



DEMANDA ENERGÉTICA EN UNA ESCUELA RURAL EQUIPADA CON UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO: UN CASO DE ESTUDIO EN LA PROVINCIA DE CORRIENTES

C. Bello¹, A. Busso¹, L. Vera¹, C. Cadena²

¹Grupo Energías Renovables - FaCENA - UNNE
Av. Libertad 5470, CP 3400 Corrientes, Argentina
Tel. +54 (0)3783 473931 ext. 116 - E-mail: cjbell@gmail.com
²INENCO - Facultad de Ciencias Exactas - UNSa

RESUMEN: Los sistemas fotovoltaicos autónomos son actualmente los más populares en la electrificación rural de zonas aisladas. Lamentablemente, sus capacidades de generación no siempre coinciden con la demanda energética. Por lo tanto, se instaló un sistema de adquisición de datos en una escuela rural argentina, donde vive también una familia, con el objetivo de modelizar un patrón de consumo energético típico. Siete meses de monitoreo mostraron que el consumo del usuario es regular durante un largo periodo. En condiciones diurnas, no se consume más de 100Wh/día para las actividades escolares y 150Wh/día corresponden al consumo de la familia. En condiciones nocturnas, 150Wh/día son consumidos por la familia y 400Wh/día van para la iluminación exterior. Finalmente, el consumo diario es menor que la generación fotovoltaica de 2400Wh/día. Estos resultados del patrón de consumo servirán en futuros modelos de simulación, con el fin de mejorar el diseño de sistemas de generación solar en escuelas rurales de la región.

Palabras clave: Sistema Fotovoltaico Autónomo, Monitoreo, Demanda Energética.

INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) en contextos de electrificación rural descentralizada se está generalizando en casi toda la República Argentina, principalmente a través del Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER, 2009). En la provincia de Corrientes, se instalaron 85 SFA en escuelas primarias aisladas durante el año 2008. A los tres años de actividad, el consumo en estas escuelas se ha regularizado en función de la toma de conciencia de cada usuario por los límites de sus sistemas de generación solar. Sin embargo, el pedido energético no siempre corresponde a la capacidad de generación del SFA instalado. Con el fin de establecer un patrón de consumo típico para este tipo de establecimiento escolar en la región, el Grupo de investigación en Energías Renovables (GER) de Corrientes desarrolló e instaló un sistema de adquisición de datos (SAD) en una de las 85 escuelas correntinas (Bello C., 2010). A posteriori, se pretende ajustar un modelo de simulación con los datos experimentales obtenidos.

Sistema fotovoltaico autónomo monitoreado

La escuela donde fue instalado el SAD se referencia por el número 309, en el paraje Indio Muerto, localidad de San Luis del Palmar, provincia de Corrientes (lat. 27° 40' 52'' S y long. 58° 13' 27'' O). El dimensionamiento del SFA fue definido por el Ministerio de Educación de la Nación, el cual consideró la cantidad de ambientes, la superficie y uso de cada uno de ellos, necesidad de Lúmenes por metro cuadrado para cada ambiente particular (aula, cocina, estar, etc.) para estimar una cantidad de luminarias y de ventiladores de techo, un consumo para la vivienda docente y otros por equipamiento audiovisual. De esta manera, se llegó a un consumo promedio diario de 2.935Wh. Como consideraciones generales de diseño para el sistema de generación se empleó: 22 días de clase por mes, eficiencia global del sistema del 85% (sin los módulos FV), 3,6 horas de sol pico (1000W/m²) sobre el plano inclinado de los módulos FV durante el mes el más crítico del año y 3 días de autonomía, con una profundidad de descarga de baterías del 70%. Como resultado se determinó una capacidad para el banco de generación fotovoltaica de 800Wp (equivalente a una generación mensual de energía de 64.570Wh) y un banco de acumuladores de 524Ah de capacidad total, banco cuya tensión nominal es de 24V. Se detalla en la tabla 1 las características de cada uno de los elementos que constituyen este SFA..

