



Cálculo y Diseño de una Planta Fotovoltaica en el Marco del Programa Nacional de Fomento para el Uso de Energías Renovables^ξ

*Cristian H. Berrino**

*Luis I. Silva***

*Agustín Bucciarelli****

Resumen

Este artículo presenta, en una primera etapa, un estudio acerca de la legislación nacional y provincial vigente sobre el uso y fomento de las fuentes de energías renovables. Luego se describe en detalle el proceso de cálculo y diseño de una planta fotovoltaica instalada en una institución educativa, en el marco del programa provincial “PROSUMIDORES” y la Ley nacional 27.191 sobre uso de energías renovables. La contribución más destacada se relaciona con plantear las metas de consumo de energía proveniente de fuentes renovables previstas en la Ley pese a que la institución no está obligada. A partir de este objetivo se muestra el proceso de dimensionamiento y el estudio del emplazamiento de la planta. Para definir el tamaño, se realiza una estimación del consumo y de la producción de energía considerando las particularidades de la región donde se instalará la planta. Finalmente se analizan las posibilidades de transferir la experiencia hacía el sector productivo de la región haciendo un especial énfasis en las PyMEs que proyecten sus propias instalaciones y/o buscan realizar desarrollos tecnológicos relacionados con la temática.

Palabras claves

Energías renovables; Generación distribuida; Sistemas fotovoltaicos.

Abstract

This article presents, in a first stage, a survey regarding the current national and provincial regulations about the use and promotion of renewable energies. Then it describes in detail the assessment and design of a photovoltaic system installed in an educational building within the frame of the provincial “PROSUMIDORES” program and the national Law 27.191 that promotes the use of renewable energies. The most outstanding contribution is to set the renewable energy target established in this Law even though it is not mandatory for the institution. Based on this target, the article describes the sizing and location analysis. In order to define the size, it is performed an

ξ Recibido 07 de mayo 2018 / Aceptado 25 de junio 2017.

* Ingeniero Electromecánico, Departamento de Tecnologías e Innovación para el Desarrollo, Universidad Nacional de Rafaela. Correo electrónico: chberrino@gmail.com

** Dr. en Ingeniería, Departamento de Tecnologías e Innovación para el Desarrollo, Universidad Nacional de Rafaela. Correo electrónico: luissilva@unraf.edu.ar

*** Ingeniero Electromecánico, Departamento de Tecnologías e Innovación para el Desarrollo, Universidad Nacional de Rafaela. Correo electrónico: agu.bucciarelli@gmail.com

estimation of the consumption and the energy production considering the particular characteristics of the region. Finally it is analyzed the feasibility of transferring the experience towards the production sector. This analysis is focused on the SME that are foreseeing their own installation and/or seek for new Hi-Tec developments in this field.

Keywords

Renewable energy; Distributed generation; Photovoltaic systems.

1. Introducción

La quita de subsidios a la compra de energía plantea un escenario de recuperación de precios de la generación de energía en la Argentina, aumentando la factibilidad de los proyectos de energías renovables ante las convencionales. Además, se ha alcanzado un mayor compromiso en el plano internacional para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y se creó una agenda internacional en contra del cambio climático (Berruezo & Jiménez, 2017).

Este nuevo escenario estableció el paradigma del uso racional de la energía, la eficiencia energética y un fuerte crecimiento en la utilización de fuentes de energías renovables. Actualmente existen diversas fuentes de energía renovable cuya implementación en nuestro país es económica y técnicamente viable. Particularmente la energía fotovoltaica ha demostrado ser una de las más factibles en la Región Centro (Risso G. A., Battioni, Cutrera, Bleger, & Schmidt, 2015). Asimismo, dicha tecnología resulta muy promisorio por ser la que mayor empleo verde genera en el mundo y la de mayor crecimiento respecto al resto de las renovables (International Energy Agency, 2017).

Las plantas fotovoltaicas conectadas a la red de energía eléctrica tuvieron sus primeros desarrollos en Estados Unidos en la década de 1970 (Strong & Wills, 1992). Estas experiencias exitosas fueron posteriormente impulsadas en diversos países de la comunidad europea como Alemania, Austria y Suiza (Gabler, Heidler, & Hoffmann, 1997; Wilk, 1997; Meier, Schaffner, & Blum, 1997). A partir del nuevo milenio su implementación se ha extendido en todo el mundo (Šúri, Huld, Dunlop, & Ossenbrink, 2010; Dinçer, 2011) y en la actualidad el tema se investiga tanto en países centrales (Gómez-Expósito, 2018) como en potencias emergentes (Rafique & Jianhua, 2018).

En la Argentina, este cambio de paradigma permitió un aumento significativo de las iniciativas y proyectos relacionados con las energías renovables (CADER, 2016). Desde los últimos años se acuña el concepto de transición energética que implica un cambio estructural del sistema energético que involucre y aumente la utilización eficiente de energías renovables y distribuidas (Gil & Carrizo, 2016). Dicha transición se enfoca en la creación de “ciudades postcarbón” (Bermejo, 2013) que prioricen los desarrollos locales y sirvan de sustento para implementar políticas públicas tendientes a reducir la precariedad energética (Carrizo, Berdolini, Montecelli, & Marino, 2015). Para acompañar esta transición el Estado Nacional y los estados provinciales y locales han trabajado sobre un conjunto de leyes y normativas que fomentan y ordenan el uso de las energías renovables (Guido & Carrizo, 2016).

2. Legislación y Normas

La energía solar fotovoltaica es la tecnología con mayor crecimiento respecto al resto de las energías renovables, debido a las mejoras tecnológicas, asociadas a la reducción de costos de implementación (Solar Power Europe, 2017). Esta evolución ha despertado el interés de diferentes administraciones en distintos países, que decidieron fomentar su aplicación habilitando ayudas y subvenciones. En este sentido cabe destacar que ya existen decretos en España, Francia, Alemania y el Reino Unido que regulan el procedimiento de conexión de las plantas fotovoltaicas a la red y fomentan su implementación aplicando tarifas diferenciadas. Acompañando esta tendencia, la provincia de Santa Fe y el Estado Nacional Argentino lanzaron entre los años 2015 y 2017, una serie de programas y regímenes de fomentos para el uso de fuentes de energías renovables (EERR) y generación distribuida. Como resultado de estas políticas han surgido distintos proyectos en la Región Centro que han permitido a un grupo de pymes acceder a esta tecnología y viabilizar su implementación. Esta evolución plantea un escenario promisorio de corto y mediano plazo para este tipo de fuentes de energías.

2.1 Legislación Nacional. Ley 27.191 - Modificación del Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía (Ley 26.190)

La regulación en Argentina de las EERR se inicia en 2006, cuando el Estado Nacional fija, a través de la Ley 26.190, la meta del 8% de la generación de energía a partir de fuentes renovables, a cumplir en un plazo de 10 años. No obstante, ante sus incipientes resultados, en el año 2015 (un año antes de que venza el plazo fijado para el cumplimiento de la meta y con un guarismo que no superaba el 1%) se promulga la Ley 27.191, modificando y profundizando los objetivos nacionales de su antecesora.

