

## Sistema de Generación Fotovoltaica para el Parque Industrial de Posadas

Alejandro S. Kayser<sup>a</sup>, Rodrigo Tarnoski<sup>a,\*</sup>, Rodolfo Villagra<sup>a</sup>, Roberto J. Cabral<sup>a</sup>, Héctor Berent<sup>a</sup>,  
Eduardo Toledo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.  
[alekayser222@gmail.com](mailto:alekayser222@gmail.com), [rodrigotarnoski@gmail.com](mailto:rodrigotarnoski@gmail.com), [rudi.villagra24@gmail.com](mailto:rudi.villagra24@gmail.com), [cabral@fio.unam.edu.ar](mailto:cabral@fio.unam.edu.ar),  
[hectorberent@yahoo.com.ar](mailto:hectorberent@yahoo.com.ar), [eduardo.toledo86@gmail.com](mailto:eduardo.toledo86@gmail.com)

---

### Resumen

*El presente artículo trata sobre la instalación de un sistema de generación solar fotovoltaica situado en el parque industrial de la ciudad de Posadas, Misiones. Se analiza los aspectos técnicos de los componentes necesarios y los correspondientes efectos sobre la red de la inyección de la energía excedente allí producida. Dicho sistema de generación se encuentra enmarcado en el concepto de la generación distribuida de energía renovable. Este tipo de energía será usada con fines de autoconsumo e inyección a la red del sobrante.*

**Palabras Clave** –Caída de tensión, Energía renovable, Energía solar, Generación distribuida, Ley de Balance Neto.

### 1. Introducción

Existe un eventual interés a nivel país por la generación distribuida (GD) proveniente de fuentes renovables. Argentina se encuentra actualmente en emergencia energética, la mayor parte de la matriz energética es a base de hidrocarburos (GNL y combustibles líquidos), altamente contaminantes y en gran parte importados, con los problemas que esto acarrea tanto medioambientales como en el costo de la energía [1].

La GD constituye una forma de sumar potencia a la red y además diversificar la matriz energética, colaborando así al cumplimiento del 20% de energía renovables para el 2025 según ley 27.191 [2]. El país cuenta con la recientemente sancionada ley 27.424 que brinda un marco legal para la GD de energía proveniente de fuentes renovables [3]. A pesar de esto muchas provincias cuentan con sus propias leyes como es la nuestra [4].

A la fecha las provincias de Catamarca, Córdoba, La Rioja, Mendoza, San Juan, Chubut, Tierra del Fuego y Tucumán adhirieron a la ley nacional 27.424. Mientras que en las provincias de Buenos Aires, CABA, Entre Ríos, Jujuy, La Pampa, Misiones, Neuquén, Rio Negro, Salta, San Luis y Santa Fe han creado regímenes propios. Por otro lado las provincias de Santa Cruz, Formosa y Santiago del Estero no poseen, ni han adherido a ley alguna [5].

Misiones cuenta con la ley provincial XVI – N°118 “Ley del Balance Neto”, que declara de interés provincial la generación de energía por parte de particulares, para inyectar a la red de tendido eléctrico de media y baja tensión, que provenga de generadores que utilizan fuentes renovables [4]. La ley establece las condiciones administrativas, técnicas y económicas para la aplicación de la modalidad de suministro de energía eléctrica con “balance neto”. Desgraciadamente aún no ha sido reglamentada.

\*Autor en correspondencia.

En ella se establece que los usuarios que disponen de equipamiento de generación de energía eléctrica por medios renovables no convencionales, pueden inyectar la energía que de esta forma generan a la red de distribución. El reglamento determinaría los requisitos técnicos y los límites a la generación que debieran cumplir para conectar el equipamiento a la red de distribución y así poder volcar el excedente.

