

DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED PARA EDIFICIO UNIVERSITARIO

Caceres, Diego Daniel, UTN - FRRe, diego_tec2012@hotmail.com

Sarquis, Belén de los Milagros, UTN - FRRe, belensarquis_388@hotmail.com

Zurlo, Hugo Daniel, UTN - FRRe, hzurlo@gmail.com

Figueredo, Gustavo Raúl, UTN - FRRe, grfigueredo@gmail.com

Resumen- Se presenta el análisis del consumo eléctrico y el posterior diseño y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) de distribución eléctrica para el edificio central de la Facultad Regional Resistencia de la Universidad Tecnológica Nacional. Se analizan los datos de tensión, corriente eléctrica, potencia y energía trifásica, así como el factor de potencia y armónicos del sistema eléctrico de la Facultad, obtenidos mediante un analizador de redes, para tres periodos de medición: el primero de 7 días, del 08 al 14 de mayo del 2017; el segundo de 9 días, del 09 al 17 de septiembre del 2017 y el tercero de 100 días, del 28 de diciembre del 2017 al 8 de abril del 2018. Se examina la relación entre el consumo energético del establecimiento y los parámetros como la temperatura ambiente y el factor de ocupación del edificio. Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se consideran: la superficie de cubierta orientada al Noroeste (630 m^2), la radiación solar disponible y la curva de demanda energética horaria del edificio. Se efectúa la simulación del comportamiento del sistema propuesto con ayuda del software PVSyst.

Palabras claves- autogeneración, energía solar, sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

1. Introducción

El aumento constante del consumo de energías provenientes de combustibles fósiles y la finitud de las reservas de estos serían razones suficientes para buscar con gran interés fuentes energéticas renovables. A ello se debe añadir la polarización existente entre zonas productoras y consumidoras. Los países consumidores, de gran desarrollo económico y alto consumo de petróleo, no son productores y sus economías resultan dependientes y muy sensibles a cualquier crisis en la producción. Además de estas razones, posiblemente la más importante en la actualidad, para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energías renovables, sea el impacto ambiental que produce la combustión de aquellos, ocasionado por las emisiones de óxido de carbono, azufre y de nitrógeno. El CO_2 es causante del efecto invernadero, ya que absorbe la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, lo que produce un recalentamiento de la atmósfera. Los óxidos de azufre y nitrógeno, al combinarse con el agua de la atmósfera, dan lugar respectivamente a los ácidos sulfúricos y nítricos, que caen arrastrados por la lluvia y dan lugar a la lluvia ácida. [1]

Energía renovable, verde, limpia, sustentable o ecológica. Todas estas palabras se pueden utilizar para referirse a aquellas energías que protegen el medio ambiente al no emitir gases contaminantes. Año a año, miles de millones de toneladas de dióxido de carbono llegan a la atmósfera aumentando la temperatura de la tierra. El calentamiento global es un hecho y los continuos desastres naturales son un fiel reflejo de que el mundo está diciendo basta. Y la mejor manera de combatir esta realidad es con un cambio en la matriz energética, que busque

abandonar paulatinamente el uso del gas y el petróleo como principal generador de energía, y construya el camino hacia las energías sustentables. [2]

A nivel mundial la demanda global de energía renovable continúa creciendo, habiendo llegado en 2015 a satisfacer el 19,3% del consumo total de energía, correspondiendo 9,1% a la biomasa tradicional, 4,2% a tecnologías modernas para la obtención de calor (biomasa, geotermia, solar térmica), 3,6% a energía hidroeléctrica, 1,6% a energía eléctrica provista por fuentes renovables (eólica, solar fotovoltaica, biomasa y geotermia), y finalmente, 0,8% correspondiente a la utilización de biocombustibles en el transporte. Del restante, 78,4% se satisface mediante combustibles fósiles y 2,3% a través de la generación eléctrica de origen nuclear. Respecto a su participación en la matriz eléctrica, a fin de 2016, la potencia eléctrica total de origen renovable instalada en el mundo alcanzó los 2017 GW, un 9% más que en 2015, correspondiendo 1096 GW a la hidroelectricidad, con un crecimiento del 2,3% con respecto a 2015, y 921 GW al resto de las fuentes renovables, con un crecimiento del 17,3% respecto del mismo año. En este marco, la energía eólica y la solar fotovoltaica aportaron el 95% de la nueva capacidad de origen renovable no hidráulica instalada en 2016. En este contexto, solar FV representó el 47% de la nueva capacidad instalada, mientras que eólica y la hidroeléctrica dieron cuenta de la mayor parte del restante con una contribución del 34% y 15,6% respectivamente. Cabe destacar asimismo que el crecimiento interanual de la potencia instalada de solar FV fue del 32,9%, en tanto que el correspondiente a eólica fue del 12,5%. En términos generales, las energías renovables aportaron alrededor del 62% de la nueva potencia eléctrica instalada en 2016, entregando un total del 24,5% de la electricidad a nivel global, de los cuales 16,6% corresponde a hidroelectricidad. [3]

La matriz eléctrica argentina, es fuertemente dependiente de los combustibles fósiles (65,44%), seguido por la producción hidroeléctrica (27,53%) y en menor medida la nuclear (5,56%). Se observa que la energía eólica y la energía solar fotovoltaica han tenido un aporte mínimo ya que sumadas alcanzaron apenas el 0,41% de la matriz en 2017. [3]