Elemento	Marca	Características	Cantidad
Módulo Fotovoltaico	PHOTON - modelo PM0050	12V - 50Wp (potencia nominal)	16
Acumulador (plomo-acido)	AUTOBAT - modelo I-12-18 Solar	12V - 220Ah (capacidad nominal)	6
Regulador de carga	CONERGY - Modelo SCC40 vision	12/24V - 40A (corriente máxima)	1
Inversor CC/CA	STUDER - modelo AJ 2400	24V - 2000VA (P nominal)	2

Tabla 1: Detalles de los elementos que constituyen el SFA monitoreado.

La escuela 309 contaba con una matrícula de 18 alumnos en el momento del estudio de dimensionamiento, la cual se redujo a 7 inscriptos a principio del año 2011. La situación de la escuela 309 es particular en este aspecto: la recuperación de tierras, asociada al desalojo de familias, aceleró el éxodo rural en la zona y a fin de mantener una cantidad mínima de alumnos, se le ofreció a una familia ocupar una parte de la escuela como vivienda. De esta manera, se utiliza en la actualidad un solo salón para dar clase, turno mañana, además de las salas que corresponden a la dirección. Si bien la instalación eléctrica debe

realizarse en función de la configuración real de la escuela, el consumo dependerá directamente del uso que se haga en cada aula..

A los tres años de funcionamiento, la escuela no cuenta todavía con ciertos artefactos que fueron considerados en el dimensionamiento, a saber: bomba de agua, ventiladores, computadoras, impresora, o video. Por otro lado, la presencia de la familia viviendo en el establecimiento modificó el patrón de consumo previsto, principalmente en el tiempo de uso de las luminarias. También, no se observó la presencia de artefactos nuevos, ya que el televisor y la radio que ocupa la familia, cómo aparece en la tabla 2, estuvieron considerados en el estudio original de dimensionamiento.

La instalación eléctrica del establecimiento escolar considerado se reparte en dos sectores, cada uno de ellos alimentado por un inversor. El primer sector corresponde al salón principal de clase, oficina de dirección, un estar, una pequeña cocina, un baño y la galería. El segundo sector corresponde directamente a los dos salones ocupados por la familia, a la cocina principal también asociada a la parte vivienda y a los baños. El monitoreo del sistema fotovoltaico permite en consecuencia asociar la actividad de cada uno de los inversores a una función particular: un patrón de consumo relativo a las actividades de la escuela por un lado, y un patrón de consumo propio a la parte vivienda por el otro. Esta separación en el estudio del consumo del establecimiento toma un real interés cuando se considera que muchas escuelas rurales disponen de una vivienda para el docente y de un solo salón de aula. El consumo visiblemente moderado de la familia viviendo en la escuela 309, puede parecerse al consumo real de uno o dos maestros en otra escuela equipada con un SFA.

Artefacto	Marca	Potencia	Uso
Radio musical	Philips	16 W	5 hs por día
Televisor	Philco	42 W	2 hs por día
Televisor	Sanyo	28 W	Sin uso
Cargador de celular	Motorola		1 hs por día

Tabla 2: Artefactos y/o electrodomésticos declarados por los usuarios del sector vivienda: potencia y modo de uso.

METODOLOGÍA

Generalmente, se utilizan modelos de simulación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para realizar estudios previos de diseño y dimensionamiento. Varios autores presentan modelos completos en “Matlab” (Saheb-Koussa y D. Haddadi M., 2007) o en “TRNSYS”, pero los datos experimentales utilizados para ajustar los modelos corresponden a ensayos de pocos días y siempre controlando la carga: 161 días de monitoreo en el caso de un estudio realizado en Taiwán con TRNSYS para un SFA destinado a la República de Malawi, en el Africa (Nkhonjera L. K., 2009) y 25 días en el caso de otro estudio realizado en Suecia (Shao F., 2007).

El problema principal de un sistema de monitoreo in situ es que en el sitio de medición el sistema fotovoltaico a estudiar representa la única fuente de energía. La instalación de una computadora es por ejemplo imposible debido al impacto que tendría su consumo continuo sobre el propio funcionamiento del SFA. El SAD desarrollado por el GER evita este problema incorporando una placa de adquisición completa, con reloj, memoria, y un muy bajo consumo energético (potencia menor a 5W). Además, un grupo de acumuladores de apoyo independiza el SAD del sistema de generación fotovoltaico en momentos de cortes energéticos en la escuela.

