

Análisis de la producción de energía fotovoltaica en una escuela de la provincia de Jujuy

Ituarte, Luis E.^{1,2}; Tarifa, Enrique E.^{1,3} y Martínez, Sergio L.^{1,2}

(1) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*

lituarte@ieee.org; eetarifa@fi.unju.edu.ar; smartinez@fi.unju.edu.ar

(2) *Departamento Académico San Salvador, Universidad Católica de Santiago del Estero*

sergioluis.martinez@ucse.edu.ar

(3) *CONICET*

RESUMEN

A pesar de la existencia de numerosos trabajos respecto a la producción de energía con sistemas fotovoltaicos en edificios educativos, existe escasa investigación que se refiera a escuelas del norte argentino. Debido a las condiciones favorables que presenta la provincia de Jujuy para ese tipo de producción de energía, en este trabajo, se analiza la producción de energía anual de la instalación fotovoltaica de una escuela pública de esta provincia. La instalación estudiada posee una potencia instalada de 10 kWp, provista por paneles policristalinos que inyectan corriente a la red pública de distribución eléctrica. En el análisis realizado, se compararon las predicciones provistas por el software de simulación PV*SOL® para el año 2020 con los datos históricos obtenidos en ese año. Los resultados del estudio sugieren que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos series de datos comparadas; por lo tanto, el simulador es adecuado para predecir la futura producción de los paneles estudiados. Esta conclusión tiene gran importancia para el diseño de los sistemas de producción de energía fotovoltaica que se instalarán en otras escuelas.

ABSTRACT

Despite the existence of numerous studies regarding the production of energy with photovoltaic systems in educational buildings, there is little research that refers to schools in northern Argentina. Due to the favorable conditions that the province of Jujuy presents for this type of energy production, in this work, the annual energy production of the photovoltaic installation of a public school in this province is analyzed. The studied installation has an installed power of 10 kWp, provided by polycrystalline panels that inject current into the public electricity distribution network. In the analysis carried out, the predictions provided by the PV * SOL® simulation software for the year 2020 were compared with the historical data obtained in that year. The results of the study suggest that there are no statistically significant differences between the two compared series of data; therefore, the simulator is adequate to predict the future production of the studied panels. This conclusion is of great importance for the design of the photovoltaic energy production systems that will be installed in other schools.

Palabras claves: instalación fotovoltaica – validación – escuela – generación distribuida

Keywords: photovoltaic installation – validation – school – distributed generation

1 INTRODUCCIÓN

La preocupante situación ambiental mundial motivó el interés en la utilización de energías renovables. Entre ellas, la energía solar y la eólica son las que mayor importancia tienen en la generación de electricidad en la actualidad. En este marco, en los últimos cuatro años, la provincia de Jujuy ha experimentado un incremento significativo en el número de instalaciones fotovoltaicas no sólo destinadas al mercado eléctrico industrial, sino también al mercado eléctrico de los usuarios residenciales y de edificios públicos. Un ejemplo particular son las escuelas públicas jujeñas en las que se instalaron sistemas de producción de energía fotovoltaica que no sólo abastecen a los establecimientos educativos, sino que también inyectan corriente a la red pública de distribución eléctrica (Gobierno de Jujuy, 2020). Esto es posible gracias a las condiciones favorables que presenta la provincia de Jujuy para este tipo de producción de energía eléctrica. En efecto, la provincia de Jujuy es una de las regiones de mayor irradiación solar de la República Argentina (Laspiur *et al.*, 2013). Por otra parte, cualquier esfuerzo para producir energía eléctrica a través de instalaciones de paneles fotovoltaicos es crucial para el objetivo estratégico argentino de reducción de emisiones de carbono. De hecho, la producción de energía eléctrica fotovoltaica en las escuelas públicas a construirse, es una estrategia sustentable para los planes futuros de infraestructura de un país. Asimismo, los métodos para validar experimentalmente dicha producción de energía fotovoltaica deben ser aprendidos y divulgados en el ámbito de los planificadores de infraestructura de los gobiernos.