Las numerosas ventajas de las energías renovables, entre las que cabe destacar el aumento de la seguridad energética, la disminución de costos de generación, el ahorro de divisas, el desarrollo de industria nacional, la generación de empleo y la mitigación del cambio climático, muestran claramente la necesidad de definir políticas de estado que impulsen el desarrollo y la utilización en la Argentina de este tipo de fuentes. Las condiciones están dadas para dar un salto en esta dirección, que excede el tema energético por sus implicancias en el cuidado del medio ambiente y en el desarrollo económico y social del país. [3]

En este contexto la implementación de sistemas fotovoltaicos adquiere una relevancia crucial para solucionar el problema. El propósito de este trabajo es realizar el diseño de un sistema generador fotovoltaico conectado a la red de distribución eléctrica, el cual nos permitirá compensar una parte de la demanda energética de la Facultad Regional Resistencia (FRRe) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

2. Materiales y Métodos

2.1 Proceso de medición

Para poder identificar y elaborar el perfil de consumo característico del establecimiento se utilizó un analizador de redes como instrumento de medición el cual cuenta con 3 pinzas amperométricas, 4 bornes de toma aislados y 4 líneas de comprobación de seguridad (Figura 1). El proceso de medición se llevó a cabo en el tablero principal de distribución eléctrica del edificio central en tres periodos diferentes, el primero de 7 días, del 08 al 14 de mayo del 2017; el segundo de 9 días, del 09 al 17 de septiembre del 2017 y el tercero de 100 días, del

28 de diciembre del 2017 al 8 de abril del 2018. Se analizan los datos de tensión, corriente eléctrica, potencia y energía trifásica, así como el factor de potencia y armónicos del sistema eléctrico de la Facultad. El tiempo de recolección de datos fue cada 300 segundos por parámetros en forma continua.

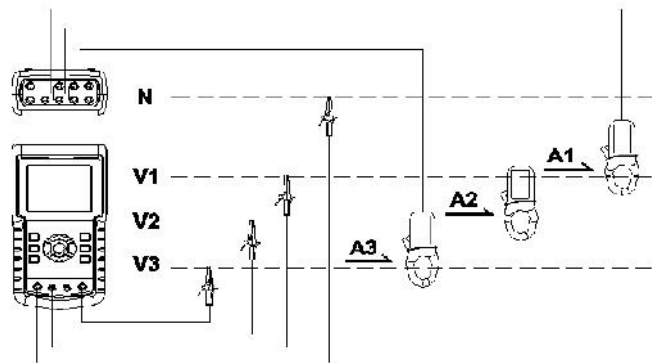


Figura 1. Esquema de conexión
Fuente: manual del instrumento

2.2 Consumo histórico

Mediante los datos brindados por la empresa distribuidora de energía eléctrica de la Provincia (SECHEEP) se confeccionó el diagrama de consumo histórico del edificio central de la Facultad. La figura 2 muestra la demanda energética del establecimiento a largo de los últimos 15 años (2003-2017), con un crecimiento promedio de la energía consumida del 9 % anual. Se observa que en los primeros 5 años de datos recolectados se presenta un crecimiento uniforme año a año, con valles y picos propios de los periodos de verano e invierno. Desde el año 2009 hasta fines del año 2011 el consumo registrado decae significativamente alcanzando valores inusualmente bajos, debido a ciertas contingencias externas a la universidad, como cambios en los medidores de consumo eléctrico del sistema de distribución eléctrica. Estas alteraciones se ven compensadas en el diagrama en los primeros meses del año 2012 representados por unos picos energéticos, donde, a partir de allí estas alteraciones se vuelven a repetir inconsistentemente. Debido a las anomalías existente en la curva de consumo, consideraremos solamente el año 2017 para realizar una comparación con los resultados de la simulación y un análisis económico.



Figura 2. Consumo histórico
Fuente: SECHEEP

2.3 Medición de temperatura

Los valores de temperatura se obtuvieron de la base meteorológica con la que cuenta la Facultad, pudiendo llevar a cabo un análisis sobre su relación con la demanda eléctrica del establecimiento.

2.4 Simulación del SFCR

Para estimar la energía producida anualmente por la instalación, se recurrió a la herramienta informática PVSyst. Este software posee una gran cantidad de funciones relacionadas con el desarrollo de un proyecto fotovoltaico, algunas de estas son:

- Cálculo de la producción esperada.
- Simulación de diversas variantes de un mismo proyecto. Para analizar como afectarían posibles modificaciones sobre el diseño base.
- Análisis de las sombras cercanas e influencia de estas en el funcionamiento de la instalación.
- Análisis detallado de las pérdidas en la instalación.
- Evaluación económica del proyecto.

Para el cálculo de la producción, el programa requiere que se introduzcan una serie de datos. A continuación, se explica de forma cualitativa los datos que han sido introducidos en PVsyst.