Para realizar un ajuste del modelo de un SFA complejo, con 6 baterías y 2 inversores, tener datos reales de consumo y no datos estimados o simulados será novedoso en este ámbito. Los datos de monitoreo obtenidos en la escuela correntina considerada, durante 7 meses de medición, y con un periodo de 1 minuto, son la base de un patrón de consumo detallado que servirá tanto a perfeccionar modelos de simulación como para establecer metodologías de diseño y dimensionamiento apropiadas a la región.

Tratamiento de los datos disponibles

El sistema de adquisición de datos mide cada minuto la intensidad y la tensión de la corriente de entrada de cada uno de los inversores. Estas variables permitieron graficar la potencia instantánea $P(t)$ para cada sector del establecimiento escolar. Los canales de medición de intensidad de corriente continua tienen una resolución de $\pm 0,5A$ y los de tensión de $\pm 0,1V$. Considerando por ejemplo una tensión de 24V y una intensidad de 10A, la incertidumbre sobre el valor de potencia será de $\pm 13W$. Gráficamente se observan desvíos de las curvas $P(t)$ a medida que va cargándose el banco de baterías y que sube la tensión en entrada del inversor. Estos desvíos, así como también el ruido de las señales, son de una magnitud aceptable frente a la precisión de los valores de potencia calculados.

Se realizó un primer filtrado de las curvas $P(t)$ por cálculo de medias móviles tomando 10 puntos adyacentes, lo que atenuó el ruido sin alterar demasiado los frentes ascendentes o descendentes de la curva de potencia. Estos frentes permiten obtener una información buena en cuanto a los horarios de consumo del usuario. Luego, para poder asociar las curvas $P(t)$ al uso real de ciertos aparatos eléctricos, se realizó en la escuela un ensayo donde se controló el encendido de cada luminaria o artefacto (televisor, radio), con el fin de establecer ecuaciones de corrección que tomen en cuenta las pérdidas no lineales de los inversores.

Debido a cortes no deseados del sistema de adquisición datos durante las primeras semanas de medición, no resultó conveniente trabajar exactamente por meses de calendario ya que la cantidad de días de datos disponibles no era siempre la

misma de un mes a otro. El primer periodo de monitoreo va del 25/10/2010 al 17/11/2010 y del 06/12/2010 al 12/12/2010, para un total de 30 días. El segundo periodo va del 13/12/2010 al 16/01/2011. Los periodos siguientes corresponden a meses de calendario, a saber: el mes de febrero corresponde al periodo 3, marzo al 4, abril al 5, mayo al 6 y junio al 7.

A partir de los datos del primer periodo se realizó un análisis minucioso de las curvas $P(t)$ para una interpretación de la demanda energética en cada zona del establecimiento. Estos primeros resultados sirvieron para ajustar nuevos filtrados y validar un método de integración de $P(t)$, esto último, realizado con el objetivo de sistematizar el cálculo de consumo promedio por periodo y por zona. Al disponer de los datos de dos inversores, se establecieron en primera estancia, dos consumos diferentes dentro del mismo establecimiento. El inversor del sector escuela alimenta también a la galería donde los usuarios suelen dejar prendida una luminaria durante la noche. Asociando el uso de la energía a su respectivo horario, se separó el consumo relativo a la actividad docente (horarios de día) del consumo nocturno propio a la galería. Finalmente se determinaron tres perfiles de consumo, representados por $E_{escuela}$, $E_{galería}$ y $E_{vivienda}$.

A fin de evaluar la posible influencia de las condiciones reales de insolación sobre los consumos, se calculó un promedio diario de la radiación solar medida en el plano de los módulos fotovoltaicos de la escuela, llevándolo a una cantidad equivalente de horas de sol pico por día (1h de sol pico = 1000Wh/m²).