La idea de incorporar sistemas fotovoltaicos en la infraestructura de las instituciones educativas fue propuesta inicialmente por Koo *et al.* (2014) y por Park *et al.* (2016) para contribuir al objetivo nacional de reducción de emisiones de carbono 2030 de la República de Corea del Sur. La factibilidad y la evaluación de performance de una instalación fotovoltaica para una institución académica ubicada en Ahmedabad, India, fue investigada por Vasita *et al.* (2017). El cálculo y el diseño de una planta fotovoltaica destinada al edificio de la Universidad Nacional de Rafaela, Santa Fe, Argentina, fue investigado por Berrino *et al.* (2018). Asimismo, el diseño y estudio de performance de la instalación fotovoltaica para el edificio de la Academia de Estudios Superiores de la ciudad de Manipal, India, fue completado por Sharma *et al.* (2018). Adicionalmente, la factibilidad de una instalación fotovoltaica con inyección de corriente de 2 kWp para uso residencial en Bhubaneswar, India, fue analizada por Rout y Kulkarni (2020). También, la factibilidad de una instalación fotovoltaica de 12,4 kWp localizada en la región de Vishakhapatnam,

Andhra Pradesh, India, fue investigada por Prasad *et al.* (2020). Finalmente, la comparación de estudios de performance con diferentes herramientas informáticas de una instalación fotovoltaica de 336.96 kWp de la Universidad de Campinas, Brasil, fue realizada por Souza Silva *et al.* (2020).

Si bien el estudio de los sistemas de generación de energía fotovoltaica en establecimientos educativos se realiza en varios países, no es el caso de Argentina en general y de Jujuy en particular. Por otra parte, dado los planes de expansión de este tipo de sistemas que tiene la provincia, es de interés iniciar una serie de estudios que permitan optimizar las futuras instalaciones. Por ello, en este trabajo, se toma como caso de estudio al sistema instalado en una escuela de la provincia de Jujuy. Para ese sistema, se comparan, usando herramientas estadísticas, las predicciones generadas por el simulador PV*SOL® (PV*SOL®, 2020) para el año 2020 con los datos históricos registrados en el mismo periodo. La importancia de este estudio radica en la necesidad de validar el simulador empleado, ya que, si éste supera la evaluación, podrá ser utilizado con cierto grado de confianza para el diseño de los sistemas de generación de energía fotovoltaica a instalar en otras escuelas.

2 CASO DE ESTUDIO

Como se adelantó, el caso de estudio corresponde a un sistema de generación de energía fotovoltaica instalado en una escuela de la provincia de Jujuy. La Fig. 1 muestra el mapa de líneas de iso-irradiación solar *Tilt* media anual para las provincias de Salta y Jujuy (Laspiur *et al.* 2013). Como puede apreciarse, las condiciones que presenta la provincia de Jujuy son muy favorables para la generación de energía fotovoltaica.

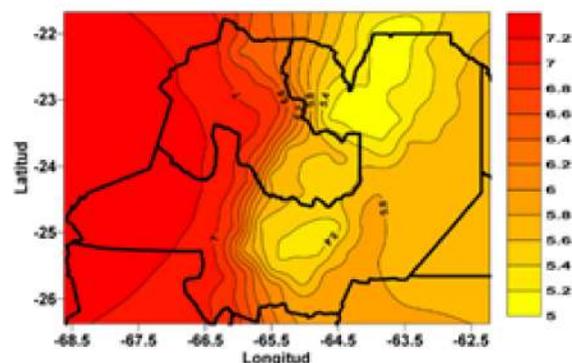


Figura 1. Mapa de líneas de iso-irradiación solar “Tilt” media anual para las provincias de Salta y Jujuy. La escala está en kWh/m² (Laspiur *et al.*, 2013).