- 1) En primer lugar, debe especificarse la localización del proyecto. Esto afecta a los datos climáticos con los que el programa trabaja, principalmente radiación y temperatura ambiente. Si bien el programa no posee cargado los parámetros principales para la ciudad de Resistencia, es posible importar datos meteorológicos para la simulación. [7]
- 2) En segundo lugar, es necesario introducir la información de los componentes que conforman la instalación, es decir, los inversores y módulos fotovoltaicos a utilizar, fundamentales para el cálculo de la producción. Las características técnicas de éstos se detallan más adelante.
- 3) En tercer lugar, es necesario definir un perfil de obstáculos susceptibles de producir sombras en la instalación. Para nuestro dimensionamiento, el tejado del edificio se encuentra libre de obstáculos y sombras.
- 4) Por último, es necesario especificar la orientación e inclinación de la superficie captadora:
 - Inclinación de la superficie igual a la de la cubierta.
 - Orientación al norte-este.

2.5 Panel fotovoltaico e inversor trifásico

Para la elección de los paneles fotovoltaicos e inversores de corriente continua a corriente alterna (CC-CA) se consideró trabajar con el proveedor SOLARTEC, el cual nos brindó información detallada de los productos.

El módulo fotovoltaico propuesto es un SOL-6P-72-XXX-4BB de 320 Wp poli cristalino de 72 celdas. Este panel tiene unas medidas de 1960 mm de largo, 992 mm de ancho, 46 mm de espesor y de peso 23,5 kg. Entre las características eléctricas del módulo fotovoltaico en condiciones estándar, en donde a una potencia de salida de 320 Wp el panel tiene una eficiencia del 16,46 %. Además, tenemos las siguientes características eléctricas: tensión en potencia máxima (V_{pm}) de 38,0 Volts, corriente eléctrica en potencia máxima (I_{pm}) de 8,42 A, tensión de circuito abierto (V_{oc}) de 45,5 Volts y una corriente de cortocircuito (I_{sc}) de 8,76 A.

El inversor se seleccionó teniendo en cuenta el número total de paneles solares y las características técnicas de cada uno de éstos. Este dispositivo electrónico es el encargado de transformar la corriente continua en corriente alterna, permitiéndonos poder suplir parte del consumo demandado por el edificio. El inversor a utilizar es un SMA Sunny Tripower 15000LT con una capacidad de conversión de 15 kW. De acuerdo a la manual del inversor, se aprecia que la potencia máxima que permite en corriente continua es de 15,33 kW, la tensión de entrada máxima es de 1000 V, la corriente máxima de entrada y la corriente máxima en cortocircuito respectivamente son 33 A y 43 A y el rango de tensión en el punto de máxima potencia es de 240-800 V.

2.6 Inclinación de los módulos fotovoltaicos

La Inclinación de la superficie captadora de energía solar será igual a la de la cubierta del edificio (27°), para facilitar su fijación.

2.7 Sistema fotovoltaico

Este tipo de instalaciones se encuentra permanentemente conectado a la red de distribución eléctrica, de tal modo que, en los periodos de irradiación solar, sea el sistema fotovoltaico que entregue energía, mientras que, en los periodos de irradiación limitada o nula, sea la red eléctrica quien entregue la energía necesaria para satisfacer la demanda. En el caso que la energía generada por el sistema sea superior a la demanda del edificio, la red eléctrica aceptará todo excedente que no sea utilizado.

El SFCR se encuentra compuesto por un total de 270 paneles fotovoltaicos divididos en 18 cadenas de 15 módulos en serie cada una, produciendo una matriz generadora con una capacidad nominal de 86,4 kW. Además, para la conversión de la corriente continua a corriente alterna se dispuso con un total de 6 inversores trifásicos alimentados por 3 cadenas cada uno. Es decir:

- Cantidad de paneles en el SFCR: 270
- Cantidad de paneles en serie: 15
- Cantidad de cadenas por inversor: 3
- Cantidad de cadenas en el SFCR: 18
- Cantidad de inversores en el SFCR: 6

La figura 3 muestra la cubierta del edificio con el área de trabajo marcado en color rojo.



Figura 3. Vista superior de la superficie de trabajo
Fuente: Google Maps

2.8 Verificación de la instalación fotovoltaica

Presuponiendo unas temperaturas mínima y máxima de los paneles de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y teniendo en cuenta que la temperatura relevante para las condiciones de prueba estándar es de alrededor de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede obtener la variación de tensión de un módulo FV, comparada con las condiciones estándar. [4]

$$\text{Tensión sin carga máxima} = 45,5\text{ V} + 0,30 \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} * (25^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 56\text{ V}$$

$$\text{Tensión mínima en el punto de máxima potencia (MPP)} = 38\text{ V} + 0,30 \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} * (25^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}) = 24,5\text{ V}$$

$$\text{Tensión máxima en el punto de máxima potencia (MPP)} = 38\text{ V} + 0,30 \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} * (25^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 48,5\text{ V}$$

Por razones de seguridad y como medida de precaución, para la elección de los componentes del SFCR se toma el valor mayor entre la tensión sin carga máxima y el 120% de la tensión sin carga de los paneles. [4]

$$V_{oc} * 1,2 = 45,5\text{ V} * 1,2 = 54,6\text{ V}$$

Como $V_{oc} * 1,2 < \text{Tensión sin carga máxima}$, la tensión de referencia será: 56 V