RESULTADOS

Se presenta a continuación un modelo de consumo para cada una de las tres zonas del establecimiento (escuela, vivienda y galería), seleccionando el primer periodo como típico de un mes de actividad escolar. Los dos periodos siguientes corresponden al receso escolar de verano, y para los otros meses se observa un agotamiento del banco de batería (fin de vida), el cual influye en el consumo. Así se analizó la evolución del pedido energético a lo largo de los 7 periodos de registro de datos, comparándolos con la radiación solar recibida y la frecuencia de cortes energéticos del sistema fotovoltaico.

Modelos de consumo por zona

Zona escuela: De los 30 días analizados, 17 presentan un consumo nulo en la zona escuela y pueden asociarse a días sin actividad escolar, incluyendo los fines de semana y los días de lluvia que dejan los accesos a las escuelas rurales intransitables. Esta relación entre ausencia de consumo y días nublados, o días con pocas horas equivalentes de sol pico, se observa en la Figura 1 a). En la figura aparece un grupo de puntos alrededor de los 110Wh, agrupación útil para definir un patrón de consumo típico para esta zona del establecimiento. El consumo promedio para los 13 días de actividad escolar es de 106Wh (media aritmética), pero debido a la poca cantidad de datos, resulta más significativo tomar en cuenta la mediana que se posiciona en 103Wh. La Figura 1 b) muestra que para la mitad de los días con consumo la potencia promedio corresponde al uso de una sola luminaria de 40W, con un promedio de dos horas y media de uso diario. Para los días con consumos promedios inferiores a 40W, se observan importantes desviaciones del cero para la curva $P(t)$, lo cual indetermina el tiempo real de uso de la luminaria al introducirse en los cálculos una carga supuesta de potencia inferior a 10W durante largos periodos. Se recuerda que los datos de potencia instantánea considerados corresponden a mediciones en entrada del inversor e incluyen las pérdidas del mismo. Los 2 días en que se alcanzan potencias promedio de 65 a 85W presentan excepciones que no pueden excluirse del patrón de consumo (duración promedio de 2 horas y 56 minutos). Se registró un solo escalón de consumo no habitual de 70W, el cual puede corresponder al encendido de 2 luminarias juntas o de cualquier otro artefacto no presente normalmente en la escuela. Además, no se registran potencias instantáneas superiores a 100W.

Para establecer un patrón de consumo realista para la zona escuela, es conveniente considerar redondeos por exceso lo suficientemente gruesos como para prever variaciones posibles de un mes a otro. Así, se puede asociar el consumo de la zona escuela al uso de una sola luminaria de 40W durante 3 horas, 15 días al mes, con el encendido de otra luminaria durante 2 de estos días de clase. Según este patrón de consumo, la energía total mensual requerida para la “zona escuela” será de 2040Wh (se registró un consumo real de 1.381Wh durante los 30 días considerados), o sea 68Wh/día, con demandas atípicas de 240Wh/día.

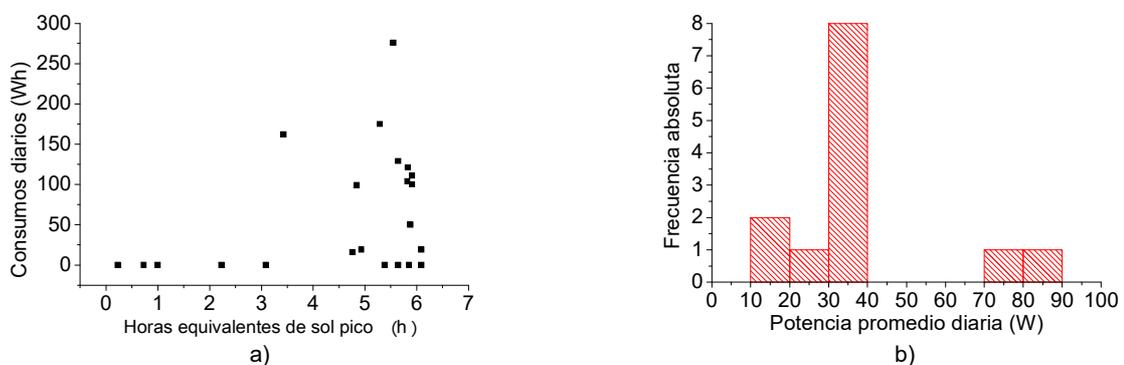


Figura 1: Datos registrados durante el primer periodo en la zona escuela. a) Consumos diarios registrados únicamente de lunes a viernes, en función de las horas equivalentes de sol pico correspondientes. b) Distribución de las 13 potencias diarias no-nulas registradas.

