

## **OPTIMIZACIÓN DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

**S. B. Jacob<sup>1,2</sup>, C. N. de Souza<sup>3</sup>, G. J. Murcia<sup>1,2</sup>, J. C. Branda<sup>1,2</sup>, E. Garín<sup>1</sup>, D. O. Carrica<sup>1,4</sup>  
y S. S. Tedoldi<sup>5</sup>**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata  
LEyDE (Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos)  
LIC (Laboratorio de Instrumentación y Control)

Juan B. Justo 4302 CP 7600 Mar del Plata FAX 0223- 4 810046 Tel: 0223 4816600

Email: [sujacob@fi.mdp.edu.ar](mailto:sujacob@fi.mdp.edu.ar)

*Recibido 28/07/17, aceptado 29/09/17*

**RESUMEN:** Este trabajo presenta un estudio llevado a cabo en el Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos (LEyDE) de la Universidad Nacional de Mar del Plata que, mediante simulación, analiza para la superficie de azotea de la Facultad de Ingeniería, cuál es la configuración más adecuada respecto de la separación de paneles e inclinación, y la influencia en la generación del sombreado de manera de maximizar la producción energética por metro cuadrado de terraza y de panel. Los resultados arrojan que la inclinación óptima para la zona en estudio es de 30° y que con una separación de 2,55 metros se obtiene la mayor producción por metro cuadrado de terraza y panel.

**Palabras clave:** Energías Renovables, Energía Solar, Optimización, Simulación.

### **INTRODUCCIÓN**

Nuestro país se ve afectado por una fuerte dependencia de los combustibles fósiles y, a su vez, el constante crecimiento de la demanda eléctrica produce un incremento permanente de las emisiones de gases de efecto invernadero. De lo mencionado anteriormente, se entiende que Argentina se enfrenta a un doble desafío: por un lado, realizar constantes ampliaciones de la potencia instalada tanto en las centrales como en las líneas de transporte, y por el otro establecer estrategias que permitan la introducción gradual de otras fuentes renovables de energía como la solar y la eólica si es que se desean realizar acciones concretas en busca de la protección del medio ambiente. (Jacob et al., 2014)

Frente a estas necesidades, la Ley Nacional 26190, sancionada en 2006, establecía que en diez años, el 8% de la generación eléctrica nacional provendría de fuentes limpias. Sin embargo, no se llegó ni a 1% y el Estado se propuso corregir esta situación. En septiembre del 2015 se sancionó la Ley Nacional 27191 extendiendo el plazo a fines de 2017 sobre el 8% de la generación eléctrica y, una nueva meta, llegar al 2025 con un 20% de participación renovable en la matriz de energía eléctrica nacional. Nuevamente, dicho objetivo difícilmente sea alcanzado a fin de año, ya que como se puede observar en la figura 1, la producción de energías limpias sólo cubre el 1% de la generación anual nacional. (CAMMESA, 2017).

---

1 Docente Facultad de Ingeniería UNMDP, 2 Investigador UNMDP, 3 Alumno avanzado de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ingeniería UNMDP becario de investigación, 4 Investigador CONICET, 5 Alumno avanzado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería UNMDP becario de investigación.

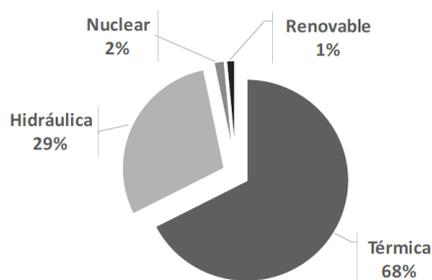


Fig. 1: Participación de cada fuente de energía para el mes de mayo de 2017 en la Argentina

Para fomentar la investigación y el desarrollo local de las energías renovables, formar recursos humanos en el tema, encontrar una fuente de financiación a proyectos de energías alternativas, y relevar el recurso eólico o solar para la toma de decisiones, entre otras, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FI-UNMDP) decidió participar en el Proyecto IRESUD: “Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos”, que tiene entre sus objetivos desarrollar e impulsar el establecimiento de legislación y normativa que promueva en el país sistemas de generación distribuida conectada a la red. La FI-UNMDP participa del proyecto a través de un trabajo conjunto del LEyDE (Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos) y del LIC (Laboratorio de Instrumentación y Control) de los Departamentos de Ingeniería Eléctrica y Electrónica respectivamente. (Eyras y Durán, 2013).