La modificación legal estableció una serie de metas progresivas en el tiempo de inserción de las EERR en la matriz energética nacional, que se muestran en la Tabla 1. El renovado régimen de fomento diseñado se basa principalmente en: i) políticas de promoción e incentivos impositivos a la inversión en EERR; ii) disminución de barreras a la importación de tecnología de EERR con el compromiso de utilizar empleo y proveedores de materiales y equipos locales y; iii) contratos de compra de EERR a largo plazo y por parte del propio Estado Nacional.

Tabla 1. Metas de inserción de fuentes de EERR en la matriz energética nacional.

Inserción de EERR en la matriz energética	Fecha límite de cumplimiento
8%	31/12/2017
12%	31/12/2019
16%	31/12/2021
18%	31/12/2023
20%	31/12/2025

Fuente: elaboración propia

Para implementar el esquema de promoción la Ley crea un Fondo Fiduciario Público, denominado “Fondo para el Desarrollo de las Energías Renovables –FODER” que se financia, entre otros, a través del Estado Nacional, con un mínimo del 50% de los ahorros derivados de la sustitución de combustibles fósiles, estimados en alrededor de USD 41.000 millones para el año 2025. También se financiará de cargos específicos que pagarán los usuarios de las EERR y de ingresos varios obtenidos de participación en proyectos, emisión de valores que se emitan a ese fin y recupero de capital e intereses de financiaciones otorgadas.

La reglamentación de la Ley 27.191 establece, en una primera etapa, obligaciones especiales para Grandes Usuarios del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y Grandes Demandas de los distintos Distribuidores del país. Ambos tipos de usuarios deben cumplir con las metas de inserción de EERR indicadas en la Tabla 1, bajo la posibilidad de recibir penalizaciones o multas. La Ley establece que se deben proveer ellos mismos de EERR, ya sea por autogeneración, o un contrato comercial con un generador de EER o compras conjuntas realizadas por el propio Estado Nacional.

La determinación de los Grandes Usuarios alcanzados por la Ley es a partir de su potencia media mensual de energía eléctrica, la cual debe ser igual o superior a 300 kW. Si bien el resto de los usuarios no están obligados a cumplir con los objetivos, el costo asociado a la inserción de las EERR en la matriz energética nacional se irá trasladando de manera transparente en el costo de la energía eléctrica adquirida por todos los Distribuidores de energía.

Si bien el espíritu de la Ley pareciera ser claro y motivaría señales de corto plazo en las industrias alcanzadas, la escases de oferta de generación renovable de parte de inversionistas privados, por fuera de las licitaciones públicas realizadas recientemente por el Estado Nacional (RenovAr 1.0, RenovAr 1.5 y RenovAr 2.0), no permite indicar al momento ejemplos de proyectos de dimensiones considerables, enmarcados en el cumplimiento de esta Ley.

Es de esperar que en el transcurso del 2019 comiencen a materializarse algunos proyectos de autogeneración de parte de las grandes industrias alcanzadas por la Ley. No obstante, la alternativa de compra conjunta prevista en la reglamentación pareciera ser hoy la opción más favorable o, al menos, la mayoritariamente elegida por las empresas obligadas a cumplir las metas de inserción de EERR a sus procesos productivos.

2.2 Legislación Nacional. Ley 27.424 – Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública

El Estado Nacional promulga en Diciembre de 2017 la Ley 27.424, a través de la cual se crea un Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energías Renovables, complementando y potenciando con ello la regulación vigente. Esta nueva Ley fija políticas y condiciones jurídicas para la generación de energías a partir de fuentes renovables por parte de los usuarios, para su autoconsumo, con eventual inyección de excedentes a la red de distribución pública.

De acuerdo a esta Ley los distribuidores de energía deben facilitar las condiciones técnicas de interconexión e inyección, asegurando con ello el libre acceso o el acceso regulado, sin perjuicio de las facultades regulatorias de cada provincia. La reglamentación prevé el cumplimiento de requisitos técnicos de interconexión de parte

de los usuarios y establece el método de balance neto de energías o “net metering” para la compensación económica que recibirán los mismos, en caso de existir excedentes de energía volcados a la red pública.

En síntesis, la Ley promueve la generación distribuida de energía a partir de fuentes renovables y su interconexión a la red pública, facilitando las condiciones de conexión y estableciendo la compensación monetaria en caso de excedentes.

Por otro lado, se crea el “Fondo para la Generación Distribuida de Energías Renovables – FODIS” que tendrá por objetivo la provisión de préstamos, bonificaciones, subsidios e incentivos que faciliten y promuevan la inyección de energía a partir de fuentes renovables.

Por último, la Ley crea un Régimen de “Fomento para la Fabricación Nacional de Sistemas, Equipos e Insumos para Generación Distribuida a partir de fuentes renovables – FANSIGED”, con el fin de promover la investigación, diseño, desarrollo, inversión en bienes de capital, producción, certificación y servicios de instalación de generación distribuida de energía. Las beneficiarias de este régimen son las micros, pequeñas y medianas empresas nacionales que desarrollen como actividad principal alguna de las mencionadas precedentemente.

El aporte sustancial de la presente Ley es permitir y facilitar la interconexión de proyectos de generación de EERR de pequeña escala a la red pública de distribución (1 a 15 kW); prohibida hasta esa instancia por muchas jurisdicciones, salvo algunas pocas provincias como Santa Fe.

2.3 Legislación Provincial. Ley Provincial 12.503 y Decreto 1561/16 - Programa Provincial PROSUMIDORES

En paralelo con el desarrollo de la regulación en el ámbito nacional, la Provincia de Santa Fe ha promovido por más de 10 años el uso de fuentes de EERR, siendo la génesis de este proceso normativo la Ley Provincial 12.503 (promulgada en Diciembre de 2005). La norma declaró de interés provincial la generación de energía a través de fuentes renovables y promovió una serie de medidas para el fomento y desarrollo de las energías renovables en el ámbito provincial.

En Junio de 2016, a través del Decreto 1565, la Provincia de Santa Fe creó el programa PROSUMIDORES, siendo el primero y único en su tipo a nivel nacional. El citado programa contribuye a la incorporación de energías renovables a la red pública de distribución, en línea con los objetivos previstos por la Ley Provincial 12.503 y la Ley Nacional 27.191.