Características eléctricas de la cadena:

$$\text{Tensión en el punto de máxima potencia (MPP)} = 15 * 38\text{ V} = 570\text{ V}$$

$$\text{Intensidad en el punto de máxima potencia (MPP)} = 8,42\text{ A}$$

$$\text{Intensidad de cortocircuito máxima} = 1,25 * I_{sc} = 1,25 * 8,76\text{ A} = 10,95\text{ A}$$

$$\text{Tensión sin carga máxima} = 15 * 56\text{ V} = 840\text{ V}$$

$$\text{Tensión mínima en el punto de máxima potencia (MPP)} = 15 * 24,5\text{ V} = 367,5\text{ V}$$

$$\text{Tensión máxima en el punto de máxima potencia (MPP)} = 15 * 48,5\text{ V} = 727,5\text{ V}$$

Para verificar la correcta conexión cadena-inversor, antes de nada, es necesario comprobar que la tensión sin carga en los extremos de las cadenas es menor que la tensión de entrada máxima soportada por el inversor:

$$\checkmark 840\text{ V} < 1000\text{ V}$$

Además, la tensión mínima MPP de la cadena no debe ser menor que la tensión mínima MPP del inversor:

$$\checkmark 362,7\text{ V} > 240\text{ V}$$

mientras que la tensión máxima MPP de la cadena no debe ser superior a la tensión máxima MPPT del inversor:

$$\checkmark 727,5\text{ V} < 800\text{ V}$$

Finalmente, la intensidad de cortocircuito máxima total de las 18 cadenas en paralelo y correspondientes a cada inversor no debe ser superior a la corriente de cortocircuito máxima soportada por el inversor a la entrada:

$$\checkmark 32,85\text{ A} < 33\text{ A}$$

2.9 Sección de conductores

Para determinar la sección de los conductores se consultó la norma UNE 20460-5-523 y la Guía Técnica de aplicación al Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.[5][6]

El SFCCR se dividió en diferentes circuitos de acuerdo a la interconexión de los elementos entre sí, tal y como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de operación del sistema

| Condiciones de operación del sistema | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------------------------------|-------|----------------------|-------|
| Circuito 1 | | Circuito 2 | | Circuito 3 | |
| Cableado en CC | | Cuadro de conexiones-inversor | | Cableado en CA | |
| Tensión (V) | 840 | Tensión (V) | 840 | Tensión de línea (V) | 380 |
| Corriente (A) | 10,95 | Corriente (A) | 32,85 | Corriente (A) | 197,1 |
| Longitud (m) | 20 | Longitud (m) | 10 | Longitud (m) | 20 |
| Caída de tensión (V) | 8,4 | Caída de tensión (V) | 2,52 | Caída de tensión (V) | 5,7 |

Fuente: elaboración propia

Cableado en CC

Este tramo de cableado comprende el cable entre módulos y desde el final de cada cadena hasta el cuadro de conexiones de corriente continua.

En el caso del cableado de cada cadena, la expresión que permite obtener la sección mínima de cableado es:

$$S = \frac{2 * L * I}{\Delta U * \sigma} \quad (1)$$

Cableado entre el cuadro de conexiones-inversor

Este cable comprende el cable que, desde la salida del cuadro de continua, al que han acometido todos los conductores de cada cadena, acomete la entrada del inversor de la instalación.

De forma análoga al cableado de cada cadena, la expresión que permite determinar la sección mínima del conductor es:

$$S = \frac{2 * L * I * N_p}{\Delta U * \sigma} \quad (2)$$

Cableado en CA

Este tramo discurre desde la salida del inversor, ya en corriente alterna, hasta el cuadro de protección y medida de CA.

De forma análoga al cálculo en el cableado de CC, la expresión para el cálculo de la sección mínima siguiendo este criterio queda:

$$S = \frac{\sqrt{3} * L * I * N_{PT} * \cos \varphi}{\Delta U_L * \sigma} \quad (3)$$

Siendo:

S: la sección del conductor (mm^2)

L: la longitud del conductor (m)

I: la corriente que transporta cada cadena (A)

σ : conductividad del cobre a 70°C ($\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$)

ΔU : caída de tensión máxima admisible en cada cadena (V). Se tomará 1% y 0,3% de la tensión en cada cadena para el circuito 1 y 2 respectivamente.

N_p : número de cadenas en paralelo por inversor (3)

ΔU_L : caída de tensión máxima admisible en CA. Se tomará 1,5 % de la tensión de línea. (V)

N_{PT} : número de cadenas en paralelo en SFCR (18)

$\cos \varphi$: factor de potencia brindado por el inversor trifásico

Establecidas todas las condiciones del sistema solar fotovoltaico se procede a dimensionar el cableado de cada circuito del sistema tal como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Sección de conductores

| Circuito | Sección de los conductores (mm^2) | Número de conductores | Longitud total (m) | sección de puesta a tierra (mm^2) |
|------------|--|-----------------------|--------------------|--|
| Circuito 1 | 4 | 2 | 40 c/cadena | no |
| Circuito 2 | 6 | 2 | 20 | no |
| Circuito 3 | 35 | 3 | 60 | 16 |

Fuente: elaboración propia

La temperatura máxima establecida para el dimensionamiento fue de 70°C , por tanto, considerando esta temperatura se escogió el valor de la conductividad del Cobre de $48 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$.