La Fig. 2 muestra la localización de la escuela elegida para realizar el estudio: Escuela de Educación Técnica N° 1 “Escolástico Zegada”. Esta escuela está ubicada

en la ciudad capital, donde se asientan la mayor parte de las escuelas de la provincia. Además, pertenece a una zona que tiene un valor de radiación cercano al promedio de la que recibe la provincia. Por estos motivos, las conclusiones a obtener en este trabajo serán aplicables a la mayoría de los establecimientos de la provincia.

El sistema instalado en la escuela seleccionada consta de 36 paneles fotovoltaicos de marca GCL modelo GCL 330 H, de potencia nominal 330 Wp, de 72 celdas, policristalinos, conectados a un inversor trifásico *grid tie* de marca Schneider® modelo Conext CL, con potencia nominal de salida de 20 kW (Schneider Electric, 2021). La Fig. 3 es una vista aérea de la escuela (polígono verde), donde pueden distinguirse los paneles fotovoltaicos instalados en el techo del edificio (polígono rojo). La Fig. 4 muestra los paneles que componen el sistema de generación instalado en la escuela.



Figura 2. Geolocalización de la E.E.T. N° 1 “Escolástico Zegada”, provincia de Jujuy.



Figura 3. Imagen aérea de la instalación fotovoltaica en la E.E.T. N° 1 “Escolástico Zegada”, provincia de Jujuy (Google Earth®, CNES, Airbus Maxar Technologies).



Figura 4. Instalación fotovoltaica sobre la E.E.T. N° 1 “Escolástico Zegada”, provincia de Jujuy.

3 MÉTODO

En primer lugar, se procedió a la carga de los parámetros requeridos por el simulador PV*SOL® (PV*SOL®, 2020) para modelar el caso de estudio. Este simulador fue provisto por la empresa Valentín Software GmbH, y cuenta con mapas de geolocalización de OpenStreetMap® (OSMF, 2021), CC BY-SA y Mapbox. Entre los parámetros cargados están la localización geográfica de la escuela y los datos técnicos de los paneles fotovoltaicos. Una vez completada la carga de datos, se realizó una simulación para predecir la generación de energía fotovoltaica, variable s en la Fig. 5, para los doce meses del año 2020.

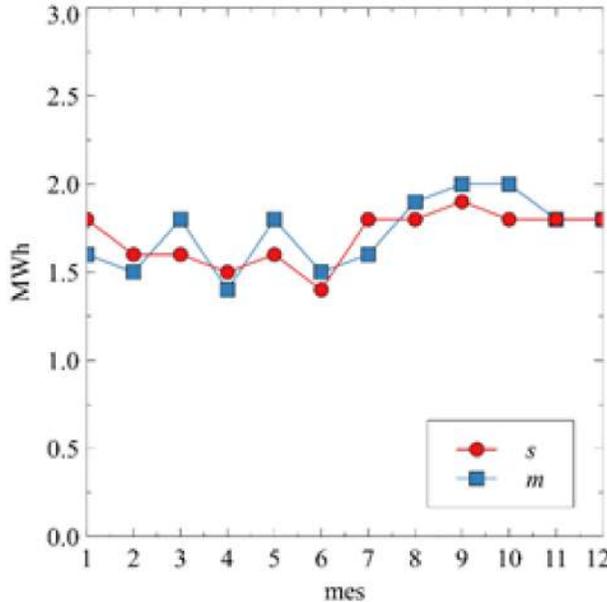


Figura 5. Generación de energía fotovoltaica simulada (variable s) y medida (variable m) en el caso de estudio para el año 2020.

Con el fin de validar los resultados de la simulación, finalizado el año 2020, se recolectaron los datos de energía fotovoltaica medidos durante el periodo simulado, variable m en Fig. 5. Las mediciones fueron realizadas por un inversor trifásico Schneider® Conext CL del tipo *grid tie* (Schneider Electric, 2021) incorporado en la instalación del caso de estudio.