Como parte del proyecto FI-UNMDP se instaló un sistema de generación fotovoltaico de 5,1 kW de potencia nominal inyectando en esta primera etapa la energía generada a la red interna de la institución. Este sistema fotovoltaico instalado en la terraza del edificio principal de la FI-UNMDP, consta de 18 paneles solares policristalinos de 285 W de potencia nominal cada uno, orientados al norte e inclinados 30°, formando tres arreglos (strings) de seis paneles cada uno conectados en serie. Cada arreglo inyecta la energía generada a la red de baja tensión de la Facultad mediante tres inversores monofásicos de 1,5 kW conectados a cada fase. Los parámetros eléctricos se monitorean mediante un analizador de calidad de energía marca PQube, que adquiere todas las magnitudes a la entrada de un inversor y a la salida de los tres inversores (Jacob et al., 2016).

Una alternativa para implementar un sistema de generación distribuida a nivel local es aprovechar las terrazas de los edificios para instalar paneles fotovoltaicos. Las instalaciones de energía fotovoltaica en edificios no se pueden estudiar desde el mismo punto de vista que las centrales solares ubicadas en el suelo (Bayod Rujula et al., 2010). En los edificios, hay que conseguir no sólo una alta productividad de los módulos, sino también un adecuado aprovechamiento del espacio disponible. Este trabajo busca la configuración óptima para la instalación fotovoltaica emplazada en el techo de la FI-UNMDP.

## METODOLOGÍA

De modo de encontrar la distribución óptima para una terraza, se procedió a simular instalaciones fotovoltaicas con diferentes configuraciones para obtener así su producción anual. Para ello fue necesario evaluar la amplia gama de software apropiado para dicha tarea. Una vez elegido el software más acorde, fue necesario determinar su comportamiento, contrastando la simulación de la planta en estudio con su producción. Con una diferencia razonable de lo real respecto a lo simulado, se pudieron analizar las distintas configuraciones de modo de llegar a las deseadas conclusiones.

### *Comparación de software*

Mediante la búsqueda online de software se encontraron distintas posibilidades, entre las que se destacan:

1. PVsyst
2. HOMER
3. Skelion (para Sketch Up)
4. System Advisor Model (SAM)

A continuación, se hace una breve reseña de cada software:

1. PVsyst es una herramienta para desarrollar instalaciones fotovoltaicas que permite el estudio, la simulación y el análisis de un sistema fotovoltaico completo. Se puede dimensionar el tamaño de las instalaciones teniendo en cuenta la radiación solar que recibirían en función de su ubicación gracias a su base de datos meteorológica, que permite su diseño en 3D y que tiene en cuenta la proyección de sombras gracias a la simulación del movimiento del sol durante el día. También permite el análisis económico usando costos reales de componentes, costos adicionales y las condiciones de inversión, en cualquier moneda. PVsyst es un software comercial, pero que se puede obtener gratis durante un periodo de un mes. Su objetivo es definir rápidamente las características generales de un sistema fotovoltaico planificado.

2. HOMER es un modelo simplificado basado en computadoras para el diseño de sistemas de generación distribuida tanto dentro como fuera de la red. Los algoritmos de optimización y análisis de sensibilidad de HOMER permiten a la interfaz de usuario evaluar la viabilidad económica y técnica de un gran número de opciones tecnológicas y explicar las variaciones en los costos y la disponibilidad de recursos energéticos. Para su utilización debe obtenerse una licencia y se puede instalar en todas las versiones de Microsoft Windows y emuladores de Windows.