Zona vivienda: El consumo energético en la zona vivienda no se asemeja al de las zonas escuela y galería y, cómo se puede prever a través de las Figuras 2 a) b) c) d), definir un patrón de consumo para esta zona no resulta sencillo. Del análisis de datos se determinó que, el consumo diario no depende ni de la cantidad de horas de sol, ni del día específico de la semana. Si bien la potencia promedio diaria es estable, la demanda energética de la zona vivienda no es regular. En consecuencia, el error sobre una estimación del consumo para esta zona será alto y resulta conveniente sobre-estimar estos valores. Para los 30 días del periodo 1, el consumo promedio diario es de 220Wh y la mediana es de 184Wh. Asumiendo un error arbitrario del 25%, el consumo puede estimarse a unos 275Wh/día. Además, merece mencionarse que la mitad de esta energía se consume de noche (54%).

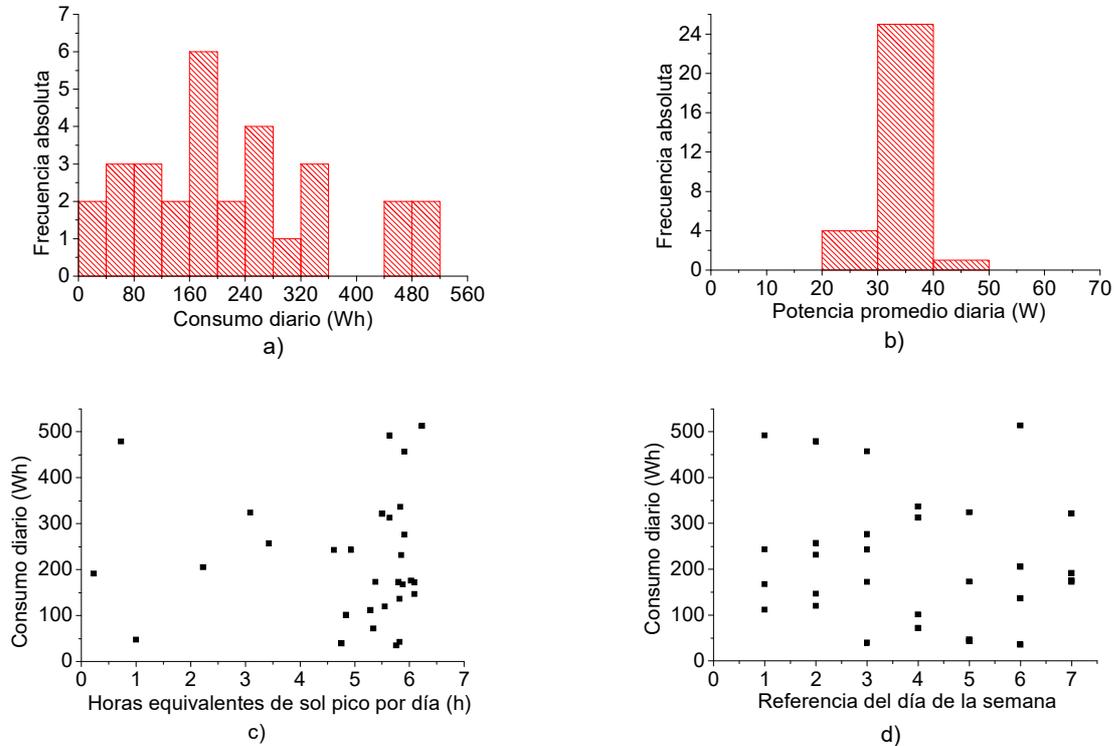


Figura 2: Distribución de a) consumos, b) potencias diarios registrados durante el primer periodo en la zona vivienda. Consumos diarios en función de c) las horas equivalentes de sol pico correspondientes y d) del día de la semana (el día lunes está referenciado por ser el día 1, el domingo el día 7).