3. Resultados y Discusión

Las relaciones entre la energía consumida por la universidad, los resultados de la simulación y las variaciones de la temperatura se presenta en la figura 4. En base al consumo histórico de la universidad (figura 2) se observa que para el año 2017 la demanda energética anual es igual a 311.680 kWh, teniendo su mayor demanda en los primeros 4 meses del año, durante el cuarto y el noveno mes la energía consumida por el edificio permanece constante con un valor igual a 20.000 kWh y a partir de ahí el consumo en los últimos 3 meses es igual a 24.000 kWh (línea azul). La producción por parte del sistema fotovoltaico no será constante a lo largo del año, alcanzando una mayor producción en los meses más cercanos al periodo estival, donde la radiación solar es considerablemente mayor. Los valores arrojados por la simulación demuestran que el SFCR que se dimensiono es capaz de suplir el 32,53 % (101.390 kWh) de la demanda total (curva de color naranja). Por último, la variación de temperatura se muestra con la curva de color gris; la misma expresa un patrón similar al consumo del establecimiento, lo que confirma la percepción de que la Facultad consume mayor cantidad de energía eléctrica en la estación de verano debido a los equipos de climatización.

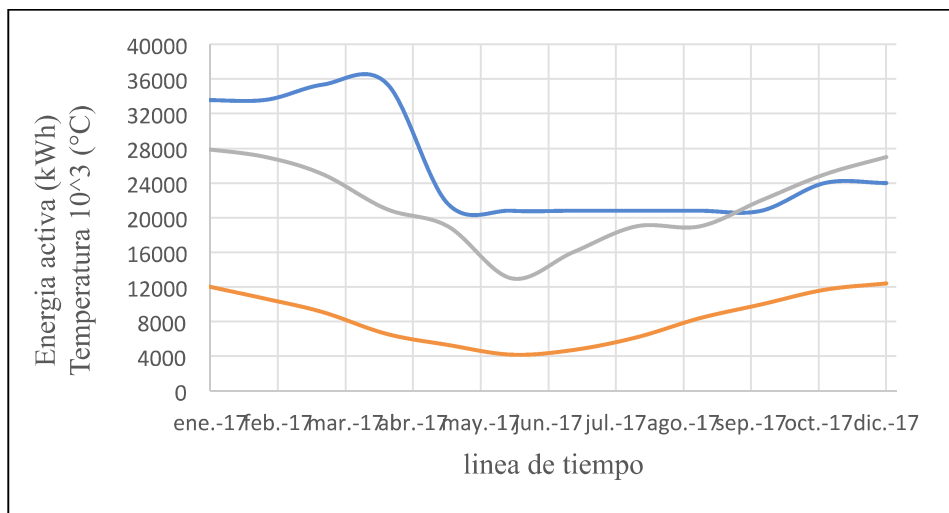


Figura 4. Flujo de energía-variación de temperatura
Fuente: elaboración propia

Para analizar en forma más detallada la demanda eléctrica de la universidad y los valores arrojados por la simulación, se presenta la tabla 3. En ésta podemos contemplar que la energía consumida en los diferentes meses del año 2017 presenta valores idénticos por momentos ocasionado por la metodología utilizada por la empresa suministradora de energía y a cuestiones legales. Con respecto a los resultados proveniente de la simulación, la energía producida por el SFCR fluctúa en función de los meses y la variación de los niveles de radiación solar, llegando a compensar un 32,53 % de la energía anual demandada.

Tabla 3. Demanda compensada

| Año 2017 | Energía consumida (kWh) | Energía producida (kWh) | % demanda compensada |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| enero | 33600 | 12190 | 36,28 |
| febrero | 33600 | 10640 | 31,67 |
| marzo | 35360 | 9090 | 25,71 |
| abril | 35520 | 6590 | 18,55 |
| mayo | 21600 | 5310 | 24,58 |
| junio | 20800 | 4190 | 20,14 |
| julio | 20800 | 4720 | 22,69 |
| agosto | 20800 | 6180 | 29,71 |
| septiembre | 20800 | 8400 | 40,38 |
| octubre | 20800 | 9990 | 48,03 |
| noviembre | 24000 | 11680 | 48,67 |
| diciembre | 24000 | 12410 | 51,71 |
| Total | 311680 | 101390 | 32,53 |

Fuente: elaboración propia

Los datos representados en la tabla 3, muestran un sistema fotovoltaico sub dimensionado para la demanda del edificio. Teniendo en consideración que el consumo crece en promedio un 9 % anual, podemos realizar la proyección a 10 años para determinar el porcentaje compensado de la energía absorbida por la Facultad (tabla 4).