3. Skelion es un complemento (plugin) para Google Sketchup que permite diseñar la instalación de paneles solares en edificios tanto térmicos como fotovoltaicos de una forma automática. Este software reduce considerablemente el tiempo promedio empleado en hacer presentaciones e informes de producción de energía con los sistemas solares. El plugin en forma gratuita permite: ahorrar tiempo de diseño, hacer presentaciones elegantes, mejorar la calidad de las propuestas incluyendo modelos 3D de la instalación solar, cargar la localización geográfica desde Google Earth, etc. Sin embargo, para poder exportar informes de energía, añadir los propios modelos a una base de módulos fotovoltaicos y controlar las sombras en cualquier momento del año, se debe adquirir su versión comercial. Su ventaja es la facilidad de uso para el diseño, sin embargo, se necesita contar con un software adicional para procesar la información.

4. SAM está diseñado para el desempeño y análisis económico de proyectos de energía renovable. Este software desarrollado por National Renewable Energy Laboratory (NREL) es el más adecuado para ingenieros, desarrolladores de tecnología e investigadores. Es libre de costo y utilizable en cualquier versión de Windows o Macintosh. Se ha desarrollado la herramienta para una gama de tecnologías de energía renovable y es utilizado en todo el mundo para la planificación y evaluación de software de investigación y desarrollo de los costos del proyecto y las estimaciones de rendimiento, así como para la investigación académica. SAM realiza predicciones de rendimiento para conexión a red solar, instalaciones mini eólicas, sistemas de energía geotérmica y estimaciones económicas de energía distribuida y proyectos de centrales de generación. Permite mostrar el resultado del modelado en forma tabular y gráficos, pudiéndose a su vez exportar la información en forma de imágenes o planillas de cálculo. Gracias a su versatilidad, sencillez de uso y condición de uso gratuita, fue elegido para el desarrollo de este trabajo.

#### *Utilización del software elegido*

De manera de poder evaluar el buen funcionamiento del software elegido, se procedió a simular la instalación fotovoltaica instalada en el techo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata y luego contrastar la producción simulada con la medida. Para ello, fue necesario ingresar en el software todos los parámetros que afectan a la producción de energía, a saber:

1. Ubicación geográfica y datos climáticos: SAM cuenta con una extensa base de datos climáticos de ciudades de Estados Unidos y de las ciudades más importantes del mundo. Sin embargo, brinda la posibilidad al usuario de cargar sus propios datos meteorológicos. En el caso en estudio, los mismos fueron obtenidos mediante una estación meteorológica marca Davis, instalada en el techo de la FI-UNMdP. El archivo a cargar en el sistema, debe contar con datos por cada minuto de un año completo de: temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, humedad ambiente, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, espesor de nieve e irradiancia global, directa y difusa.

2. Paneles solares utilizados: Al igual que con los datos climáticos, para practicidad del usuario, SAM cuenta con los datos técnicos de muchos de los paneles más usados en la industria solar. Sin embargo, al no contar con los propios de los paneles utilizados en la instalación en estudio, se debieron brindar al software los datos sobre: tipo de celda, área del panel, temperatura de celda nominal, tensión y corriente pico, tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito, coeficientes de temperatura de punto máximo de potencia, corriente de cortocircuito y tensión de vacío, número de celdas en serie, altura de montaje y separación al soporte. Con los mencionados datos, el software es capaz de brindar la potencia máxima nominal en condiciones estándar de temperatura y presión, así como la eficiencia del módulo. Estas características se encuentran en la tabla 1.

| Características del panel         |      |   |         |
|-----------------------------------|------|---|---------|
| Área del panel [m <sup>2</sup> ]  | 1,94 | Coef. de temp. de punto máximo de potencia [%/°C]   | -0,45   |
| Temperatura de celda nominal [°C] | 46   | Coef. de temp. de corriente de cortocircuito [%/°C] | 0,05    |
| Tensión nominal [V]               | 35,1 | Coef. de temp. de tensión a circuito abierto [V/°C] | -0,32   |
| Corriente nominal [A]             | 8,12 | Número de celdas en serie                           | 72      |
| Tensión a circuito abierto [V]    | 44,1 | Altura de montaje [pisos ]                          | 2 o más |
| Corriente de cortocircuito [A]    | 8,51 | Separación al soporte [pulgadas]                    | 0,5-1,5 |