El programa tiene como objetivo incentivar la inyección a la red de energías a partir de fuentes renovables de pequeña escala por parte de usuarios de la Empresa Provincial de la Energía Eléctrica de Santa Fe (EPESF) y las Cooperativas Eléctricas o Redistribuidores, bajo condiciones técnicas y administrativas específicas. Facilita además el repago de la inversión en generación de energías renovables, a través de una compensación monetaria que permite la amortización acelerada de estos equipos por parte de los usuarios que adhieran al plan. La compensación especial se efectúa en función de la energía generada e inyectada a la red durante un período de 8 años, momento a partir del cual se continúa reconociendo el costo de la energía generada pero al precio estacional que la EPESF paga en el MEM. Los beneficiarios del programa son

todos los usuarios considerados pequeñas demandas residenciales, industriales y comerciales, que registren potencias eléctricas menores a 50 kW. El programa establece un límite de potencia del conjunto inversor-generador de 1,5 kWp y una cantidad máxima anual de energía renovable generada de 2.496 kWh, pasible de ser bonificada. Quedan exceptuados de la adhesión al programa todos aquellos usuarios que ya sean beneficiarios de otra promoción y/o tarifa y todos los usuarios que hayan recibido los equipos de energías renovables a partir de un subsidio o aporte por parte del gobierno nacional, provincial o Municipal. El método de compensación, a diferencia de lo establecido en la Ley Nacional 27.424, es por medio del balance neto de facturación o “net billing”, es decir, se netea o se realiza un balance del precio de la energía consumida con el precio de la energía inyectada a la red, a diferencia del neteo de energía sin valorizar que realiza el método “net metering”. En caso que el beneficiario o PROSUMIDOR cuente con un saldo a favor del balance de la energía valorizada, el saldo monetario a su favor se le es reintegrado en efectivo, a través de un cheque o valor a cobrar.

Desde el lanzamiento del programa se han autorizado 142 proyectos de un límite de 200 impuesto por la propia Provincia y en un plazo de 2 años que acaba de concluir. Lo que implica una potencia instalada total de 213 kW. Este resultado permite inferir que si bien existe un interés creciente en la sociedad por adoptar estas tecnologías, no se ha logrado superar las expectativas trazadas por el programa.

Otras provincias que cuentan con legislación vigente relacionada con el fomento de las EERR son: i) Salta a través de las Leyes 7824/2014 y 7823/2014 de fomento de la generación distribuida de EERR y de investigación, desarrollo y uso de EERR, respectivamente; ii) Mendoza con la Resolución 019/2015 del Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE) que estableció las condiciones técnicas para la interconexión de la generación distribuida de EERR; y iii) Chubut que con la Ley XVII N° 107/2013 estableció un programa para el reconocimiento de la EERR volcadas a la red pública por parte de la generación distribuida (Guido & Carrizo, 2016).

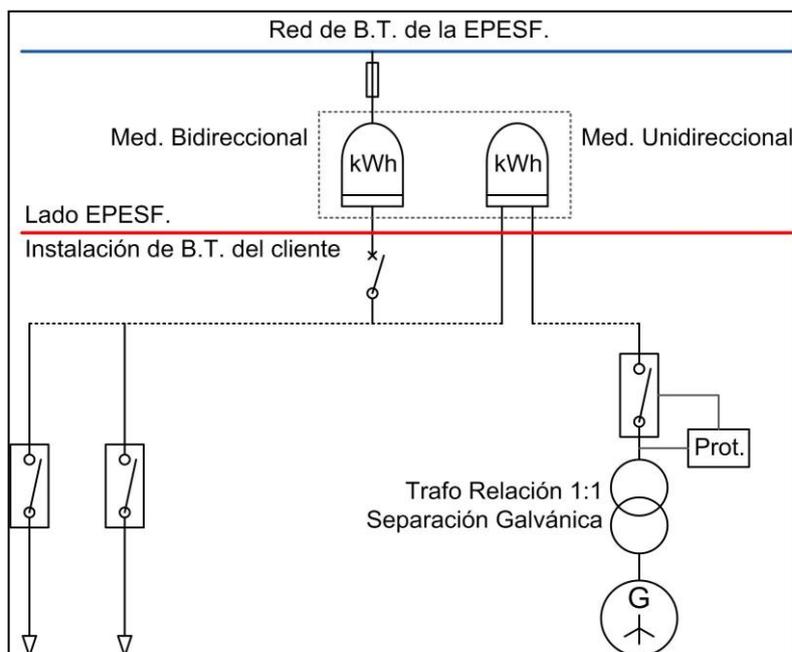
2.4 Normativa Provincial. Procedimiento Técnico de Interconexión de Generación de Energía a Partir de Fuentes Renovables – EPESF

Los usuarios (residenciales, comercios e industrias) que deseen adherirse al Programa PROSUMIDORES deberán cumplir con los requisitos técnicos-administrativos previsto en el “Procedimiento para el Tratamiento de Solicitudes de Generación en Isla o en Paralelo con la Red de la EPESF – PRO-103-101”. El procedimiento establece los requisitos y la documentación que deben presentar los interesados en acceder al programa y las condiciones de seguridad eléctrica exigidas para el equipo inversor-generador (protección de sobrecorriente, sobretensión, subtensión, frecuencia y protección anti-isla). Las exigencias técnicas exigidas al grupo inversor-generador deberán ser aseguradas mediante protocolos de ensayos realizados en laboratorios oficiales y en cumplimiento de las Normas Internacionales correspondientes.

El método de compensación “net billing” prevé el montaje de 2 medidores de energía, uno bidireccional que registrará la energía que se intercambie entre la red pública y el PROSUMIDOR y un medidor unidireccional que registrará la totalidad de la energía renovable generada. La combinación de ambas mediciones y los respectivos

valores de las energías asociadas, permiten realizar el balance de facturación, a través del cual se le reconoce al PROSUMIDOR la compensación monetaria de la energía renovable generada, indistintamente que sea inyectada a la red o la haya autoconsumido en su totalidad. En la Figura 1 se muestra un diagrama unifilar con los elementos de protección y medición establecidos por el PRO-103-101.

