

# Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura

Gerardo F. Velasco<sup>†</sup>

Edgar Cabrera<sup>†</sup>

*†Escuela Politécnica del Ejército-Maestría en Energías Renovables.  
email: gvelasco@emelnorte.com*

## RESUMEN

Debido a los altos niveles de irradiación en el Ecuador (aproximadamente una media diaria de  $4,2 \text{ kWhm}^{-2}$ ) es adecuado pensar en el aprovechamiento del recurso solar; por ello, el propósito de este trabajo es difundir el conocimiento, presentando un resumen de los fundamentos de la tecnología solar, es decir su configuración básica: paneles, inversores, estructuras de soporte, y demás dispositivos.

En países industrializados, gracias al desarrollo alcanzado en este tipo de tecnologías, así como a la reducción en sus costos de fabricación, la generación fotovoltaica ligada a la red se ha venido convirtiendo gradualmente en una alternativa viable en el esquema de *generación distribuida*. En él, una combinación de unidades generadoras de base y un gran número de pequeños generadores dispersos en la red eléctrica satisfacen la demanda de electricidad; esto es hoy en día una realidad en algunos países como Dinamarca, España, Alemania y Japón entre otros. La ejecución de proyectos de este tipo permitiría, además de identificar los entornos y las potenciales barreras técnicas, reconocer las barreras sociales y económicas a las que previsiblemente se enfrentaría la implementación de este tipo de aplicaciones en el ámbito nacional.

**Palabras clave:** paneles, conexión, red, generación distribuida

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 20-25 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95% en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a

la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia. Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son los más de 12 000 MW de potencia pico instalada a nivel mundial.

Por otro lado en la cumbre de Kyoto, muchos Gobiernos alrededor del mundo, se comprometieron a reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  de forma drástica, con el objetivo de frenar el cambio climático que la quema de combustibles fósiles está provocando. Se abre una nueva realidad en el campo de la producción de energía, que fomenta de forma activa la participación de todos los ciudadanos en la protección del medio ambiente, puesto que la energía proveniente del SOL no produce residuos tóxicos ni gases de efecto invernadero, así como permite el reparto democrático de sus beneficios económicos entre toda la sociedad.

En Ecuador, al igual que en muchos otros países en desarrollo, el uso de los sistemas fotovoltaicos y/o eólicos conectados a la red tiene una penetración y desarrollo aún incipiente.

En este contexto el objetivo de este artículo es contribuir a la difusión sobre el estado del arte en la implementación de sistemas fotovoltaicos conectados a red, y debido a los altos niveles de irradiación en el Ecuador (aproximadamente un media diaria de  $4,2 \text{ kWhm}^{-2}$ ) es adecuado pensar en el aprovechamiento del recurso solar; por ello, el propósito de este trabajo es masificar el conocimiento presentando un resumen de los fundamentos de la tecnología solar, su configuración básica, y oportunidades de ahorro energético.

Los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de

sus características y condiciones operativas; así como de la localización de éstos dentro de la misma. Los beneficios potenciales más importantes son:

- Suavización de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador.
- Alivio térmico a equipos de distribución, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar su capacidad o reemplazo.
- Disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- Soporte de voltaje en alimentadores de distribución.
- Compensación de potencia reactiva en el alimentador.
- El consumidor se ahorra las facturas al ser su propio suministrador, y protege el medio ambiente al generar la energía ecológicamente.
- La generación distribuida permite producir, almacenar y administrar la energía en el mismo lugar de consumo.
- Es el único tipo de generación de energía que puede ser instalado masivamente en los medios urbanos.

## 2. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGIA SOLAR

La base de esta fuente de energía es el efecto fotoeléctrico. Efecto descubierto por Becquerel en 1839. Ciertos materiales absorben la luz, y la energía de los fotones excita a los electrones del material provocando que parte de ellos salgan de sus posiciones lo que genera cargas negativas, debidas a los electrones desplazados, y cargas positivas, debidas a los huecos dejados por los electrones.