Con la mira en dar un impulso a esta ley, y a todo proyecto de GD de energía proveniente de fuentes renovables en territorio provincial, como así también agilizar los trámites para la creación de un marco reglamentario, se ha decidido junto al ministerio de industria de la provincia, llevar a cabo un proyecto de factibilidad para la instalación de un sistema de generación solar fotovoltaico ubicado en el parque industrial de la ciudad de Posadas como así también determinar sus efectos sobre la red. Se espera así sentar un precedente para futuros proyectos sobre todo de pequeños usuarios.

## 2. Relevamiento de los sistemas solares

En la República Argentina el organismo que regula la instalación fotovoltaica es la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA N°90364, 2014) [6], donde se fijan las pautas para las instalaciones de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos (sistemas de protección, seccionamiento, aislación y puesta a tierra requeridos).

### 2.1. Efecto fotovoltaico

Al incidir los fotones de la luz solar sobre una celda solar se desencadena una reacción física por la cual se libera un electrón el cual es absorbido por la “zona n” del material semiconductor. Este electrón, pasa a la “zona p” del semiconductor dejando detrás de sí una carga positiva llamada “hueco”. Este fenómeno de desplazamiento de electrones, es lo que genera corriente eléctrica.

### 2.2. Panel fotovoltaico

Están compuestos por conjuntos de celdas solares conectadas convenientemente para obtener los voltajes y corrientes necesarios.

Estas celdas producen corriente continua, y poseen curva I-V determinada para cada temperatura e irradiación solar ([ver figura 1](#)). Estas se caracterizan por generar una intensidad de corriente constante para un amplio rango de tensiones. Pero alcanzado cierto valor, la corriente disminuye asintóticamente a cero.

En la curva I-V existe un punto conocido como “punto de máxima potencia” (MPP por sus siglas en inglés), donde se obtiene la máxima potencia posible, y las coordenadas de dicho punto son designadas por  $I_m$  y  $V_m$ , teniendo que  $P_{mpp} = I_m \cdot V_m$ . Es importante operar en este punto porque es donde se alcanza la máxima eficiencia del panel.

A continuación se observa la curva de carga del panel solar.

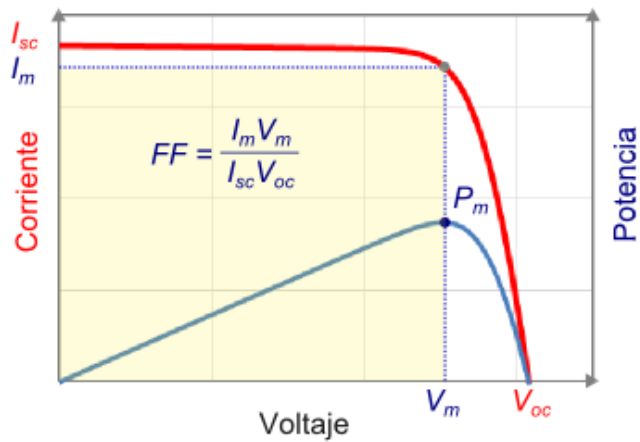


Fig. 1. Curva de carga de panel solar

### 2.3. Conexión de los paneles

Los paneles solares pueden ser conectados en serie y en paralelo, dependiendo de la tensión y la corriente, que dependen de la potencia a generar por el conjunto de paneles. Este arreglo final de los paneles solares es el conjunto generador.

**Conexión en serie:** La intensidad de corriente se mantienen constante, y se eleva la tensión de salida del generador;

**Conexión en paralelo:** la tensión se mantiene constante, y aumenta la intensidad de corriente entregada por el grupo generador;

**Conexión mixta:** Una combinación de conexiones en serie y en paralelo.

En la figura siguiente puede verse una conexión mixta de paneles solares.