Figura 1. Diagrama unifilar de interconexión de un PROSUMIDOR



Fuente: elaboración propia

3. Diseño de una Planta de Generación de Energía Fotovoltaica

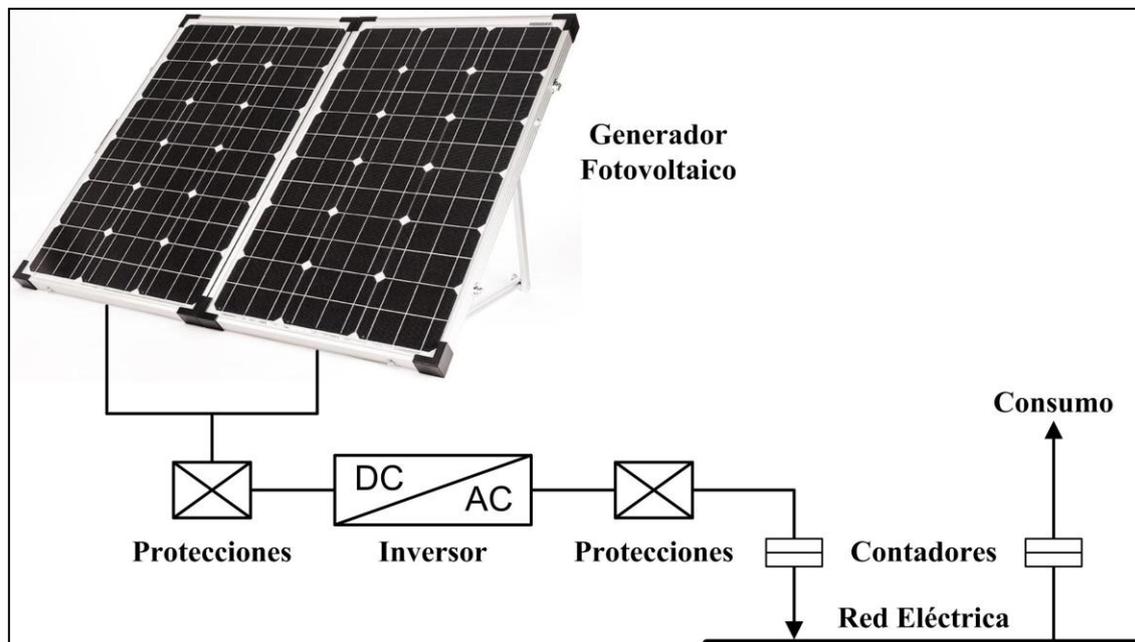
En el contexto regulatorio descripto, el presente trabajo detalla el cálculo y diseño de una planta de generación fotovoltaica (FV) a instalar en la Universidad Nacional de Rafaela, Provincia de Santa Fe.

En base a lo indicado en la sección 2 del presente, donde se deduce una incipiente penetración de las de EERR y una cantidad de proyectos que no cumplen con las expectativas de las políticas implementadas, es objetivo encuadrar el presente trabajo tanto en el marco de la Ley 27.191, como en el programa “PROSUMIDORES”. Pese a que el nivel de consumo de la universidad no la obliga a tener parte de su energía proveniente de fuentes renovables; se tomó ésta decisión para mostrar el compromiso institucional e impulsar la difusión de políticas públicas que fomenten el desarrollo de las EERR. Además, la ejecución del proyecto servirá como plataforma experimental para asesorar a las PyMEs e instituciones de la región que proyecten instalaciones con características técnicas similares.

La tecnología adoptada es una instalación FV que consiste en un conjunto de elementos capaces de transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica. La corriente continua que producen las celdas FV se convertirá mediante un inversor en corriente alterna y, tras haber sido transformada en valores adecuados de tensión, podrá

ser vertida finalmente a la red. En la Figura 2 se muestra, a efecto ilustrativo, un esquema de los componentes básicos de un grupo inversor-generador FV.

Figura 2. Esquema típico de una instalación fotovoltaica



Fuente: elaboración propia

El principio de funcionamiento de una celda fotovoltaica consiste en recibir la energía que proviene del sol en forma de radiación y convertirla en energía eléctrica apta para su utilización residencial, comercial y/o industrial. La elección de este tipo de fuente de EERR responde al fácil acceso a la tecnología en el mercado nacional, su bajo costo de inversión respecto de otras tecnologías, su diseño simple frente a otras fuentes renovables, su baja o nula necesidad de mantenimiento y operación y, principalmente, por la mayor disponibilidad del recurso solar en nuestra región respecto a otras zonas de la Argentina.

3.1 Estimación del Consumos de Energía Eléctrica de la Universidad

La Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) se creó en diciembre de 2014 y comenzó oficialmente sus actividades administrativas en 2015. En 2016 se dio comienzo a las actividades académicas en tres carreras y en 2017 se iniciaron otras tres carreras nuevas. El plan académico-institucional de la UNRaf prevé para 2018 y 2019 abrir dos nuevas carreras (una por año), lo cual implica un crecimiento en el consumo esperado de la energía eléctrica.

El consumo de energía registrado durante el período 2014-2017 está fuertemente relacionado con el número total de actividades en el edificio académico. No obstante, el escenario futuro en una institución académica en pleno crecimiento es incierto con respecto al número total de estudiantes y la energía eléctrica demandada, dado que se deben plantear muchas hipótesis acerca del nivel de aceptación de la oferta académica,

ligada a un correcto diagnóstico sobre las necesidades de formación profesional existentes en la comunidad. A pesar de esta incertidumbre, la estimación se realiza teniendo en cuenta el total de actividades académicas planificadas para este período y en base al historial de datos reales de la energía consumida (información obtenida de la empresa de distribución de energía - EPESF). En Tabla 2 se muestra la estimación de consumos de energía eléctrica para los años 2018 y 2019, necesarios para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Tabla 2. Consumos de energía eléctrica reales y previstos para el 2018-2019

Año	Cursos de Idioma	Oficinas de Administrac.	Carreras en Actividad	Total de Actividades	Energía (kWh)
2014	4	1	-	5	3873
2015	4	2	-	6	6130
2016	4	2	3	9	9310
2017	4	2	6	12	19972
2018	4	2	7	13	30670
2019	4	2	8	14	42391

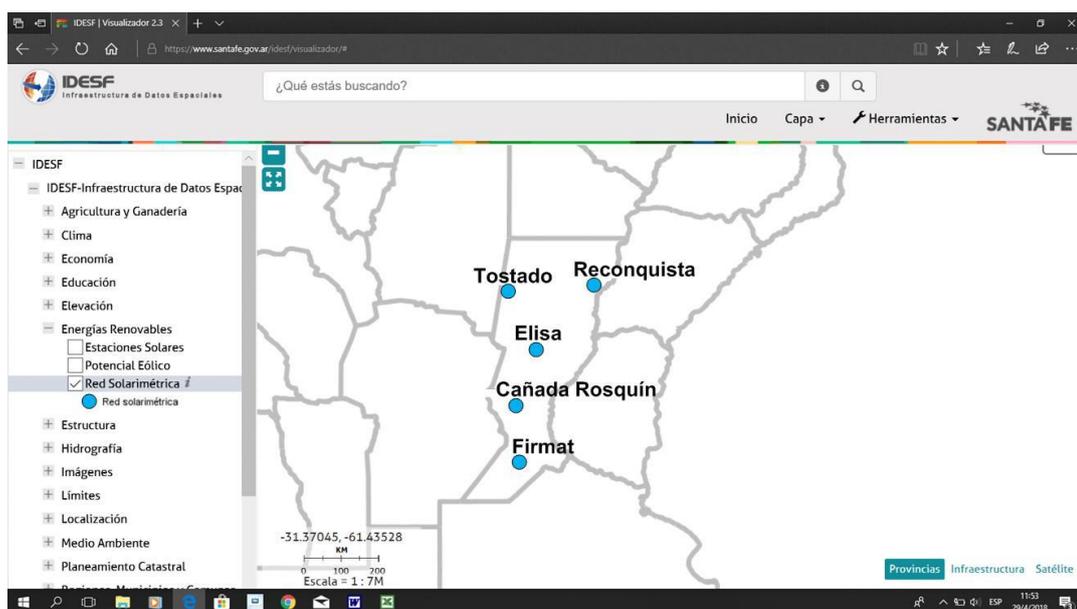
Fuente: elaboración propia

3.2 Estimación del Recurso Solar en Rafaela

Existen varios métodos en la literatura actual para estimar la capacidad solar de un sistema fotovoltaico (Ebe, Idlbi, Morris, Heilscher, & Meier, 2017; Zhang, Chen, Huang, & Zhang, 2017; Scolari, Sossan, & Paolone, 2018). Dada la falta de mediciones reales de la irradiación solar en la ciudad de Rafaela, la potencial energía total que se puede producir con una planta FV por kW instalado la calcularemos indirectamente, a través de la información obtenida de mediciones reales de las ciudades vecinas de Elisa y Cañada Rosquín, de la Provincia de Santa Fe (GENOC, IFIS CONICET-UNL & FIQ UNL, 2018).