**CÉLULA Y MÓDULO:** Una célula fotovoltaica es un diodo de gran superficie constituido por un cristal de silicio con impurezas de boro en una gran parte de su espesor y con impurezas de fósforo en su superficie. El efecto del diodo genera un campo eléctrico permanente dentro de la célula en la superficie de contacto entre la parte de silicio dopada con boro y la dopada con fósforo. Uniendo estas caras a

través de un circuito externo se produce una corriente eléctrica. Un módulo será el resultado de ensamblar varias células en serie.

**EFICIENCIA.-** La eficiencia de una célula es la parte proporcional de la radiación que la célula convierte en electricidad. Viene dado en % y suele oscilar, según las características del material, entre el 3% y 30%.

**POTENCIA MÓDULO:** La superficie de células empleadas en la elaboración de un módulo y la eficiencia de las mismas determinarán la potencia de dicho módulo. Por ejemplo, un módulo de 20W produce 20W en una hora bajo una radiación de 1000W/m<sup>2</sup> a 25 °C de temperatura. Fácilmente y de sobra se obtiene en la mayoría de las regiones en el Ecuador.

**RENDIMIENTO Y ORIENTACIÓN:** Para un mismo módulo la energía producida dependerá en función de:

- La latitud geográfica, que condicionará el número de horas de insolación y la altura del sol sobre el horizonte a lo largo del año.
- La altitud topográfica.
- Condiciones de transparencia de la atmósfera.
- Orientación del módulo (orientación Sur para el hemisferio Norte y, orientación Norte para el hemisferio Sur).

## 3. RADIACIÓN SOLAR EN ECUADOR

Un valor medio aproximado de la radiación solar global en Ecuador es de 4200kWh/año muy superior al de España que es de 1400kWh/año por m<sup>2</sup>; en la parte peninsular; sin embargo de acuerdo a [1] se presentan variaciones de más de un 30% de unos lugares a otros en el Ecuador continental, y de más del 40% si se comparan con las islas Galápagos.

La gran variedad de condiciones atmosféricas y topográficas del Ecuador y el amplio rango de latitudes, desde las Galápagos hasta la Amazonia, genera una enorme diversidad de situaciones de

radiación que obviamente condicionan los cálculos del tamaño de una instalación para que cubra una determinada demanda. Se ha escogido a la provincia de Imbabura, dado su enorme potencial de radiación solar, (5100 Wh/m<sup>2</sup>/día) tal como se muestra en la Figura. 1 para este análisis.

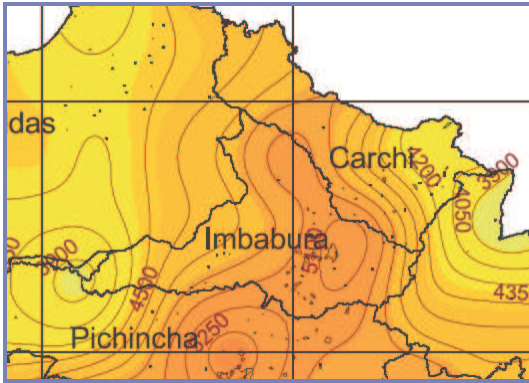


Figura 1: Mapa de radiación solar de la provincia de Imbabura

### 3. VENTAJAS ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

En general, la asociación fácil entre producción fotovoltaica y energía limpia e ilimitada puede tener un efecto positivo en el cambio progresivo hacia actitudes y hábitos de consumo que permitan reducir el gasto innecesario de energía y que valoren más los esfuerzos colectivos por disminuir la presión sobre el entorno natural.

- Energía limpia y renovable, que además no cuesta dinero.
- Reducido mantenimiento instalaciones.
- Las instalaciones fotovoltaicas se caracterizan por su simplicidad, vida útil muy amplia (actualmente siguen en funcionamiento instalaciones realizadas hace más de 20 años). Con los nuevos materiales se estima una duración de 30 – 40 años como se explica en [2].
- Se trata de una solución inmejorable en zonas aisladas que, de otra forma, no tendrían acceso a la electricidad.
- No requieren grandes inversiones centralizadas.
- Las instalaciones fotovoltaicas, tanto aisladas como de conexión a red, no contaminan ni química, ni

electromagnética, ni acústicamente.