Zona galería: El consumo diario de la zona galería durante el primer periodo de 30 días de monitoreo es relativamente regular: se observa en la figura 3 a) que uno de cada dos días corresponde a unos 360Wh entregados al usuario. En la figura 3 b), aparece una potencia de uso típica de unos 40W, la cual se relaciona con las características nominales de una sola luminaria y corrobora las declaraciones del usuario. Basándose en los 22 días más significativos, el tiempo promedio de uso de esta luminaria es de nueve horas y diez minutos, siempre en horario nocturno. Un análisis de los días atípicos deja ver que durante 2 días se hizo un uso no habitual de esta luminaria, quedándose más de 20 horas prendida en el día, y sin relación directa con los niveles de radiación solar registrados (estos días se superó las 5.5 horas de sol pico). Este olvido del usuario, que no apagó la luz de la galería de día, puede compensarse con otro día donde no se prendió la luminaria de noche (única excepción del mes). El consumo promedio para el primer periodo es de 317Wh/día. Una estimación de consumo típico para la zona galería asociado al uso de una sola luminaria de 40W, prendida 10h/día en horarios de noche da 400Wh/día.

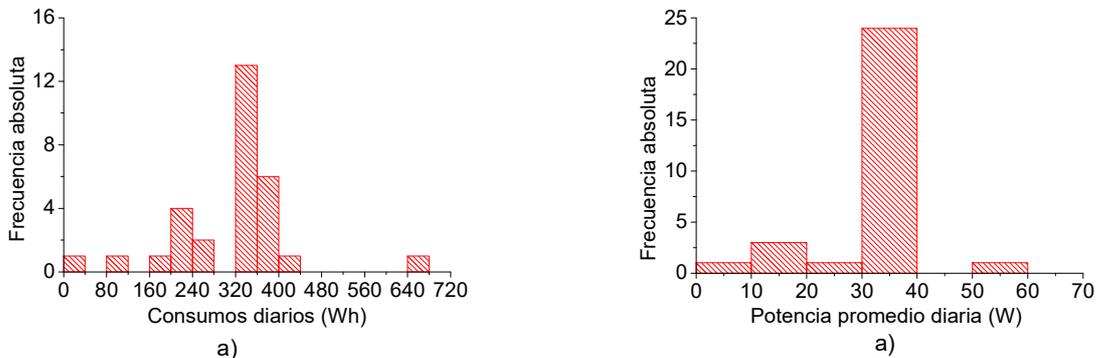


Figura 3: Distribución de a) consumos y b) potencias diarios registrados durante el primer periodo en la zona galería.

Evolución de los consumos por zona durante 7 meses

Durante los siete meses de monitoreo (7 periodos de 28 a 33 días) aparecen ciertas variaciones en el consumo de cada zona del establecimiento tal cómo se lo puede observar en la figura 4 a).