Las mediciones reales de irradiación solar son obtenidas de la Red Solarimétrica que ha materializado la Provincia de Santa Fe en el año 2015 y de acceso on line a través de la plataforma IDESF (Infraestructura de Datos Espaciales de Santa Fe), de la que se puede obtener la medición real del recurso solar en 5 puntos ubicados en las localidades de Tostado, Reconquista, Elisa, Cañada Rosquin y Firmat (ver Figura 3).

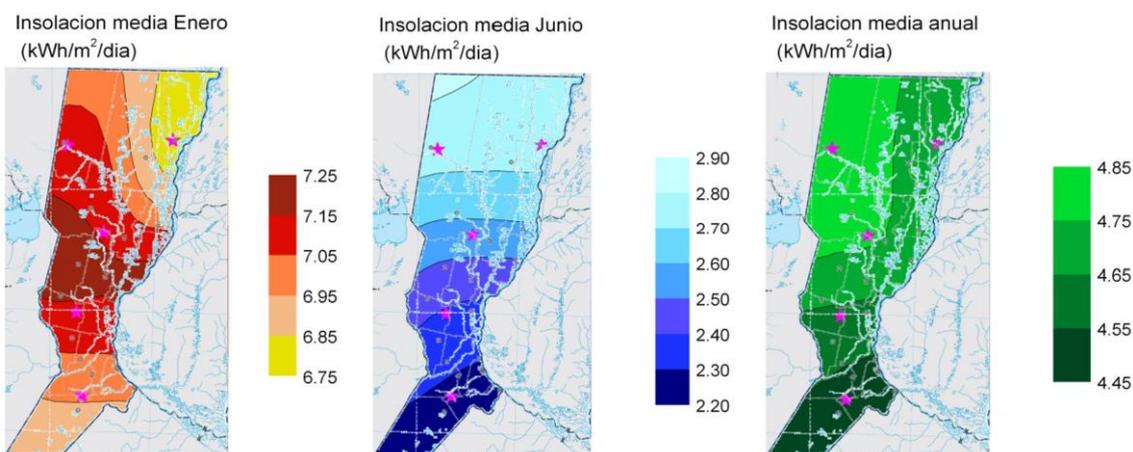
Figura 3. Visualización geográfica de los 5 puntos de medición de la Red Solarimétrica.



Fuente: IDESF

A fin de visualizar gráficamente la variación mensual de la insolación solar en sus extremos (verano-invierno) y la media, se muestran a continuación los mapas de la Provincia de Santa Fe con curvas de insolación solar para los meses característicos citados y la media anual obtenida de las mediciones reales de la Red Solarimétrica.

Figura 4. Curvas de insolación para los meses de enero y junio y media anual



Fuente: elaboración propia

Dado que la ciudad de Rafaela (Lat: 31°15'S - Long: 61°21'O) se encuentra aproximadamente equidistante entre las latitudes de las localidades de Elisa (Lat: 30°40'S - Long: 61°30'O) y Cañada Rosquín (Lat: 32°20'S - Long: 61°36'O), adoptaremos como parámetros de irradiación solar media anual por día en el plano horizontal H [kWh/m²], el promedio entre los valores medidos en ambas localidades, desde Enero de 2015 a Diciembre de 2017, ver Tabla 3.

Tabla 3. Irradiación solar media anual por día en el plano horizontal

Mes	H Elisa [kWh/m2]	H C.Rosquin [kWh/m2]	H Raf [kWh/m2]
Ene	7,14	7,10	7,12
Feb	5,68	5,74	5,71
Mar	5,13	5,11	5,12
Abr	3,72	3,35	3,54
May	2,73	2,68	2,71
Jun	2,55	2,34	2,45
Jul	2,79	2,31	2,55
Ago	3,67	3,38	3,53
Sep	4,82	4,48	4,65
Oct	5,44	5,20	5,32
Nov	7,11	6,64	6,88
Dic	7,03	6,99	7,01
Irradiación total anual	1,757	1,682	1,720

Fuente: elaboración propia

A fin de corregir la irradiación solar sobre el plano receptor de las celdas FV y en función del ángulo de inclinación óptimo adoptado de 31°, igual a la latitud geográfica de la ciudad de Rafaela (Grossi Gallegos & Righini, 2012), se obtuvieron los factores de corrección para cada mes, a partir de curvas aproximadas extrapoladas de la herramienta de cálculo PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System, 2018):

$$H_{Raf, opt} = H_{Raf} \cdot FC \quad (1)$$

Tabla 4. Irradiación solar media anual por día en el plano receptor

Mes	H Raf [kWh/m2]	Factor Corrección	H Raf opt [kWh/m2]
Ene	7,12	0,92	6,55
Feb	5,71	1,00	5,71
Mar	5,12	1,10	5,63
Abr	3,54	1,24	4,38
May	2,71	1,38	3,73
Jun	2,45	1,45	3,55
Jul	2,55	1,42	3,62
Ago	3,53	1,30	4,58
Sep	4,65	1,17	5,44
Oct	5,32	1,04	5,53
Nov	6,88	0,95	6,53
Dic	7,01	0,90	6,31
Irradiación total anual	1,720	--	1,872

Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en el totalizador de la Tabla 4, al inclinar el plano receptor un ángulo óptimo respecto del plano horizontal se logra maximizar la generación anual de energía fotovoltaica alcanzando los 1,872 [kWh/m²] que implica un aumento del 8,84%.

3.3 Estimación de la producción de energía eléctrica de una planta FV

Habiendo estimado el recurso solar en la ciudad de Rafaela, estamos en condiciones de simular la producción de energía eléctrica de una planta FV tipo, por kW de potencia instalado. A continuación se indican los parámetros de simulación adoptados, tanto de los de los paneles FV como los del inversor, tomando de referencia valores indicados por distintos fabricantes.