### 4. CONFIGURACION BASICA

Como cualquier otra instalación eléctrica, estas instalaciones se habilitan con los medios apropiados para realizar, adecuadamente y en forma segura, la conexión y la desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico de la red; y para proporcionar la adecuada protección al equipo y a las personas contra condiciones de operación no deseadas, en [2], [3] y [4], se explica en detalle estos equipamientos.

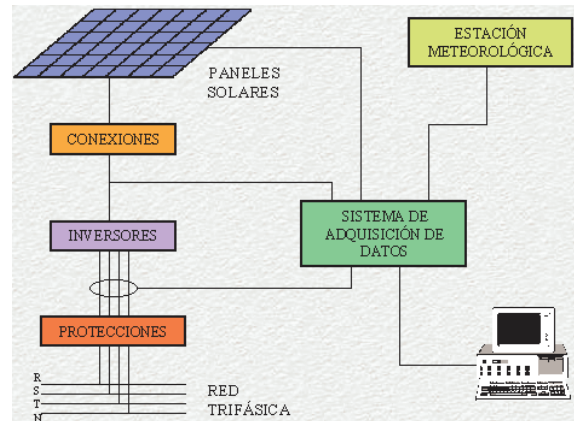


Figura 2: Diagrama de bloque de un SFVC-red

De acuerdo con el diagrama de bloques de la Figura 2, estas instalaciones constan de:

- **MÓDULO FOTOVOLTAICO (MFV):** Son los encargados de captar los fotones para conseguir crear una corriente eléctrica continua. Los MFV se conectan en serie formando varias cadenas, que a su vez forman el campo fotovoltaico.
- **ESTRUCTURA SOPORTE:** Es la encargada de asegurar un buen anclaje del generador solar, facilitan la instalación de mantenimiento de los paneles a la vez que proporcionan no solo la orientación necesaria, sino también el ángulo de inclinación idóneo para un mejor aprovechamiento de la radiación.

- **INVERSOR:** Tiene la misión de transformar la corriente continua del grupo fotovoltaico en corriente alterna perfectamente sincronizada con la red existente, ya sea trifásica, monofásica o bien de alta, media o baja tensión, sus etapas funcionales son: *Control Principal; Etapa de Potencia; Control de Red; Seguidor del punto de máxima potencia.*
- **ARMARIO GENERAL DE PROTECCIÓN Y MEDIDA:** El Armario general de protección y medida deberá contener en serie y por este orden: *un interruptor magnetotérmico; un interruptor diferencial; un contador de la energía producida por la instalación solar y otro que en contraposición medirá el consumo del sistema fotovoltaico; un fusible seccionador de control* el cual une el circuito de consumo eléctrico convencional, en paralelo con el circuito de generación, con la red de distribución de la empresa distribuidora.
- **TOMA DE TIERRA DE LA INSTALACIÓN:** Asegura que no se produzcan transferencia de falla a la red de distribución.

### 5. ESQUEMA UNIFILAR

En la siguiente figura se puede observar el diagrama (esquema) unifilar de este tipo de instalaciones