Los datos de producción de energía fotovoltaica a comparar corresponden a series temporales, por lo que se debería emplear alguna técnica específica de ese campo para llevar a cabo el estudio. Sin embargo, dado que sólo se disponen de valores promedios mensuales en un año, el tamaño de la muestra no es lo suficientemente grande como para utilizar un modelo de serie temporal con cierto nivel de confianza. Dado el tiempo que involucra aumentar el tamaño de la muestra y dada la necesidad de validar el simulador antes de proceder con el diseño de sistemas para otras escuelas, se trabajó con los datos disponibles hasta el momento.

Como el objetivo es validar el simulador, se debe determinar si las predicciones simuladas s concuerdan con las respectivas mediciones m . Para ello, primero se calcularon las diferencias d_i para cada mes i :

$$d_i = m_i - s_i \quad (1)$$

Considerando que el tamaño de la muestra, $n = 12$, es menor de treinta, se aplicó la prueba t de muestras pareadas. Esta prueba es un procedimiento estadístico que se utiliza para determinar si la diferencia media \bar{d} entre dos conjuntos de n observaciones relacionadas es cero (Statistics Solutions, 2021):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

En el caso de estudio, se aplicó esta prueba para determinar si el promedio mensual de generación de energía fotovoltaica predicha por la simulación concuerda con el promedio de las mediciones realizadas.

La prueba t de muestras pareadas tiene dos hipótesis en competencia: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula H_0 supone que la verdadera diferencia media (la media poblacional) es cero, $H_0: \mu_D = 0$. En ese caso, las diferencias observadas se atribuyen al azar. Por el contrario, la hipótesis alternativa H_1 supone que la verdadera diferencia media no es igual a cero.

La hipótesis alternativa puede adoptar varias formas dependiendo del resultado esperado. Si la dirección de la diferencia no interesa, se utiliza una hipótesis de dos colas, $H_1: \mu_D \neq 0$. De lo contrario, se puede utilizar una hipótesis de cola superior, $H_1: \mu_D > 0$, o de cola inferior, $H_1: \mu_D < 0$, para aumentar la potencia de la prueba. La hipótesis nula permanece igual. Para el caso de estudio, no interesa la dirección de la diferencia; por lo tanto, se seleccionó la hipótesis de dos colas.

Para poder aplicar la prueba t de muestras pareadas, se deben cumplir algunas condiciones. En una prueba t de muestras pareadas, las observaciones se definen como las diferencias d entre dos conjuntos de valores, y cada suposición se refiere a estas diferencias, no a los valores de los datos originales. La prueba t de muestras pareadas tiene cuatro supuestos principales:

1. La diferencia debe ser continua.
2. Las observaciones son independientes.
3. La diferencia debe tener una distribución aproximadamente normal.
4. La diferencia no debe contener valores atípicos.

Estos supuestos se cumplen para el caso de estudio, salvo el supuesto 3: aunque se puede verificar si la variable tiene media nula, no se cuenta con datos suficientes para verificar si obedece a una distribución normal. Sin embargo, no es crítico realizar esa verificación debido a que la prueba t , en la práctica, demostró ser bastante robusta y poco sensible al cumplimiento de los citados supuestos (Bland, 2000). Los pasos seguidos para realizar la prueba t fueron los siguientes:

- 1- Calcular d_i para todo i , ec. (1).
- 2- Calcular \bar{d} , ec. (2).
- 3- Calcular la desviación estándar de la muestra:

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (3)$$

4- Calcular el valor t :

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_D}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}} \quad (4)$$

5- Calcular el valor crítico t_c o el valor p usando la distribución de Student con grado de libertad $= n-1$ y nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

6- Rechazar la hipótesis nula si $t > t_c$ o $p < \alpha$.