Parámetros de simulación:

- Inclinación óptima del plano receptor o paneles FV: 31°
- Orientación de los paneles FV o acimut: 0° (orientación norte)
- Potencia nominal del panel FV Policristalino (P_{nom}): 300 Wp
- Área del panel FV (A): 2 m²
- Eficiencia de conversión del panel FV (η_{FV}): 15%
- Rendimiento Global del conjunto generador-inversor (η_G): 80%

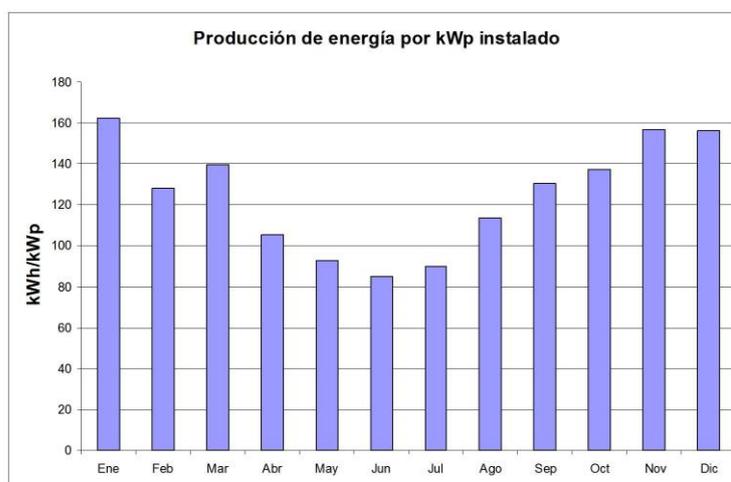
El rendimiento global η_G adoptado no considera la eficiencia de conversión de los paneles FV (η_{FV}) y responde a todos los factores de pérdidas del generador FV en su conjunto: pérdidas por temperatura [°C] en los paneles FV, pérdidas por sombras, mismatching o acoplamiento entre módulos no óptimo, pérdidas en el circuito de corriente continua, error de acoplamiento del controlador del punto de máxima potencia o MPPT -Maximum Power Point Tracker-, pérdidas por suciedad-polvo, pérdidas del inversor y pérdidas en el circuito de corriente alterna. El valor 80% de η_G responde a datos sugeridos por la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA, 2018) de amplia experiencia en la operación y desarrollo de esta tecnología.

La energía mensual producida por kW de potencia instalado (EPkW_j) resulta ser:

$$EPkW_j = \left(H_{Ref, opt} \cdot A \cdot \frac{h_{FV}}{P_{nom}} \right) \cdot h_G \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (2)$$

Donde el índice j representa cada uno de los meses del año. Finalmente la Figura 5 muestra la estimación de la energía producida por kW de potencia instalado y para cada mes en particular. El total anual es EPkW = 1.497 [kWh/kWp].

Figura 5. Estimación mensual de energía producida por kW instalado



Fuente: elaboración propia

3.4 Dimensionamiento de la planta FV

Con los resultados de la producción de energía por kW instalado (EPkW) se procede al dimensionamiento de la planta FV, en función del cumplimiento de las metas de la Ley 27.191. Dado que nos encontramos dentro del plazo para el cumplimiento del primer escalón del 8%, se propone en esta instancia dimensionar la planta FV para el segundo escalón objetivo de inserción de EERR del 12%. La potencia de diseño de la planta FV (PFV) resultará entonces del siguiente cálculo:

$$P_{FV} = \frac{E_{2019} [kWh] \cdot T [\%]}{EPkW \left[\frac{kWh}{kWp} \right]} \quad (3)$$

Donde E_{2019} es la estimación de la energía consumida por UNRaf en el año 2019 (42.391 kWh), T es el % objetivo de la Ley 27.191 que se propone cumplir (12%) y EPkW es la energía producida por la planta FV por kW instalado (1.497 kWh/kWp).

En función de los valores propuestos surge una potencia de diseño de 3,4 kWp del conjunto generador-inversor. Dado que la potencia disponible de los inversores del mercado varía de 3,6 kWp a 4 kWp, se adopta la potencia del inversor de 3,6 kWp (Marca GROWATT, modelo 3600 MTL-S-MPPT, de origen chino). Respecto de los paneles se propone un arreglo conformado por 12 módulos (Marca ENERMEL, modelo BSM300P-72, de origen chino), de las siguientes características:

- Tipo de tecnología: policristalino
- Potencia pico del módulo: 300 Wp
- Eficiencia del módulo: 17%
- Garantía de potencia: 10 años al 90% y 25 años al 80%

Cabe mencionar que la potencia de diseño de la planta FV, que permite cumplir con la Ley 27.191, excluye a la instalación del programa provincial “PROSUMIDORES”, que tiene un límite de 1,5 kWp. Por tal motivo y atendiendo la finalidad académica del proyecto se gestionó ante la Secretaria de Energía Provincial un permiso excepcional para acceder a dicho programa. En virtud de ello, y ante el reconocimiento actual de \$

5,5 por cada kWh generado por la planta FV, es esperable recuperar la inversión de aproximadamente \$212.000 en un plazo de 6/8 años. La presente experiencia servirá justamente para dar mayor precisión sobre el plazo de repago y sobre los aspectos técnicos referidos al mantenimiento y operación de este tipo de tecnología.

4. Estudio de Localización

Luego de dimensionar y definir los componentes que conformarán la planta fotovoltaica se debe realizar un estudio para determinar el lugar del emplazamiento. Para llevar adelante dicho estudio se emplean herramientas de simulación que necesitan una serie de hipótesis, consideraciones y criterios que se exponen a lo largo de esta sección.

Para materializar los primeros estudios se tomaron en consideración los siguientes criterios:

- Minimizar las pérdidas por sombra.
- Hacer visible la instalación desde la vía pública.
- Facilitar el acceso para futuras actividades didácticas.
- Acceso cercano a la instalación eléctrica.

Teniendo en cuenta estos criterios se realizaron distintas mediciones en la superficie de la nave superior de la universidad para construir un modelo utilizando el software específico Sketchup (Sketchup, 2018) como apoyo de decisión preliminar sobre el lugar del emplazamiento (Garzón, Mendoca, & Manson, 2012). Como primer análisis resulta interesante observar que el norte del plano urbano no coincide con el norte solar. Para nuestros cálculos debemos considerar el norte solar, indicado en la Figura 6 con una línea normal al módulo fotovoltaico. La Figura 6 también muestra que la UNRaf se encuentra hacia el oeste desde el centro de urbano de la ciudad.

Fig. 6.a. Ubicación de la UNRaf



Fig. 6.b. Vista en planta modelo SketchUp



Posteriormente se localizaron los principales obstáculos que afectan a la superficie (ver Figura 7.a), en términos de sus coordenadas de posición azimuth (ángulo de desviación con respecto a la dirección norte) y elevación (ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal) y se representó el perfil de obstáculos en el diagrama que muestra la banda de trayectorias del sol a lo largo de todo el año. Dichas bandas se encuentran divididas en porciones delimitadas por las horas solares (negativas antes del mediodía solar y positivas luego del mismo, ver Figura 7.b).