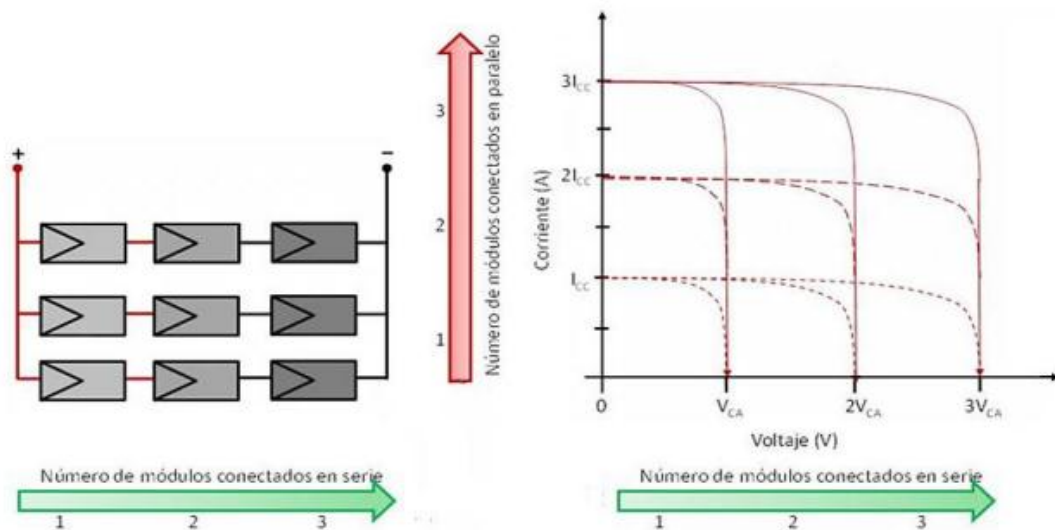


Fig. 2. Conexión mixta de paneles fotovoltaicos

#### 2.4. *Inclinación y orientación de paneles*

Para aprovechar la mayor cantidad de radiación solar debemos procurar que la superficie de los paneles esté perpendicular a los "rayos solares". Dependiendo la estación del año, la inclinación a la que debe estar el panel varía.

La inclinación respecto a la horizontal ( $\beta$ ), también depende de la latitud en que se encuentra el panel solar, ya que, a mayor latitud, los rayos solares llegan con menor inclinación a la superficie terrestre, por lo que es necesario disminuir el ángulo de inclinación del panel respecto a la horizontal.

En el hemisferio sur conviene orientar los paneles hacia el norte con una inclinación ( $\beta$ ) dada por la siguiente ecuación:

$$\beta = 3,7 + 0,69 * Lat \quad (1)$$

Donde:

$\beta$  [°]: Inclinación óptima de los paneles, respecto de la horizontal; y

Lat. [°]: Latitud del lugar de emplazamiento en grados.

#### 2.5. *Calidad de la energía inyectada*

Hay dos parámetros que se destacan a analizar que son la distorsión armónica total en corriente THDI del inglés "*Total Harmonic Distortion*" y el factor de potencia FP.

La cantidad máxima de armónicos en corriente permitidos está regulada en Europa por la norma IEC 61000-3-2 (IEC, 2000) [7]. Cabe aclarar que como un inversor de tensión para conexión a red se comporta como una fuente de corriente alterna controlada por tensión, el parámetro que lo caracteriza es su distorsión en corriente.

La distorsión armónica total en corriente, denominada THDI ("*Total Harmonic Distortion*") se obtiene como:

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{i=40} I_i^2}}{I_1} * 100 \quad (2)$$

Donde:

- $THDI$  [%] es la distorsión armónica total en corriente;
- $I_1$  [A] es el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente.
- $I_i$  [A] es el valor eficaz de la componente armónica de orden "i" de la corriente;

Cuando el inversor trabaja en potencias cercanas a la nominal la distorsión armónica ronda el 3,3 % y a medida que la potencia va disminuyendo llega a valores máximos de alrededor del 30 %.

En valores absolutos el valor eficaz de las componentes armónicas disminuye a medida que la potencia inyectada decrece, pero la THDI aumenta dado que la componente fundamental de la corriente inyectada se reduce en mayor medida.