Tabla 4. Proyección de la demanda compensada

| Año | Energía consumida (kWh) | Energía producida (kWh) | % demanda compensada |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 2018 | 311680,0 | 101390 | 32,53 |
| 2019 | 339731,2 | 101390 | 29,84 |
| 2020 | 370307,1 | 101390 | 27,37 |
| 2021 | 403634,8 | 101390 | 25,11 |
| 2022 | 439961,9 | 101390 | 23,04 |
| 2023 | 479558,5 | 101390 | 21,14 |
| 2024 | 522718,8 | 101390 | 19,39 |
| 2025 | 569763,5 | 101390 | 17,79 |
| 2026 | 621042,3 | 101390 | 16,32 |
| 2027 | 676936,1 | 101390 | 15,00 |

Fuente: elaboración propia

Este análisis de la demanda compensada a futuro nos muestra que, al cabo de 10 años la energía consumida por el establecimiento crecería mucho con respecto al año 2017, siendo capaz el SFCR de suplir solo el 15 % de este nuevo consumo, por lo que se deberán aplicar medidas de ahorro y eficiencia energética. Otro aspecto importante es el factor económico. En función del análisis sobre la energía compensada y sin considerar la inversión inicial necesaria para implementar el proyecto, se determinó que para el año 2017 el SFCR puede generar un ahorro financiero de \$194.376 de un gasto total de \$597.525 (tarifa eléctrica anual). Paralelamente, se analizaron y graficaron tres situaciones diferentes para las estaciones de verano e invierno. En la primera situación se comparó el día de mayor demanda energética y la energía producida por el sistema, en la segunda se relacionó la energía consumida los días sábados donde solamente existe actividad académica por la mañana y la energía producida por el sistema y, por último, se consideró los días domingo donde el establecimiento se encuentra sin actividad absorbiendo solo una demanda base y la energía producida por el sistema. En los gráficos mostrados la línea azul representa la potencia demandada (anализador de redes) y la línea naranja la potencia entregada por el sistema fotovoltaico (simulación).

Para la estación de verano de obtuvieron los siguientes resultados:

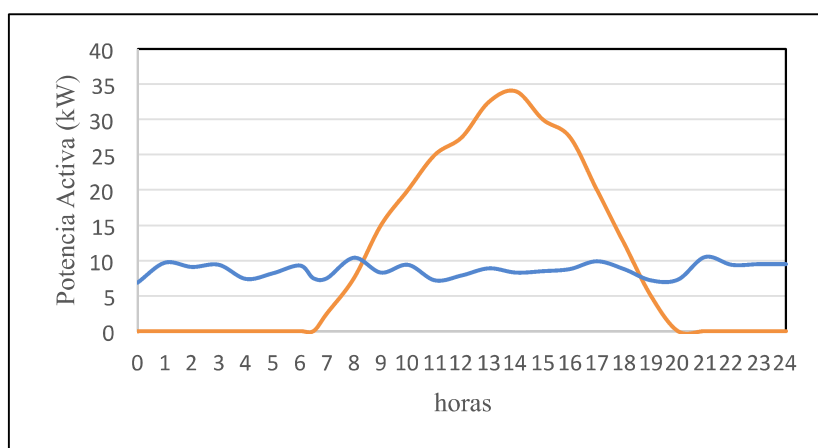


Figura 5. Energía consumida-producida. Día: Domingo
Fuente: elaboración propia

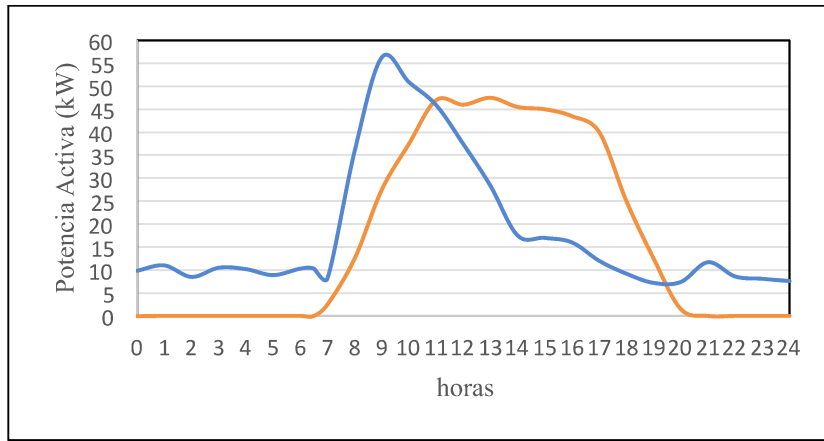


Figura 6. Energía consumida-producida. Día: sábado
Fuente: elaboración propia

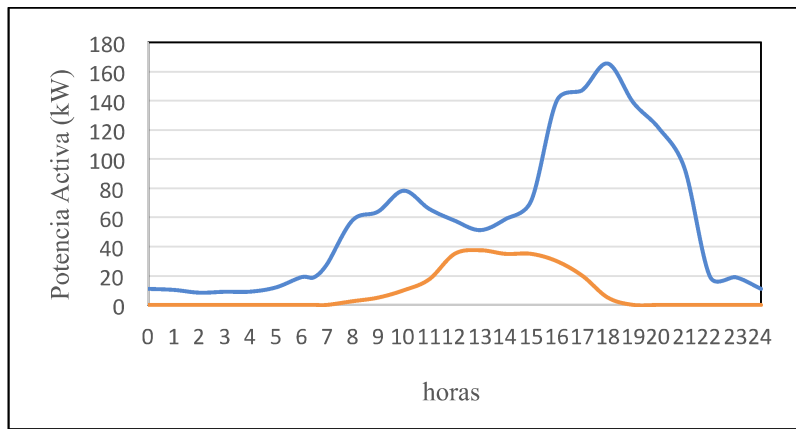


Figura 7. Energía consumida-producida. Día de mayor consumo
Fuente: elaboración propia