Fig. 7.a. Proyección de posibles sombras

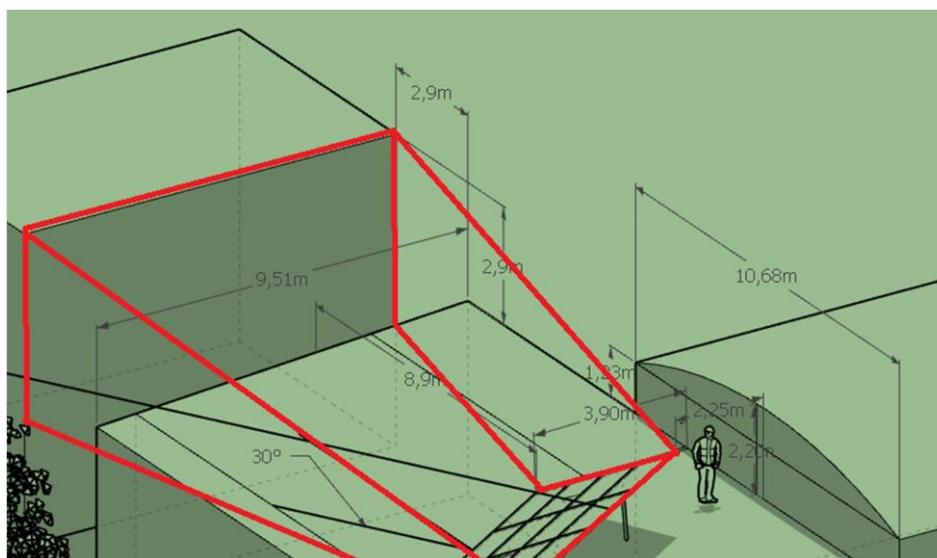
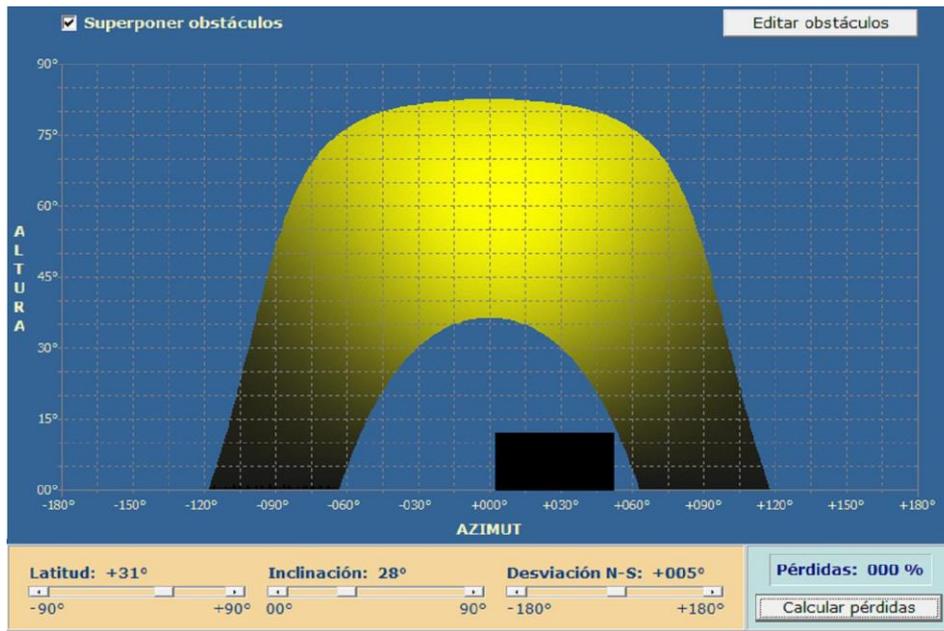


Fig. 7.b. Simulación perfil de obstáculos



Luego se simuló mediante el software Censol 5.0 (Censolar, 2016) las pérdidas en la irradiación solar global que incide sobre la superficie a lo largo de todo el año por sombreado, ver Figura 7.b. Cabe mencionar que en la nave superior del edificio (independientemente de la ubicación) el horizonte solar se encuentra efectivamente a los 15°. A partir de la simulación se puede corroborar que en esta ubicación no habrá pérdidas significativas por sombreado.

Por último destacamos que en el emplazamiento propuesto la instalación se encuentra próxima al punto de interconexión con la empresa distribuidora y mediante algunas adecuaciones estructurales y de seguridad resultará adecuado para un futuro circuito didáctico para los estudiantes y visitantes de la universidad, ver Figura 8.

Fig. 8.a. Simulada mediante Sketchup

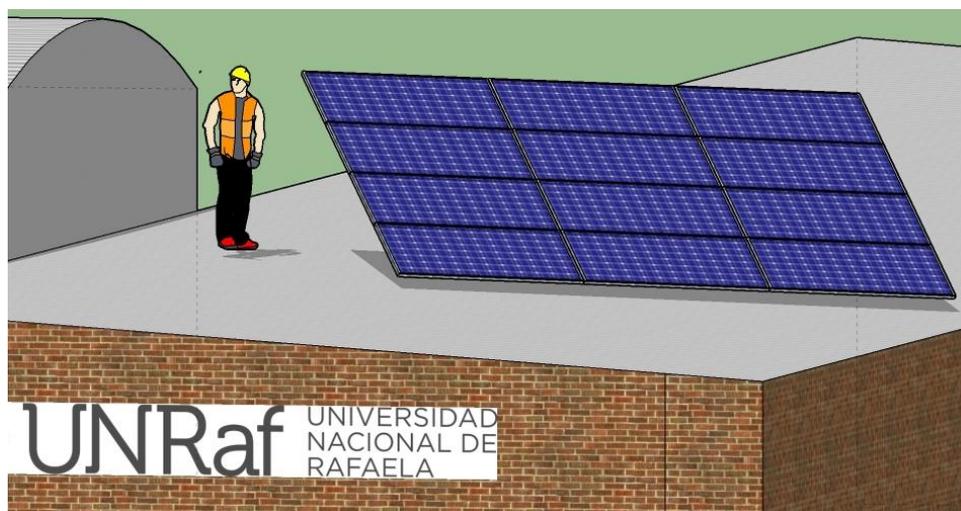


Fig. 8.b. Instalación real



En base a los resultados obtenidos en este análisis, concluimos que el emplazamiento seleccionado resulta adecuado para el cumplimiento de los requisitos planteados.

5. Conclusiones

El presente trabajo propone el dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red pública de distribución de energía e instalado en el edificio académico de la Universidad Nacional de Rafaela (provincia de Santa Fe, región central de la Argentina). En primer lugar, se analiza la legislación y los programas nacionales y provinciales de promoción en vigencia, centrándose en las condiciones y los objetivos relacionados con las energías renovables en general y con los sistemas FV en particular. Aunque la universidad que administra el edificio académico en estudio aún no está obligada a cumplir con dichos objetivos de energía renovable (Ley 27.191), se tomaron como base para los cálculos, teniendo en cuenta también las necesidades energéticas proyectadas del edificio para el período 2018-2019 y el cumplimiento de los requisitos del programa provincial PROSUMIDORES.