Con el factor potencia FP lo que sucede es que valores superiores al 20% de la potencia nominal este tiene valores de 0,95 aumentando a medida que lo hace la potencia. Cuando se tiene potencias menores al 20 % cae abruptamente el factor potencia (ver Fig. 3) [8].

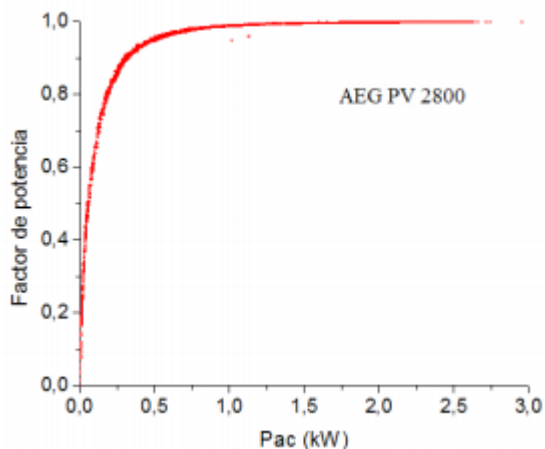


Fig. 3. Factor de potencia en función de la potencia entregada por el inversor

### 3. Metodología y Plan de Trabajo

#### 3.1. Análisis de la demanda

Debido a la imposibilidad de obtener en forma directa el consumo anual de energía de los edificios -pertenecientes al gobierno- dentro del parque se lo estima en base a datos brindados por el personal del parque industrial. Estos datos consisten en la potencia instalada estimada de cada equipamiento eléctrico y el periodo normal de trabajo y son presentados en la [Tabla 1](#) y en la [figura 4](#).

Tabla 1. Potencia instalada estimada

Equipos	Cantidad	Potencia por unidad [W]	Pot. Total [KW]
Fluorescentes	400	35	14
Ventiladores	38	80	3,04
Termo-tanque	3	1400	4,2
Computadoras	67	400	26,8
Heladeras	3	1200	3,6
Split chico	7	3500	24,5
Split grande	5	6500	32,5
			108,64



Fig. 4. Estimación del consumo a lo largo del día

### 3.2. Cálculo de generación

Para el cálculo de la generación se parte del análisis de la radiación solar en la zona de ubicación del parque. Los datos de radiación anual son extraídos del “Centro de Referencia para as Energías Solar e Eólica Sergio de S. Brito” [9]. Estos datos se resumen en [fig.5](#).