Una vez analizada la concordancia del promedio mensual predicho por simulación con el correspondiente a las mediciones, se procedió a analizar la dependencia lineal de m con respecto a s . Para ello, en primer lugar, se graficó la nube de puntos y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson. Luego, se realizó la regresión lineal (Reliawiki, 2021):

$$m(s) = a s + b \quad (5)$$

donde los coeficientes a y b se estiman como:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n m_i s_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)\left(\sum_{i=1}^n s_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \quad (6)$$

$$b = \bar{m} - a \bar{s} \quad (7)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (8)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i \quad (9)$$

Para verificar el grado de concordancia entre las predicciones mensuales s realizadas por la simulación con las correspondientes mediciones m , se aplicó la prueba t a la pendiente a y a la distancia al origen b . Para una concordancia perfecta, a debería ser igual a la unidad y b debería ser nulo.

Para la prueba de a , se adoptaron las siguientes hipótesis: $H_0: \mu_A = 1$, $H_1: \mu_A \neq 1$, y el valor t se calculó como:

$$t = \frac{a - \mu_A}{S_A} \quad (10)$$

$$S_A^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m(s_i))^2}{n-2} \frac{1}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \quad (11)$$

donde S_A es la desviación estándar muestral de A y \bar{s} es el promedio muestral de S .

En cambio, para la prueba de b , se adoptaron las siguientes hipótesis: $H_0: \mu_B = 0$, $H_1: \mu_B \neq 0$, y el valor t se calculó como:

$$t = \frac{b - \mu_B}{S_B} \quad (12)$$

$$S_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m(s_i))^2}{n-2} \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{s}^2}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \right) \quad (13)$$

donde S_B es la desviación estándar muestral de B .

4 RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los valores de producción de energía fotovoltaica s predichos por la simulación y los valores reales medidos m para los doce meses i del año 2020. También, se presentan las diferencias calculadas d y la diferencia porcentual $d\%$ (tomando como base a m) entre las dos series de datos. Como se puede observar, la mayor diferencia porcentual es 12.5 %.

Tabla 1. Series de datos y diferencias en MWh correspondientes a los doce meses del año 2020 para el caso de estudio.

i	s	m	d	$d\%$
1	1.8	1.6	-0.2	-12.5
2	1.6	1.5	-0.1	-6.7
3	1.6	1.8	0.2	11.1
4	1.5	1.4	-0.1	-7.1
5	1.6	1.8	0.2	11.1
6	1.4	1.5	0.1	6.7
7	1.8	1.6	-0.2	-12.5
8	1.8	1.9	0.1	5.3
9	1.9	2.0	0.1	5.0
10	1.8	2.0	0.2	10.0
11	1.8	1.8	0.0	0.0
12	1.8	1.8	0.0	0.0

En la Fig. 6 se puede apreciar que la diferencia d está uniformemente distribuida con respecto al valor nulo. Esta observación se confirma

al calcular el valor promedio $\bar{d} = 0.025$ MWh. La dispersión uniforme de los datos y el valor medio casi nulo sugiere que d puede estar gobernada por una distribución normal; sin embargo, el tamaño de la muestra no es suficiente para realizar una prueba estadística que permita verificar esta hipótesis.

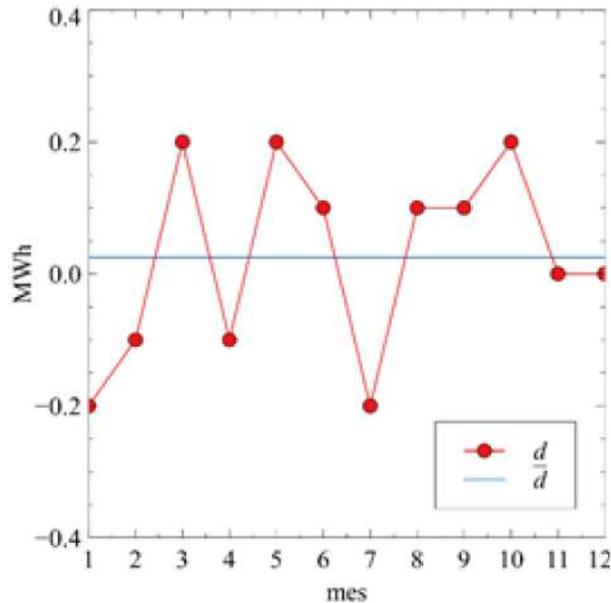


Figura 6. Diferencias d mensuales y el valor promedio \bar{d} para el caso de estudio en el año 2020.