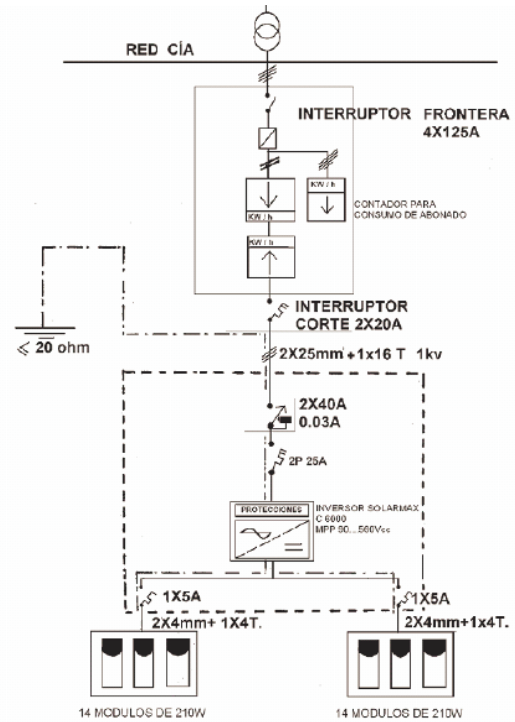


Figura 3: Diagrama de bloque de un SFVC-red

### 6. OPORTUNIDADES DE AHORRO Y EFICIENCIA EN LA PROVINCIA DE IMBABURA.

En Ecuador, las redes de distribución del sistema eléctrico siguen una configuración radial con respecto al punto de generación, lo que origina una expansión de las líneas igualmente radial conforme los usuarios del fluido eléctrico aumentan. Una expansión de este tipo ocasiona que, en muchos casos, la calidad del servicio eléctrico disminuya y se presenten apreciables variaciones de voltaje en la línea debido a las fluctuaciones de la demanda. Lo anterior repercute en algunas averías a los equipos, tanto del proveedor del servicio eléctrico como a los de los mismos usuarios.

En general, ese problema se origina cuando el sistema eléctrico comienza a operar por arriba de su capacidad de regulación para la que fue diseñado, debido al incremento de la demanda eléctrica producto del crecimiento demográfico. La compañía suministradora de electricidad trabaja en la solución de este tipo de problema; sin embargo, debido a la alta inversión que representa el incremento de

la capacidad de regulación y el de la propia línea, aún existe un número importante de líneas de distribución que operan bajo esta condición.

Las zonas urbanas son el sector donde más se acentúa este problema, por lo tanto, es en este sector donde la generación fotovoltaica ligada a la red (en el esquema de generación distribuida) se muestra como una alternativa que puede aportar beneficios importantes a la compañía suministradora del servicio eléctrico, como ya se mencionó algunos pueden ser: la reducción del pico de demanda vespertino, la reducción de pérdidas por distribución, el aplazamiento de inversiones para incrementar la capacidad de la red de distribución y, en un escenario de gran escala, pudiera sustituir inversiones en capacidad de generación y transmisión.

Brevemente pasaremos revista a la determinación de la energía para un generador fotovoltaico de 5,7 kWp. Para ello es necesario conocer los valores estadísticos (o si hubiere mediciones mucho mejor) del valor de IRRADIACION SOLAR H en kWh/m<sup>2</sup> diaria media de la zona donde se emplazarán los paneles. Para cálculos más exactos se debe recoger al menos los valores mensuales medios de un "año equivalente típico", esto es indispensable en zonas templadas, en el caso del Ecuador, podría asumirse el valor como constante durante los 12 meses del año.

### 6.1. Horas pico solar (horas de sol equivalentes)

Se definen como las horas de luz solar por día equivalentes en función de la IRRADIANCIA I, constante e igual a 1 kW/m<sup>2</sup>; en base a la cual refiere el fabricante la potencia de los paneles solares tal como se detalla en [1], [4], [5], [6] y [7]. Dado que la Irradiación H, es igual al producto de la irradiancia de referencia I, por las horas de pico solar, entonces los valores numéricos de la irradiación y horas pico solar son iguales.

$$H\left(\frac{kWh}{m^2}\right) = I\left(\frac{kW}{m^2}\right) \times HPS(h) \quad (1)$$

Entonces para una irradiación H de 4,2 kWh/m<sup>2</sup>, las horas de sol equivalentes serán 4,2 horas de pico solar. Bajo este principio se estimará la producción de energía anual del sistema propuesto.