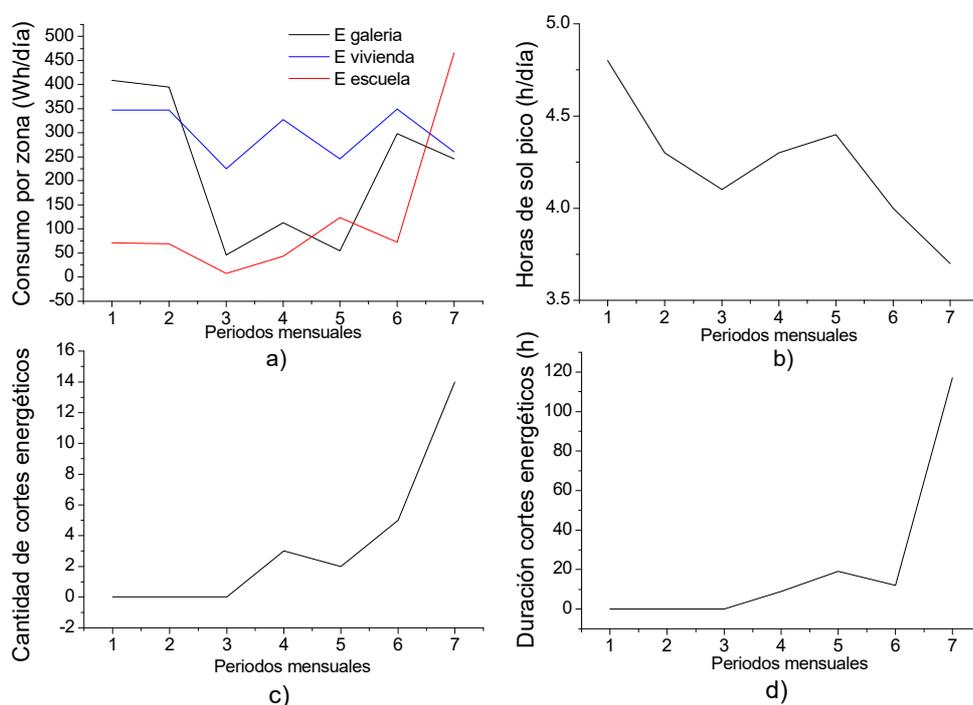


Figura 4: Promedios mensuales de datos registrados durante un total de 7 periodos.

Zona escuela: Las variaciones del consumo en esta zona del establecimiento siguen la tendencia de la curva de horas de sol pico (Figura 4 a) curva roja y Figura 4 b)). Así, un aumento en la cantidad de irradiancia recibida durante el periodo 5 parece provocar un mayor consumo. Se podría confirmar de tal manera la influencia del tiempo sobre la actividad escolar, esto es, en época de lluvia el acceso a las escuelas rurales se hace imposible y disminuye el nivel de actividad escolar. Por otro lado, los periodos 2 y 3 corresponden al receso escolar del verano, sin diferencias muy marcadas en el patrón de consumo. El último periodo presenta un consumo excepcional en la zona escuela. Un análisis más preciso de los datos $P(t)$ deja ver que se hizo uso de algún artefacto de alto consumo (1000W) en periodos cortos y repetidos repartidos en 6 días (se registraron 11 picos que no duran más de 2 minutos cada uno). El portero confirmó el uso de un taladro y de una amoladora necesarios en un trabajo de refacción de sanitarios de la escuela realizado durante este periodo.

Zona vivienda: La demanda energética para esta zona oscila de un mes a otro entre 250 y 350Wh/día, con un promedio exacto de 300Wh/día durante los 7 periodos de medición. Este consumo puede considerarse cómo estable y no presenta influencia clara con otros parámetros.

Zona galería: A partir del tercer mes de monitoreo, la costumbre que tenía el usuario de dejar prendida una luminaria toda la noche cambió. Todavía no se registraron cortes energéticos durante este periodo pero este cambio de actitud anticipó las primeras fallas del sistema fotovoltaico autónomo. Durante los periodos 4 y 5 empiezan a aparecer cortes de los inversores debidos a descargas sumamente profundas de las baterías (tensión del banco inferior a 20V). Luego, a partir de mayo (periodo 6), se observa nuevamente un consumo de noche en la galería, aunque un poco más controlado que al principio de año.

Dimensionamiento y respuesta del sistema fotovoltaico frente a la demanda

De día, el consumo del establecimiento corresponde a unos 100Wh para la zona escuela más otros 150Wh para la zona vivienda. De noche, son 400Wh para la galería y 150Wh para la zona vivienda. El banco de batería esta dimensionado para abastecer unos 3KWh/día durante 3 días, por lo tanto, el consumo nocturno observado en el establecimiento no es excesivo y corresponde a un uso moderado del SFA. En época de baja radiación solar, los 800Wp del banco FV instalado no producen más de 2880Wh, frente a una demanda diaria de 800Wh. Debe considerarse la eficiencia de cada elemento del SFA para conocer la energía exacta entregada por el sistema al usuario, pero aun así, su potencia general de producción supera ampliamente el consumo observado. En consecuencia, el SFA estudiado esta sobre-dimensionado. En cuanto al valor de insolación considerado en el dimensionamiento original (3,6h de sol pico por día), se puede comparar con la radiación solar medida sobre el plano de los módulos FV durante el mes de junio (periodo 7), por ser la más baja registrada, con un promedio de 3,7h de sol pico por día. En este ultimo periodo, condiciones atípicas de irradiancia y de consumo provocaron