*Tabla 1: Características de los paneles a simular.*

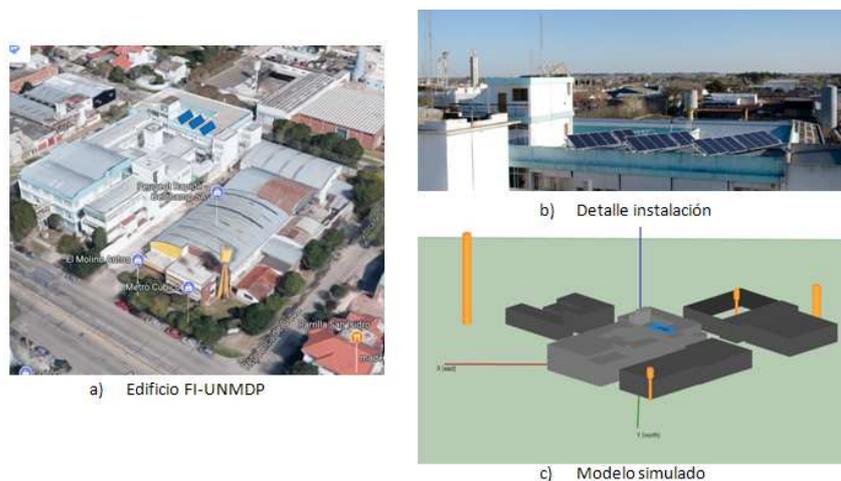
3. Inversores utilizados: Los datos a ser ingresados al software sobre los inversores utilizados son: potencia máxima de salida, eficiencia del inversor, tensión alterna nominal, tensión continua nominal, máxima tensión y corriente continua y MPPT. Además, se debe indicar la potencia consumida durante la operación y el consumo por la noche. Dichos datos son brindados por el fabricante y se encuentran en la tabla 2. Con dicha información el software brinda la potencia máxima en continua de entrada que soporta el inversor.

| Características del inversor     |      |   |     |
|----------------------------------|------|---|-----|
| Potencia máxima de salida CA [W] | 1650 | Tensión mínima en continua MPPT [V]         | 200 |
| Eficiencia del inversor [%]      | 96,3 | Tensión máxima en continua MPPT [V]         | 405 |
| Tensión en alterna nominal [V]   | 230  | Tensión nominal en continua [V]             | 360 |
| Máxima tensión en continua [V]   | 450  | Potencia consumida durante la operación [W] | 7   |
| Máxima corriente en continua [A] | 8,9  | Potencia consumida por la noche [W]         | 7   |

*Tabla 2: Características de los inversores a simular.*

4. Diseño de la instalación: Siendo motivo de investigación cuál es la configuración óptima, la carga de los parámetros de distribución y emplazamiento de los módulos es de suma importancia. Se procedió a describir la configuración actual de la instalación fotovoltaica. Para ello se debió ingresar al software: cantidad de paneles solares por string, cantidad de strings en paralelo, número de inversores, cantidad de arreglos (strings por fase), inclinación (tilt) y orientación (azimuth) de cada arreglo en grados y factor de cobertura de suelo (ground cover ratio o gcr) que indica la proporción entre el largo de los paneles y el distanciamiento entre ellos.

5. Sombreamiento: El sombreado (shading) causado por las edificaciones cercanas o por los mismos paneles afecta al rendimiento de la instalación. De manera de poder cuantificar este efecto, SAM provee una herramienta de diseño 3D. El objetivo es modelar la instalación y todos aquellos edificios u obstáculos que puedan producir sombreado, como se observa en la figura 2.