La aplicación de la prueba t a la diferencia promedio \bar{d} —con $n = 12$, $\alpha = 0.05$ y $\nu = 11$ — produjo los siguientes resultados: $t = 0.58$, $t_c = 2.59$ y $p = 0.57$. Estos resultados sostienen la hipótesis nula $H_0: \mu_D = 0$. Por lo tanto, el promedio de producción mensual de energía fotovoltaica predicho por la simulación concuerda con el promedio de las mediciones realizadas con un nivel de confianza del 95 %.

La Fig. 7 presenta la nube de puntos para los valores simulados y medidos. Puede observarse que los puntos se agrupan alrededor de la línea de regresión con coeficientes $a = 0.88$ y $b = 0.22$. El índice de correlación de Pearson es $\rho_{s,m} = 0.68$, cercano a 0.7, donde ya se considera una correlación fuerte. Este índice se toma como un elemento más que indica la correlación entre las variables, pero no como prueba concluyente dado el reducido tamaño de la muestra. La aplicación de la prueba t a la pendiente a —con $n = 12$, $\alpha = 0.05$ y $\nu = 10$ — produjo los siguientes resultados: $t = 0.38$, $t_c = 2.63$ y $p = 0.71$. Estos resultados sostienen la hipótesis nula $H_0: \mu_A = 1$. Por otra parte, la aplicación de la prueba t a la distancia al origen b —con $n = 12$, $\alpha = 0.05$ y $\nu = 10$ — produjo los siguientes resultados: $t = 0.43$, $t_c = 2.63$ y $p = 0.68$. Estos resultados sostienen la hipótesis nula $H_0: \mu_B = 0$. Por lo tanto, la prueba indica que la simulación predice adecuadamente las mediciones mensuales de generación de energía fotovoltaica en el caso de estudio, con un nivel de confianza del 95 %.

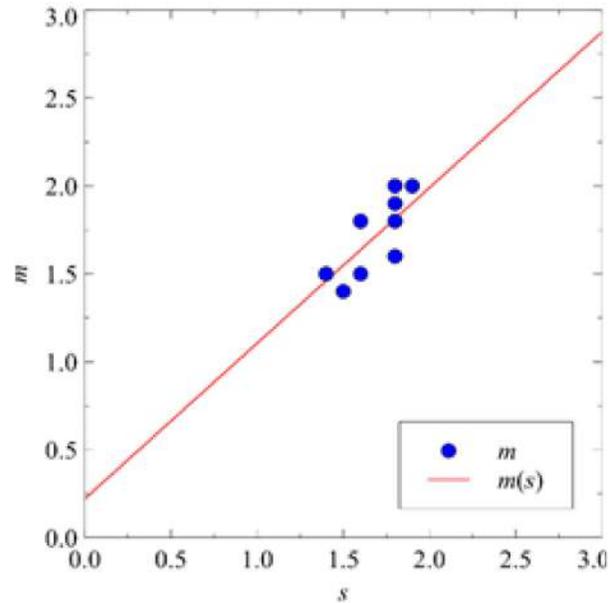


Figura 7. Nube de puntos y regresión lineal de las mediciones m en función de las predicciones s realizadas por simulación para el año 2020.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se analizó la producción de energía fotovoltaica del sistema instalado en la Escuela de Educación Técnica N° 1 “Escolástico Zegada” de la provincia de Jujuy. En el estudio se compararon las predicciones realizadas por el software de simulación PV*SOL® para los doce meses del año 2020 con las mediciones realizadas por el inversor trifásico Schneider® Conext CL del tipo *grid tie* instalado en la escuela. La importancia de la validación del software de simulación radica en que el simulador será empleado para el diseño de futuras instalaciones a realizarse en otras escuelas de la provincia.