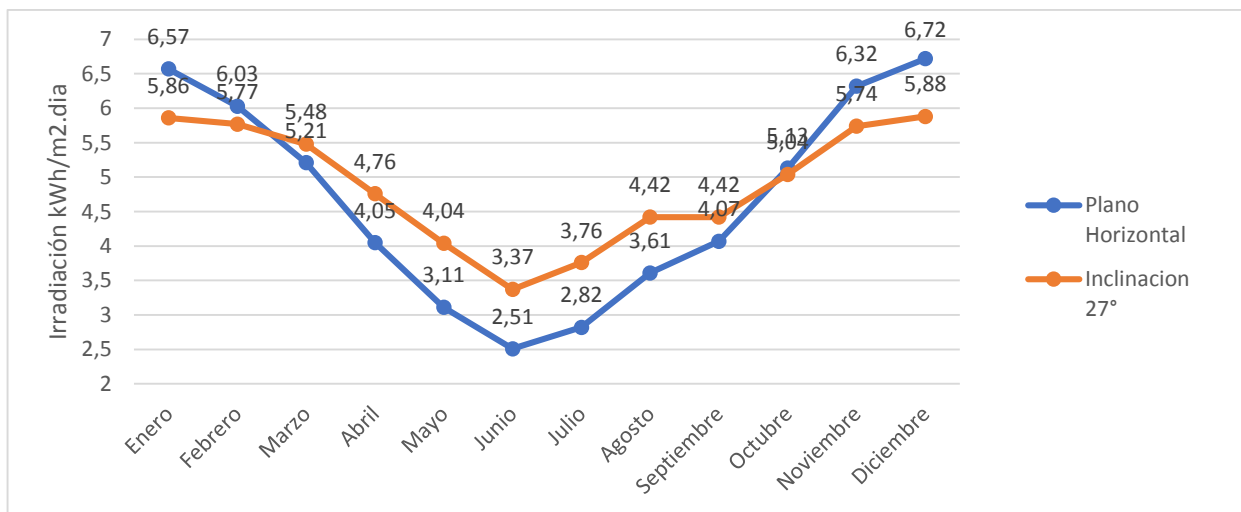


Fig. 5. Irradiación solar en la zona del parque industrial

Se sigue el concepto de generar con la instalación fotovoltaica a lo largo del año, la misma energía que los edificios consumen durante ese periodo. O sea, un balance energético neto igual a cero a lo largo de un año.

### 3.3. Selección de paneles fotovoltaico

Para llevar a cabo lo dicho en el ítem anterior se deben de seleccionar los paneles fotovoltaicos. Su elección dependerá de varios factores: tensión, potencia pico, corriente CC, tensión de vacío, superficie que ocupan los mismos, precio estimado, costo de instalación, tipo de tecnología, vida útil, etc.

Además que está estrechamente relacionado con los ítems siguientes por lo que se tiene un proceso iterativo.

Los paneles se seleccionan a partir de catálogos de diferentes empresas que los comercializan.

### 3.4. Selección del equipo inversor

La selección del inversor se realiza en función de la potencia pico total del conjunto de paneles instalados, sin embargo, también tiene importancia factores como la tensión, la corriente y el número de entradas, etc.

### 3.5. Dimensionado de conductores

La selección de los conductores en los distintos tramos se llevara a cabo mediante las limitaciones de calentamiento y caída de tensión.

Todo el proceso se realizará en base a la reglamentación de instalaciones eléctricas en inmuebles RIEI [10].

Habrá diferentes tramos con diferente sección de conductores, ello depende de la forma de conexión entre paneles –serie, paralelo o mixto- y entre paneles y el inversor.

Los conductores deben cumplir tres condiciones:

**Caída de tensión:** la circulación de corriente por los conductores ocasiona una caída de tensión, para circuitos seccionales se recomienda una caída de tensión no mayor a 1%. La AEA (N°90364, 2014) [6] sugiere calcular la caída de tensión según la ecuación (3).

$$\Delta V = \frac{\Delta V_{cond} * I * L * 100}{V_c * 1000} \quad (3)$$

Donde:

- $\Delta V$  [%]: caída de tensión porcentual;
- $I$  [A]: corriente del circuito;
- $V_c$  [V]: tensión del circuito;
- $L$  [m]: longitud del circuito; y
- $\Delta V_{cond}$  [V/m]: caída de tensión en conductores (dado por tabla AEA 771.19.IV de la pag. 142, de la parte 7 de la reglamentación 90364.

**Intensidad de cortocircuito máxima:** según AEA (N° 90364, 2014) [6], se debe cumplir la ecuación (4).

$$S \geq \frac{I * \sqrt{t}}{k} \quad (4)$$

Donde:

- S [mm]: sección nominal del conductor;
- I [A]: intensidad de corriente de cortocircuito;
- t [s]: tiempo de desconexión;
- k []: factor que toma en cuenta la resistividad y coeficiente de temperatura. Obtenido de tabla AEA 771.19.II

**Intensidad de cortocircuito:** La temperatura que pueden alcanzar los conductores de una línea eléctrica, como consecuencia de un cortocircuito de corta duración, no debe sobrepasar la temperatura máxima admisible especificada en la norma.