*Fig. 2: Fotografía y modelación 3D de la instalación fotovoltaica en el techo de la FI-UNMDP*  
 Una vez modelada la instalación, el software requiere que se le ingrese la conformación de los strings (cantidad de paneles por fila, cantidad de filas y orientación de los paneles). En el caso de estudio, se ubicaron 6 paneles en una sola fila de forma vertical. Con toda la información necesaria acerca del diseño, el software calcula en función del largo del panel y el ground cover ratio (gcr) el distanciamiento de los paneles.

6. Pérdidas de energía: Además de las pérdidas energéticas debidas al sombreadamiento de los paneles también se registra una menor producción debido a:

- Pérdidas de irradiancia: las pérdidas por ensuciamiento se aplican al total de la Irradiancia incidente en cada string. El software aplica un coeficiente de pérdidas en adición a las de sombreadamiento de 5% anual.
- Pérdidas en corriente continua: aplican a la salida de cada arreglo de paneles fotovoltaicos y tienen en cuenta las pérdidas que no son estimadas por la eficiencia del panel (pérdidas en los conductores, diodos, etc.). El software estima estas pérdidas en 4,4%.
- Pérdidas en corriente alterna: aplican a la salida de cada inversor y tienen en cuenta las pérdidas que no son estimadas por el mismo como las pérdidas en los conductores. El software estima estas pérdidas en 1%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Obtención de la eficiencia del software*

La simulación de la instalación en las condiciones antes mencionadas arrojó como resultado una producción anual esperada de 6122,6 kWh. Por otra parte, la energía medida que la instalación fotovoltaica de la FI-UNMDP inyectó a la red durante todo el año 2016, fue de 6606,1 kWh. Esto implica una diferencia de 7,3% entre la simulación y la producción medida.

Era de esperar que el software no refleje perfectamente la energía real generada por los diversos errores que se arrastran. En primer lugar, se utilizan simplificaciones y aproximaciones en cuanto a las pérdidas. Por otro lado, los datos meteorológicos provistos al software poseen errores de medición propios del instrumento, del tratamiento de los datos de irradiancia y de fallas en la estación meteorológica, como lapsos sin medición. Finalmente, los inversores durante el período de estudio sufrieron diversas fallas durante los meses de mayo, julio, septiembre y octubre, por lo que la obtención de la energía mensual y, por ende anual, también posee un error de cálculo al no contar con todos los datos necesarios.

En forma de resumen, el gráfico a continuación refleja la producción energética mensual simulada y medida para su contraste, correspondiente a los meses de enero a diciembre del año 2016.

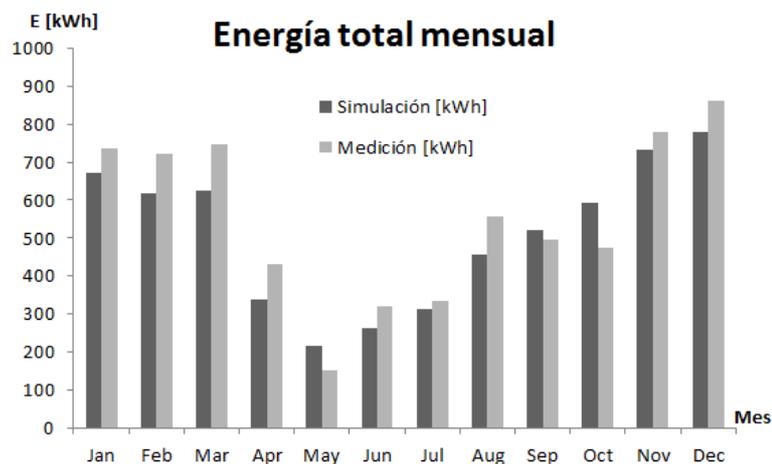


Fig. 3: Energía mensual simulada y medida.