La mayor dificultad que se encontró para realizar el estudio estadístico fue el reducido tamaño de la muestra. Sin embargo, la necesidad de contar con la validación del simulador lo más pronto posible y frente al tiempo considerable que implica ampliar el tamaño de la muestra, en este trabajo, se dejaron de lado las pruebas que requieren un tamaño mayor de muestra, y se recurrió a técnicas que son robustas y pueden ser aplicadas a muestras pequeñas.

Si bien el grado de certeza puede aumentar con la adquisición de nuevos datos, del estudio realizado se puede concluir que el simulador predice en forma satisfactoria la producción promedio mensual y la producción mensual de energía fotovoltaica para el caso de estudio.

6 REFERENCIAS

Berrino, C., L. Silva, A. Bucciarelli, Cálculo y

- Diseño de una Planta Fotovoltaica en el Marco del Programa Nacional de Fomento para el Uso de Energías Renovables, *Revista Pymes, Innovación y Desarrollo*, 6 (1), 24-43, 2018.
- Bland, M., *An Introduction to Medical Statistics*, Oxford University, 2000.
- Gobierno de Jujuy, Energía solar de edificios a la red pública: primeros avances en materia de generación distribuida, <https://prensa.jujuy.gob.ar/2020/11/13/energia-solar-de-edificios-a-la-red-publica-primeros-avances-en-materia-de-generacion-distribuida> (13.11.2020)
- Koo, C., H. Kim, T. Hong, Framework for the analysis of the low-carbon scenario 2020 to achieve the national carbon Emissions reduction target: Focused on educational facilities, *Energy Policy*, 73, 356-367, 2014.
- Laspiur, R., G. A. Salazar, J. Zerpa, M. Watkins, Trazado de Mapas Medios Anuales de Energía Solar Global, Directa, Difusa y Tilt, usando la base de datos SWERA. Caso de Estudio: Provincias de Salta y Jujuy, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 17, 08.47-08.52, 2013.
- OSMF - Fundación OpenStreetMap. OpenStreetMap ®. Cambridge, CB4 0WS. United Kingdom. <https://www.openstreetmap.org/> (10.07.2021).
- Park, H., K. Jeong, T. Hong, C. Ban, C. Koo, The optimal photovoltaic system implementation strategy to achieve the national carbon emissions reduction target in 2030: Focused on educational facilities, *Energy and Buildings*, 119, 101-110, 2016.
- Prasad, B. K. K., K. P. Reddy, K. Rajesh, P. V. Reddy, Design and Simulation Analysis of 12.4 kWp Grid Connected Photovoltaic system by using PVSYST Software, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8 (5), 2859-2864, 2020.
- PVSOL ®. Stralauer Platz 34, Berlin, Germany. Valentin Software GmbH. 2020. <https://valentin-software.com/> (10.07.2021).
- Reliawiki, Simple Linear Regression Analysis, http://reliawiki.org/index.php/Simple_Linear_Regression_Analysis (10.07.2021).
- Rout, K. C., P. S. Kulkarni, Design and Performance evaluation of Proposed 2 kW Solar PV Rooftop on Grid System in Odisha using PVsyst, *2020 IEEE International Student's Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 2020.
- Schneider Electric SE. Schneider®. 92500 Rueil Malmaison. France. <https://www.se.com/> (10.07.2021).
- Sharma, S., C. P. Kurian, L. S. Paragond, Solar PV System Design Using PVsyst: A Study of an Academic Institute, *2018 IEEE International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2018.
- Souza Silva, J. L., T. Silva Costa, K. Barbosa de Melo, A Comparative Performance of PV Power Simulation Software with an Installed PV Plant. *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2020.
- Statistics Solutions, Paired Sample T-Test, <https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/paired-sample-t-test/> (10.07.2021)
- Vasita, J., Q. Shakhiya, J. Modi, Feasibility study and Performance evaluation of a grid-connected Rooftop Solar PV system, *IEEE International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC-2017)*. 2017.