Para la estación de invierno de obtuvieron los siguientes resultados:

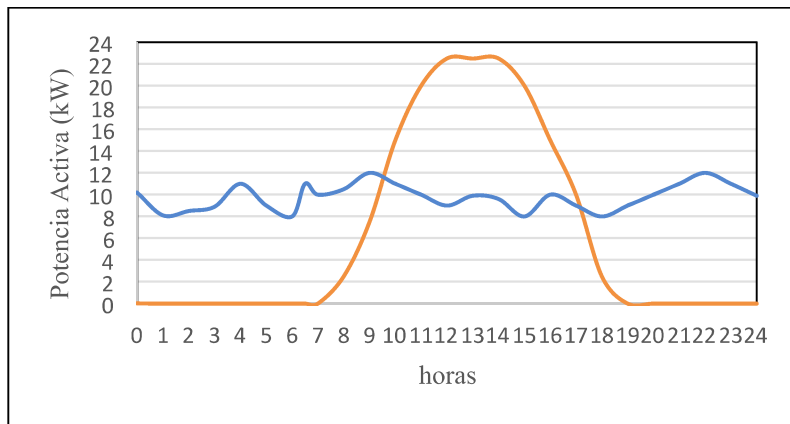


Figura 8. Energía consumida-producida. Día: Domingo
Fuente: elaboración propia

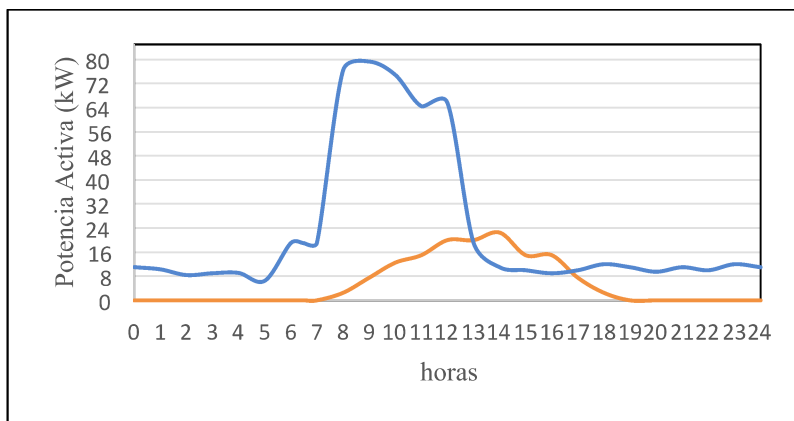


Figura 9. Energía consumida-producida. Día: sábado
Fuente: elaboración propia

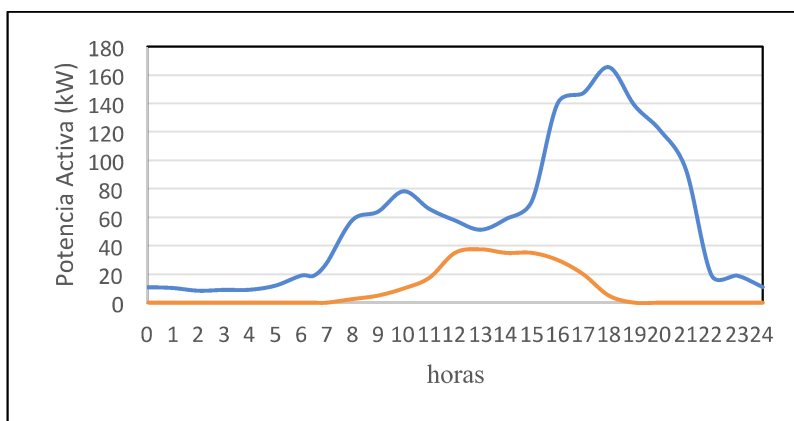


Figura 10. Energía consumida-producida. Día de mayor consumo
Fuente: elaboración propia

En la estación de verano para las situaciones analizadas podemos observar que el SFCR cubre el 100% de la energía demandada para los días sin actividad académica, para los días sábado, por ejemplo, donde encontramos un consumo significativo por la mañana solamente, se logra compensar el 60 % de la energía demandada. Por último, los días de mayor actividad energética, generalmente los días viernes, el SFCR compensa el 27,2 % de la demanda.

Para la estación de invierno, se repiten valores similares, compensándose el 100% para los días sin actividad académica, el 24,2 % para los días sábados y un 15,3 % los días de mayor actividad académica.

Con respecto al factor de potencia, mediante el proceso de medición determinamos que la fase R del sistema trifásico del establecimiento posee un factor de potencia bajo, con valores promedios menores o iguales a 0,85 en los días de mayor actividad académica, mientras que para los días de poca o nula actividad sus valores aumentan llegando a 0,88. Las fases S y T no presentan inconvenientes con respecto a este tema, teniendo para la mayoría de los casos analizados valores de factor de potencia superiores al 0,90.