#### Obtención de la inclinación más adecuada

Para optimizar la producción energética es preciso analizar la sensibilidad de los módulos a ser montados con diferentes ángulos. A tal fin, se procedió a simular la instalación con todos sus paneles desde la posición horizontal hasta la vertical variando 5°. En la gráfica de producción mensual en función de la inclinación de los paneles de la figura 4 puede observarse que la máxima producción anual se obtiene para un ángulo de 30° (coincidiendo con lo montado en el techo de la FI-UNMDP).

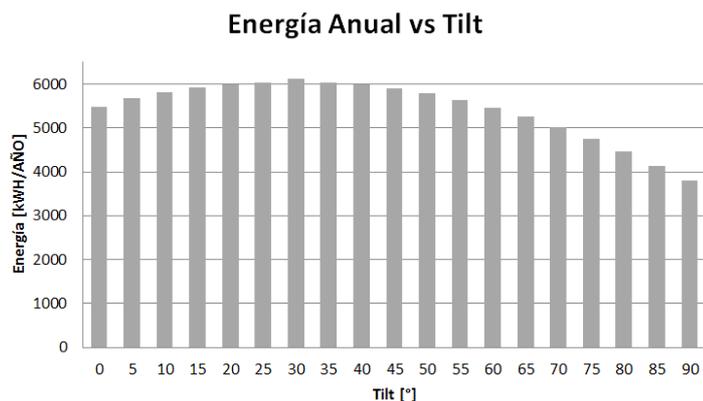


Fig. 4: Energía anual simulada en función de la inclinación de los paneles

#### Obtención de la separación más adecuada

De manera de optimizar el espacio de terraza en estudio, se procedió a simular la planta con paneles orientados hacia el norte y con una inclinación de 30° (según lo indicado en el apartado anterior) y variando la distancia entre filas de paneles.

Dicha distancia influye en las pérdidas por sombreado y en la cantidad de paneles que pueden emplazarse. La menor separación tomada para la simulación es la proyección horizontal de un módulo de 1,958 metros de largo inclinado a 30°, es decir, 1,7 metros. Se simuló la producción separando las filas cada 0,1 metros hasta llegar a una distancia de 3,5 metros. Con los valores de producción energética anual para cada una de las separaciones se calculó la energía por metro cuadrado de terraza y panel. Para ello se tuvo en cuenta que la azotea en estudio posee un área de 140 metros cuadrados y los paneles utilizados son de 1,94 metros cuadrados.

Finalmente se graficó la energía por metro cuadrado de terraza (en color azul) y panel (en color naranja) en función de la separación entre filas de paneles, como se observa en la figura 5. En ella, se puede detectar que a mayor separación de filas para una dada terraza, se pueden colocar menor cantidad de paneles y por lo tanto se produciría menos. Como contrapartida, a mayor separación de paneles, se produce menor sombreado aprovechando mejor la superficie del panel para producir

energía. Con estos comportamientos, y observando la figura 5 se puede determinar que para una separación entre 2,5 y 2,6 metros se equilibra el aprovechamiento, tanto del panel como del área de la terraza.

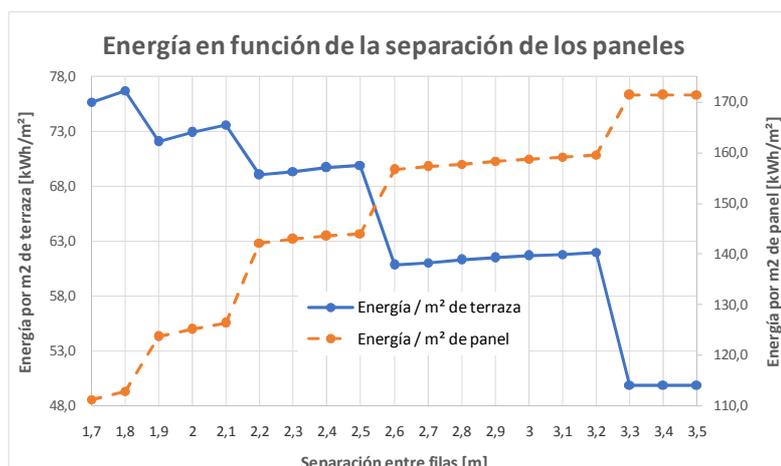


Fig. 5: Energía por superficie de terraza y panel en función de la separación de las filas de paneles