una sucesión de cortes energéticos que se hacen cada vez más largos (ver figuras 4 c) y d)). Del periodo 3 al periodo 6, aparecen también cortes energéticos ante situaciones de consumo moderado, lo cual caracteriza una pérdida de capacidad importante del banco de baterías exactamente a sus 3 años de actividad.

CONCLUSIÓN

La calidad y cantidad de datos obtenidos por el monitoreo in situ de un sistema fotovoltaico autónomo permitió definir un patrón de consumo detallado para una escuela rural típica de la provincia de Corrientes. Se observó que solamente el 12% del consumo energético del establecimiento corresponde a la actividad docente, con variaciones de un mes a otro según la cantidad de días de clase y en función de la radiación solar medida. El 50% del consumo total corresponde a la iluminación de noche de una galería y el resto corresponde a la zona vivienda donde se registran variaciones notables de un día a otro, pero con un valor promedio estable a los 7 meses. El pedido energético diario promedio es de 800Wh, por lo tanto, el SFA instalado está sobre-dimensionado, sabiendo que su capacidad de generación es de 2400Wh/día durante el mes más crítico. Además, se observaron las primeras fallas del banco de batería exactamente a sus tres años de actividad.

Un estudio más completo de la configuración y diseño del sistema fotovoltaico resulta ahora posible. A través de los datos de monitoreo podrán analizarse la adecuación de cada uno de los elementos del sistema y sus interacciones entre sí. Con el patrón de consumo obtenido y los valores de radiación solar medidos, un modelo de simulación podrá ajustarse a un verdadero sistema fotovoltaico con almacenamiento, tomándose en cuenta condiciones reales de uso.

REFERENCIAS

- Bello C. et al (2010). *Factores que Afectan el Funcionamiento de Instalaciones Fotovoltaicas Autónomas en Regiones del Nordeste Argentino*. Congreso ASADES 2010, Cafayate Salta. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, 2010.
- Bello C. et al (2010). *Equipamiento de Adquisición de Datos para Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Instalados en Escuelas de Corrientes*. Congreso Mundial INGENIERIA 2010, Buenos Aires
- Shao F. (2007). *Measurement and Simulation of Stand-Alone Photovoltaic Systems*. Master Thesis, European Solar Engineering School, Högskolan Dalarna, Sweden, 2007.
- Nkhonjera L. K. (2009). *Simulation and Performance Evolution of Battery Based Stand-Alone Photovoltaic Systems of Malawi*. Master Thesis, National Central University, Taiwan, 2009.
- PERMER (2009). *Provisión e instalación de equipos fotovoltaicos e instalación interna en viviendas rurales de diversas provincias*. Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales, Licitación Internacional, 2009.
- Saheb-Koussa D., Haddadi M. (2007). *Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement "Matlab"*. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP 2007.

ABSTRACT: Stand-alone photovoltaic systems are actually the most popular in the rural electrification of remote areas. Unfortunately, their generation capacities do not always coincide with the energy demand. Therefore, we have installed a data acquisition system in an Argentinian rural school, where also live a family, in order to modelize a typical pattern of energy use. Seven months of monitoring shows that the user consumption is regular over a long period. In diurnal conditions, no more than 100Wh/day are consumed by the scholar activities and 150Wh/day correspond to the family consumption. In nighttime conditions, 150Wh/day are consumed by the family and 400Wh/day are due to the outdoor lighting. Finally, the daily consumption is smaller than the photovoltaic energy generation of 2400Wh per day. Those results of pattern of use will be used in future simulated systems in order to improve the design of those solar generation systems in rural schools of the region.

Keywords: Stand-Alone PV System, Monitoring, Energy Demand.