### 6.2. Determinación de la energía

Tomando entonces los valores de Irradiación solar diaria promedio mensual en la Provincia de Imbabura, H (kWh/m<sup>2</sup>) que se detallan en [1], se obtiene una generación anual de 10 627,59 kWh, que a su vez nos permite determinar un rendimiento promedio anual de generación de 1 797 kWh/kWp para la zona de Imbabura; valores que obviamente deberán ser ajustados con datos experimentales obtenidos de la zona. Como se puede observar en la figura 4, la energía generada mensualmente es casi constante, cosa que no sucede en países como España y Alemania por ejemplo debido a la presencia de las 4 estaciones.

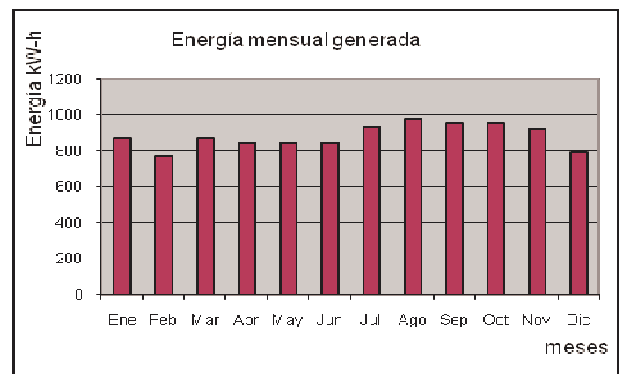


Figura 4: Estimación de la producción de la energía

Si consideramos que 1 kWh(e) producido en una termoeléctrica convencional equivale a 0,8848 kg de CO<sub>2</sub> tal como se detalla en [6]; anualmente esta generación limpia y descentralizada, aportaría en la reducción de aproximadamente 9 ton CO<sub>2</sub> generadas por la combustión de alrededor de 796 galones de fuel-oil (diesel).

Suponiendo que la distribuidora local

(EMELNORTE S.A.) debiera suministrar la misma cantidad de energía a un determinado número de consumidores, lo tendría que hacer a través de un transformador de distribución monofásico – bajo las condiciones de operación de la red anteriormente señaladas– de 10 kVA por ejemplo. A más de las inversiones necesarias, las pérdidas de energía en el núcleo y el cobre de las bobinas del transformador, –que son inevitables– serían de alrededor de 1 665 kWh anuales; si a este valor lo multiplicamos por el número de unidades que EMELNORTE tiene instalado en su sistema, ya podemos imaginar las pérdidas naturales por el uso de transformadores de distribución.

Sin pretender ser la panacea, la generación FOTVOLTAICA conectada a red con un esquema de incentivos fiscales adecuados, el Ecuador podría al igual que Alemania y España por ejemplo iniciar un proceso que dichos países ya lo empezaron hace más de una década y que actualmente los resultados han sido muy satisfactorios.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Las pequeñas centrales solares o eólicas dan la opción al consumidor de ser productor de energía, beneficiándose de su venta a las Compañías Eléctricas; consiguiéndose con ello descentralizar la generación de energía eléctrica y generarla en el mismo sitio donde se la va a utilizar, evitando de esta manera posibles pérdidas que se producen en su transporte y distribución.

En general el coste de la instalación de una conexión a red se amortiza con el propio rendimiento de la planta en aproximadamente 12 años.

Su naturaleza modular permite instalar una potencia considerable de forma dispersa y con la colaboración de muchos pequeños inversores.

Al estar dispersa en pequeñas instalaciones, inyecta en muchos puntos de la red, suplementando el abastecimiento de otras fuentes sin tener que

sobredimensionar el sistema de distribución ante futuros aumentos de demanda.

La implantación de ese sistema renovable de energía repercute en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>. y por tanto reducción de la contaminación atmosférica, del efecto invernadero y del cambio climático que de él se deriva.

Respecto al CO<sub>2</sub>, en una instalación de estas características, se reduciría en 9 toneladas la emisión de este gas. De esta forma se está colaborando en la preservación del entorno medioambiental.

Una instalación fotovoltaica conectada a red no contamina ni química, ni electromagnética, ni acústicamente, siendo altamente recomendable para la conservación del medio ambiente.