Para dimensionar la sección de conductor del circuito alimentado por un generador fotovoltaico, se sigue la recomendación de Oliva Castejon (2010, p.189) [11]:

*“Los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125% de la máxima intensidad del generador y la caída de tensión entre el generador y el punto de interconexión no debe superar al 1,5% para la intensidad nominal.”*

### 3.6. Selección de protecciones

Con base en la RIEI se seleccionarán las protecciones del sistema [10].

### 3.7. Análisis de la calidad de la energía entregada

Como ya se ha visto, depende del inversor. Para valores arriba del 20% de la potencia nominal el factor de potencia se encuentra por arriba de 0,95 [8].

### 3.8. Análisis del comportamiento de la red

Para finalizar se procederá a realizar un análisis de flujo de potencia mediante el software PSS®E.

## 4. Conclusiones

Como este trabajo está en ejecución se puede afirmar por lo hasta aquí visto que el desarrollo de un sistema de generación eléctrica dentro del parque industrial tendrá resultados beneficiosos ya que se reducen los costos de consumo energético, y además se estaría consumiendo energía limpia y renovable que no trae perjuicios al medio ambiente.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de los Ingenieros/tutores Cabral Roberto y Berent Héctor. De igual forma los autores agradecen al Ing. Eduardo Toledo, por la colaboración prestada en todo momento y en especial en cuanto al análisis de flujo de potencia.

## Referencias

- [1] *Propuesta de ley del "Balance Neto" (posterior LEY XVI - N 118)*, Cámara de representantes de la provincia de Misiones: [http://diputadosmisiones.gov.ar/web\\_camara/archivos/proyectos/P45220.pdf](http://diputadosmisiones.gov.ar/web_camara/archivos/proyectos/P45220.pdf), 2016.



- [2] *Ley nacional 27.191 "REGIMEN DE FOMENTO NACIONAL PARA EL USO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA DESTINADA A LA PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA. MODIFICACION. CREACION DEL FONDO FIDUCIARIO PUBLICO."*, <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/texact.htm>, 2015.
- [3] *Ley nacional 27.424 "REGIMEN DE FOMENTO A LA GENERACION DISTRIBUIDA DE ENERGIA RENOVABLE INTEGRADA A LA RED ELECTRICA PUB"*, <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/305000-309999/305179/texact.htm>, 2017.
- [4] *Ley provincial XVI - N 118*, Posadas;Misiones;Argentina: [http://diputadosmisiones.gov.ar/web\\_camara/archivos/digesto/leyes/113649.pdf](http://diputadosmisiones.gov.ar/web_camara/archivos/digesto/leyes/113649.pdf), 2016.
- [5] G. Fenés, «Energíaestrategica,» 27 3 2019. [En línea]. Available: <http://www.energiaestrategica.com/generacion-distribuida-con-energias-renovables-provincia-por-provincia-el-detalle-de-las-normativas-en-cada-mercado/>. [Último acceso: 7 2019].
- [6] Reglamento de Instalaciones Electricas en Inmuebles (RIEI), Argentina, Asociación Electrotécnica n° 90364: AEA, 2014.
- [7] *IEC 61000-3-2 (IEC 2000)*, [https://webstore.iec.ch/p-preview/info\\_iec61000-3-2%7Bed2.2%7Den\\_d.pdf](https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec61000-3-2%7Bed2.2%7Den_d.pdf).
- [8] J. C. DURÁN, *Proyecto Iresud: Interconexión De Sistemas Fotovoltaicos La Red Eléctrica En Ambientes Urbanos Estado De Avance A Julio De 2014 Y Primeras Mediciones En Sistemas Piloto*, Asociación Argentina de Energía Renovables y Medio Ambiente - ASADES 2014 - Vol. 2, pp. 04.127-04.137, 2014.
- [9] «CRESESB,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.cresesb.cepel.br/>.
- [10] «Reglamento de instalaciones Electricas en Inmuebles (RIEI),» de *sección 7*, Asociación Electrotecnica Argentina, AEA, 2007.
- [11] O. Castejon, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, pag.189, 2010.