Para la medición de las distorsiones armónicas se utilizó el analizador de redes antes mencionado de resolución 0,1% y precisión igual a $\pm 0,5\%$ de la lectura ± 2 dígitos para las mediciones de tensión. Los datos se registraron durante los periodos indicados y se procesaron en una PC obteniendo para todos los casos valores normales según contempla la norma EN-50160-Características de la tensión suministrada por las redes generales de

distribución. Las dos especificaciones más importantes de dicha norma que se aplican a este trabajo son:

- Durante el período de una semana, en condiciones normales de explotación, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica promediados en 10 minutos no deben sobrepasar los valores indicados en la Tabla 4.
- Contemplando todas las armónicas hasta el orden 40, la tasa de distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion) de la tensión suministrada no debe ser superior a 8 %

Tabla 4. Valores de voltajes armónicos individuales a

los terminales de suministro para pedidos de hasta 25 en porcentaje de Un

| Odd harmonics | | | | Even harmonics | |
|--------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Not multiples of 3 | | Multiples of 3 | | | |
| Order h | Relative voltage | Order h | Relative voltage | Order h | Relative voltage |
| 5 | 6 % | 3 | 5 % | 2 | 2 % |
| 7 | 5 % | 9 | 1,5 % | 4 | 1 % |
| 11 | 3,5 % | 15 | 0,5 % | 6...24 | 0,5 % |
| 13 | 3 % | 21 | 0,5 % | | |
| 17 | 2 % | | | | |
| 19 | 1,5 % | | | | |
| 23 | 1,5 % | | | | |
| 25 | | | | | |

NOTE: No values are given for harmonics of order higher than 25, as they are usually small, but largely unpredictable due to resonance effects.

Fuente: Norma Europea EN-50160

4. Conclusiones y recomendaciones

Mediante el proceso de medición de parámetros eléctricos sobre el tablero principal de la Facultad y los datos brindados por el Servicio Energético del Chaco, se pudo determinar un perfil de carga característico del usuario, el cual brindó la información suficiente para analizar el consumo energético que posee el establecimiento, el rendimiento de aparatos eléctricos, y las deficiencias del sistema eléctrico.

Los diagramas de potencias totales determinados mediante el analizador de redes, muestran patrones semejantes para los periodos de invierno y verano. Se puede afirmar que éstos se encuentran constituidos por dos partes principales; la primera, formada solamente por los valores de consumo base, es decir cuando el establecimiento se encuentra desocupado, prácticamente constante; la segunda muestra los valores de consumo variable según la ocupación del edificio. Para todos los casos analizados el consumo base oscila alrededor de los 10 kW de potencia y su tiempo de duración es de 6 horas durante los días hábiles.

La parte más importante, variable, la constituyen las variaciones de la energía consumida por la Facultad, cuando se encuentra en actividad. Si bien existen ciertas diferencias entre los valores máximos, en general se respeta un modelo formado por dos picos (el primero por la mañana y el segundo a partir de media tarde hasta el final de la jornada) y un valle de consumo entre dichas crestas. Este fenómeno es común observarlo en los días hábiles a diferencia de los sábados, domingos y feriados, donde prevalece el valor base de los parámetros eléctricos por la pequeña o nula ocupación del establecimiento.

Con respecto a los niveles de temperatura se aprecia una relación directa con el aumento y disminución de la demanda energética, si bien existen ciertas coincidencias en los diagramas, se cree que estas variaciones en el consumo se deben a los niveles de ocupación en el edificio.

Desde el punto de vista técnico resulta factible la implementación de un sistema fotovoltaico como una fuente alternativa de generación limpia para suplir parcialmente el consumo eléctrico que demanda la universidad, lográndose elaborar una propuesta de diseño para la instalación del sistema conectando a la red eléctrica, que puede ser capaz de cubrir actualmente algo más del 32 % (101.400 kWh) de la demanda energética anual.

Otro punto importante es el factor económico, la Facultad paga por el servicio eléctrico un monto superior a los \$600.000 al año; de acuerdo al análisis realizado el sistema generador fotovoltaico es capaz de ahorrar casi \$200.000, siendo este un valor significativo en relación al gasto anual.

5. Referencias

[1] JOSE MARIA DE JUANA SARDON (2001). *Energías renovables para el desarrollo*. Madrid: Paraninfo. 309 p.

[2] Gómez, C. (2016). *Las energías renovables en la Argentina*. Recuperado de: <http://reconciliandomundos.com.ar/las-energias-renovables-en-la-argentina/>

[3] JUAN PLA, CLAUDIO BOLZI, JULIO CESAR DURÁN (2018). Energía solar fotovoltaica. Generación distribuida conectada a red. *Ciencia e Investigación*, Argentina, v.68, n.1, p.51-64.

[4] ABB. *Cuaderno de aplicación técnica n°10: plantas fotovoltaicas*. Recuperado de: https://library.e.abb.com/public/e703d99268365a43c125791f002ce826/1TXA007109G0701_CT10.pdf

[5] *Guía Técnica de aplicación al Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión*. Recuperado de: http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/rebt_guia.aspx

[6] UNE 20460-5-523: *Instalaciones eléctricas en edificios*. Parte 5: selección e instalación de los materiales eléctricos. Recuperado de: https://emacsan.wikispaces.com/file/view/UNE_2020460-5-523.2004.pdf

[7] Centro de datos de Ciencia Atmosférica-NASA. Página web: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>