La vida útil de una planta fotovoltaica, la define la vida útil de sus componentes, principalmente el generador o módulo fotovoltaico, que constituye más del 60% el valor de la instalación. El mantenimiento escaso, pero necesario para una vida más larga de la instalación, constituye el segundo factor en importancia.

Ecuador, por su ubicación es un país con un excelente recurso solar. La irradiación diaria (promedio anual) sobre una superficie horizontal es superior a 4.0 kWh/m<sup>2</sup>-día, en todo el territorio nacional y en algunos sitios es superior a 5 kWh/m<sup>2</sup>-día (un valor de los más altos en el mundo). Además, por encontrarse en la mitad del mundo, es relativamente constante a lo largo de todo el año. La explotación de la tecnología fotovoltaica en Ecuador presenta condiciones favorables para contribuir en forma importante a los requerimientos energéticos del país.

Con el rápido crecimiento de los sistemas distribuidos conectados a la red, hoy en día existe una amplia variedad de productos desarrollados específicamente para la instalación de los módulos fotovoltaicos en las edificaciones, en los techos de las casas de nuevas urbanizaciones, de talleres y fábricas.

La formulación de una estrategia local potencialmente exitosa para una implantación masiva (gradual) de sistemas fotovoltaicos conectados a red en una

región como el norte del país, necesariamente tiene que estar ligada a la implementación y desarrollo de proyectos piloto-demostrativos de sistemas fotovoltaicos ligados a la red en la zona. Lo que permitiría evaluarlos ampliamente bajo las condiciones particulares de operación del circuito eléctrico en cuestión y conocer detalladamente el origen de la problemática que afecta el buen desempeño de los sistemas cuando interactúan en redes débiles. Esta problemática impacta la confiabilidad, seguridad y el nivel de mantenimiento demandado por los equipos, especialmente en lo relacionado con el incremento de fallas en los acondicionadores de potencia.

La ejecución de proyectos de este tipo permitirá, además de identificar los entornos y las potenciales barreras técnicas, reconocer las barreras sociales y económicas a las que previsiblemente se enfrentaría la implementación de este tipo de aplicaciones en el ámbito nacional. En el MEER, se estima que los proyectos futuros que atiendan esta línea de investigación, ineludiblemente, tomarán en cuenta esta problemática.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONELEC (2007). Atlas solar del Ecuador.
- [2] U.Jahn, (2000). D. Mayer. "Analysis of the operational performance of the IEA Database PV system". 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow.
- [3] Decker B, Jahn U. (1994). Performance of 172 grid connected PV plants in northern Germany – analysis of yields and optimization potentials. ISES Solar World Congress.
- [4] A. de Miguel y J. Bilbao. (2005). Planta Fotovoltaica de 4.32 kWp Conectada a Red en el Laboratorio C.I.B.A Universidad de Valladolid- España.
- [5] Alfredo Barriga Rivera y Otros. (2004). Medición energética y análisis de aplicación en mini casa modelo solar; ESPOL, Guayaquil.
- [6] Velasco A. Gerardo. (2008). RMER Contextos Energéticos; Maestría en Energías Renovables, ESPE, Quito.
- [7] Kyocera, BPSolar, e Isotofón: fabricantes de paneles solares.



Gerardo Velasco Angulo.- Nació en Echeandía, Ecuador en 1967. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico del Instituto de Minería de Krivoy Rog,

República de Ucrania en 1994; actualmente se encuentra realizando su maestría en la Escuela Politécnica del Ejército en Quito. Sus campos de investigación están relacionados con la calidad de la Potencia Eléctrica y las Energías Renovables.

Edgar Cabrera.- Nació en Machala, Ecuador en 1962. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la ESPOL en 1989; tiene una maestría en administración de empresas de la ESPOL y actualmente se encuentra realizando su maestría en la Escuela Politécnica del Ejército en Quito. Sus campos de investigación están relacionados con los sistemas de energía y las telecomunicaciones.