A su vez, se simuló una instalación de 72 paneles ubicados de forma horizontal ocupando toda la superficie de la terraza en estudio. En la tabla 3 puede observarse que por más que se obtenga más generación anual, esto es a base de un costo mayor por casi duplicarse la cantidad de paneles. Aún así no se obtiene una mayor producción por metro cuadrado de terraza que ubicando 28 paneles con separación de 2,6 metros, ni una mayor producción por metro cuadrado de panel que ubicando 35 paneles con separación de 2,5 metros.

| Diseño   | Energía anual [kWh] | Energía anual por m <sup>2</sup> de terraza [kWh/m <sup>2</sup> ] | Energía anual por m <sup>2</sup> de panel [kWh/m <sup>2</sup> ] |
|--|---------------------|---|---|
| 72 paneles en posición horizontal ocupando toda la terraza | 13816,7             | 69,9  | 144   |
| 35 paneles con tilt de 30° y separación de 2,5 m           | 9788,4              | 60,8  | 156,5   |
| 28 paneles con tilt de 30° y separación de 2,6 m           | 8512,1              | 98,7  | 101,6   |

Tabla 3: Energía anual, por metro cuadrado de terraza y de panel para tres configuraciones distintas

## CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la importancia de buscar la disposición más adecuada de una instalación fotovoltaica para generación distribuida de manera de aprovechar de forma más eficiente el recurso solar y el lugar de emplazamiento.

El máximo provecho del espacio que ocupan los módulos solares resulta del equilibrio entre el sombreado, inclinación y separación. Este estudio, mediante la simulación de la instalación fotovoltaica montada en el techo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, permitió determinar que la inclinación óptima de los paneles solares para la zona en estudio es de 30° y que con una separación de 2,55 metros se obtiene la mayor producción energética por metro cuadrado de terraza y panel.

## REFERENCIAS

- CAMMESA. “Informe mensual Mayo 2017”, disponible en el sitio web: <http://portalweb.cammesa.com/memnet1/pages/descargas.aspx> (16/07/2017)
- R. Eyras, J. C. Durán. Proyecto IRESUD: “Interconexión de Sistemas FV a la red eléctrica en ambientes urbanos”. *Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía – ELUREE* 2013, Buenos Aires, Argentina.

- Jacob S. B., Murcia G. J., Branda J. C., Garín E., Echeverría N., Tedoldi S. S., y de Souza C. N. (2014). Interfaz de monitoreo de un sistema fotovoltaico conectado a la red. ASADES. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 18, 04.19-04.28.
- Jacob S. B., Murcia G. J., Branda J. C., Garín E., Echeverría N., Tedoldi S. S., y de Souza C. N. (2016). Influencia de la limpieza en la generación de instalaciones fotovoltaicas. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 38, pp. 1 - 5, 2016. Impreso en la Argentina. ISSN 0328-932X
- Bayod Rujula A. A., Ortego Bielsa A., Martínez García A. (2010). Instalaciones fotovoltaicas en azoteas: Parámetros para la elección de la mejor tecnología y ángulo de captación. *Era Solar: Energías Renovables*, 155, 6-11.

## ABSTRACT

This paper presents a study developed by Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos (LEyDE) of the National University of Mar del Plata that, through simulation, analyzes the most appropriate configuration of photovoltaic installations on the roof of the Faculty of Engineering, (the separation of panels and inclination) and the influence of shading in order to maximize energy production per m<sup>2</sup> of terrace and m<sup>2</sup> of panel. The results show that the most optimum tilt for the area under study is 30° and that with a separation of 2,55 m the highest production per m<sup>2</sup> of terrace and panel is obtained.

**Keywords:** Renewable Energies, Solar Energy, Optimization, Simulation.