspectos que determinarán su buen funcionamiento

El uso de energía fotovoltaica en Colombia se ha venido implementando en lugares muy específicos, como lo son Universidades y Colegios, sin embargo, es necesario iniciar con una expansión masiva que se traduzca en zonas o regiones teniendo en cuenta la disponibilidad del recurso de energía solar, así por ejemplo la Guajira sería el primer departamento a nivel Nacional en iniciar estudios de transformación y aprovechamiento, teniendo en cuenta que está incluido entre los Atlas de energía solar, cómo el lugar con mayor potencial energético solar en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Fedesarrollo, Centro de investigación económica y social;(2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia, WWF.

[2] Unidad de Planeación Minero Energética, UPME; (2014). Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos finales, Colombia, Ministerio de Minas y Energía.

[3] S.N. (2013). Posición geográfica de Colombia. Recuperado el 08 de Marzo de 2016, desde http://datateca.unad.edu.co/contenidos/102040/Posicion_Geografica_de_Colombia_Homologo_de_Video_en_Texto.pdf

[4] Instituto de Estudios Ambientales. (2012). Transformación, población y sostenibilidad por departamentos y municipios. Recuperado el 08 de Marzo de 2016, desde http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2009122/lecturas_contenido/capitulo_12/1_2_2_vegetacion_poblacion/2/2_4_1_indice_vegetacion.htm

[5] Toda Colombia. (2006). Radiación Solar en Colombia. Recuperado el 08 de Marzo de 2016, desde <http://www.todacolombia.com/geografia-colombia/radiacion-solar.html>

[6] S.N. (2014).Energía y fuentes de energía la producción eléctrica Recuperado el 08 de Marzo de 2016, desde <https://tecnologiacamoreal.wikispaces.com/file/view/Apuntes+energia+3%C2%BA+eso.pdf>

[7] Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. (2015). Integración de las Energías renovables no convencionales en Colombia, La imprenta Diseños S.A.

- [8] S.N. (2014). Política de Energía renovable para el S. XXI, REN 21. Primera década 2004-2014. Estados Unidos.
- [9] Bolívar, V. (2015). La historia no contada de las energías renovables. Recuperado el 16 de Marzo de 2016, desde <https://larutadelclima.org/tag/energia-renovable/>
- [10] Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. (2014). Consideraciones en la planeación del sistema involucrando cogeneración, Autogeneración y energías alternativas. La imprenta Diseños S.A.
- [11] Ministerio de Minas y Energía. (2015). Plan Energético Nacional, Colombia: Ideario energético 2050. La imprenta Diseños S.A.
- [12] Navarro, C. (2009). El nuevo reto de las energías alternativas. Recuperado el 16 de Marzo de 2016, desde http://huespedes.cica.es/gimadus/05/reto_energias_alternativas.htm
- [13] Ministerio de Medio Ambiente. (2015). Orientaciones para prevenir y mitigar los posibles efectos del Fenómeno El Niño. Recuperado el 15 de abril de 2016, desde <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/CONPES/Econ%C3%B3micos/2985.pdf>
- [14] Carvajal, Y. (2007). Impactos del Fenómeno del Niño. Recuperado el 15 de abril de 2016, desde http://hydrologydays.colostate.edu/papers_2007/carvajal_marco_paper.pdf
- [15] Comunidad Andina. (2010). El Niño y la Niña. Recuperado el 15 de abril de 2016, desde http://www.comunidadandina.org/public/Atlas_13_El_Nino_y_La_Nina.pdf
- [16] Ministerio de Minas y Energía. (2014) Sector Energía Eléctrica. Colombia, La imprenta Diseños S.A.
- [17] Ministerio de Minas y Energía. (2012) Fenómenos del Niño y la Niña en Colombia. Recuperado el 15 de abril de 2016 desde <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/23400/05-ENERGIA2010-2011.pdf/770a198d-d4ee-4687-b74c-74592b403ae6>
- [18] Acosta, A. (2016, Sábado, Febrero). Crisis energética prende la Alerta Roja. Revista Semana.
- [19] Rodríguez, H (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería Universidad de los Andes.
- [20] Fundación Pesenca (2012). Evaluación de Sistemas Fotovoltaicos en Colombia. Bogotá: INEA. Instituto de Ciencias Nucleares y energías Alternativas.

[21] Agencia Internacional de Energía. IEA (2014). Energías Renovables. Recuperado el 02 de Mayo de 2016 desde, <https://www.iea.org/Textbase/npsum/MTrenew2014sum.pdf>

[22] S.N. (2014). Reporte de estado Global, REN 21. Primera década 2004-2014. Estados Unidos.

[23] Atlas de Radiación Solar interactivo, Recuperado el 02 de Mayo de 2016 desde, <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

[24] Arenas, D. (2011). Libro Interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[25] Madrid Solar (2006). Guía de la Energía Solar. Recuperado el 02 de Mayo de 2016, desde <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-solar-fenercom.pdf>

[26] Unidad de Planeación Minero energética, UPME. (2014). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2014-2028. Recuperado el 02 de Mayo de 2016, desde http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2015/Plan_GT_2014-2028.pdf

[27] Ladino, E. (2011). La energía solar en Colombia como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

[28] Empresa de Transmisión eléctrica. (2009). Duración media del Brillo Solar. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, desde http://www.hidromet.com.pa/brillo_solar.php

[29] Departamento de Energía de los Estados Unidos (2015). Energía Renovable. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, desde <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>

[30] Corredor, P. (2014). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable intermitentes (FNCER). Informe final.

[31] S.N (2015) Proyectos exitosos en el uso de energía fotovoltaica en Colombia. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, desde <http://www.monteria-cordoba.gov.co/cgi-sys/suspendedpage.cgi?cod=892>

[32] Alta Ingeniería XXI. (2016). Energía Termosolar en Colombia. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, desde http://www.altaingenieriaxxi.com/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=53