Los parámetros generales de diseño se basan en datos técnicos de los componentes comerciales disponibles a nivel local. Además, los cálculos de dimensionamiento utilizan los registros provinciales de irradiación solar, que por métodos indirectos fueron utilizados para estimar la generación anual de energía fotovoltaica en Rafaela.

La experiencia derivada del proyecto contribuirá en dos aspectos: por un lado, sirve como una plataforma experimental para estudiantes e investigadores involucrados en actividades de ingeniería y de corte tecnológico; y, por otro lado, servirá como un antecedente regional de utilización de energías renovables para la vinculación de la universidad con el sector comercial, industrial y de servicios afines.

Atentos al compromiso de la institución con el medio ambiente y con el desarrollo local, la experiencia obtenida se utilizará para asesorar a instituciones y PyMEs

regionales que proyecten instalaciones de energías renovables y/o pretendan realizar desarrollos tecnológicos relacionados con la temática. Cabe destacar que el estudio de producción de energía por kWp instalado servirá de base para cualquier otro proyecto relacionado con energía fotovoltaica que se implemente en Rafaela y la región. Además, los lineamientos planteados en este trabajo para resolver el emplazamiento y para calcular la demanda anual de energía pueden ser adaptados para replicarse en futuros proyectos con sus particularidades.

A partir de los datos reales de generación, los trabajos futuros se orientarán a validar las hipótesis planteadas para realizar los cálculos presentados. Asimismo se pretende instalar medidores de consumo energético en la instalación interna del edificio para tener mayor información acerca de la demanda de energía eléctrica y la caracterización de uso.

Asimismo, la implementación de este proyecto dentro del programa PROSUMIDORES servirá como modelo de difusión, no solo dentro de instituciones educativas, sino en cualquier tipo de ámbito comercial, industrial y domiciliario; priorizando desde el espacio académico y de vinculación con el medio la transferencia y el acercamiento de la tecnología a la sociedad y la promoción de la inserción de las EERR en el uso cotidiano.

Referencias Bibliográficas

- Bermejo, R. (2013). Ciudades postcarbono y transición energética. *Revista de Economía Crítica*, 16.
- Berrueto, J. A., & Jiménez, J. D. (2017). Situación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Resumen de las Cumbres de París, COP21 y de Marrakech, COP22. *Revista de Salud Ambiental*, 17 (1), 34-39.
- CADER. (2016). *Informe "Anuario 2016", documento de análisis del mercado de las energías renovables*. Cámara Argentina de Energías Renovables.
- Carrizo, S., Berdolini, J., Montecelli, F., & Marino, D. (2015). El abanico de energías renovables en Argentina. Proyectos y perspectivas. *Mimeo*.
- Censolar. (2016). Obtenido de <http://www.censolar.org/censol50.htm>
- Dinçer, F. (2011). The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1), 713-720.
- Ebe, F., Idlbi, B., Morris, J., Heilscher, G., & Meier, F. (2017). Evaluation of PV hosting capacities of distribution grids with utilisation of solar roof potential analyses. *CIREN - Open Access Proceedings Journal* (1), 2265-2269.
- EPIA. (2018). *European Photovoltaic Industry Association - Intelligent Energy Europe - European Commission*. Obtenido de <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/partners/epia>
- Gabler, H., Heidler, K., & Hoffmann, V. (1997). Market introduction of grid-connected photovoltaic installations in Germany. *XIV Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica*. Barcelona, España.
- Garzón, B., Mendoca, C., & Manson, J. (2012). Modelos de simulación para el análisis y evaluación de asoleamiento como apoyo para la toma de decisiones durante la etapa de diseño. *AVANCES EN ENERGIAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE*.

- GENOC, IFIS CONICET-UNL & FIQ-UNL. (2018). *Datos Obtenidos de la Red Solarimétrica de la Provincia de Santa Fe*. Informe Técnico de Avance, Santa Fe.
- Gil, S., & Carrizo, S. (2016). Los senderos de las transiciones. *Petrotecnia* , 32-47.
- Gómez-Expósito, A. (2018). City-Friendly Smart Network Technologies and Infrastructures: The Spanish Experience. *Proceedings of the IEEE 2018* (99), 1-35.
- Grossi Gallegos, H., & Righini, R. (2012). Ángulo Óptimo para planos colectores de Energía Solar integrados a Edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*, (págs. 04.01-04.07).
- Guido, L. M., & Carrizo, S. C. (2016). Innovaciones tecnológicas en “redes eléctricas inteligentes”: políticas públicas y experiencias locales en Argentina. *L'Ordinaire des Amériques* , 221.
- International Energy Agency. (2017). *Renewables 2017. Analysis and Forecasts to 2022*. IEA Publications.
- Meier, C., Schaffner, C., & Blum, W. (1997). 1996 Photovoltaic energy statistics of Switzerland. Overall yield, quality assurance and Results of monitoring. *XIV Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica*. Barcelona, España.
- Photovoltaic Geographical Information System. (2018). *PVGIS photovoltaic software: free tool to assess the PV output power in europe, africa and asia for electrical stand alone or connected to the grid systems*. Obtenido de <http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>
- Rafique, S. F., & Jianhua, Z. (2018). Energy management system, generation and demand predictors: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution* , 12 (3), 519-530.
- Risso, G., Battioni, M., Cutrera, M., Bleger, D., & Schmidt, J. (2015). Solar Resource Assessment in the Province of Santa Fe for Energy Generation. *Proceedings of the XXXVIII Argentinian Association on Renewable Energy and Environment Working Meeting, 3*, págs. 04.85-04.91. San Rafael, Argentina.
- Scolari, E., Sossan, F., & Paolone, M. (2018). Photovoltaic-Model-Based Solar Irradiance Estimators: Performance Comparison and Application to Maximum Power Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* , 9 (1), 35-44.
- Sketchup. (2018). Obtenido de <https://www.sketchup.com/es>
- Solar Power Europe. (2017). *Global market outlook for solar power 2017–2021*. Bruxelles, Belgium: Solar Power Europe.
- Strong, S., & Wills, R. (1992). Building integration of photovoltaics in the United States. *XI Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica*. Montreaux, Suiza.
- Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. A. (2010). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Journal of Solar Energy* , 81 (10), 1295-1305.

- Wilk, H. (1997). Grid interconnection of photovoltaic systems in Austria. *Seminario PV grid-interconnection, Task V de la Agencia Internacional de la Energía*. Zurich, Suiza.
- Zhang, Z., Chen, Y., Huang, S., & Zhang, X. (July de 2017). Credible capacity evaluation of a PV plant with energy storages governed by MDP control strategy. *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting* , 1-5.