

## EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS EN ZONAS RURALES DE LA PROVINCIA DE CORRIENTES, ARGENTINA

**Christophe Jean Joseph Bello** – cjjbello@gmail.com

**Ramón Raúl Sánchez** – ramonraulsanchez@gmail.com

**Pedro Cossoli** – pacossoli@gmail.com

**Luis Horacio Vera** – lh\_vera@yahoo.com.ar

**Arturo Juan Busso** – ajbusso@gmail.com

Grupo Energías Renovables, FaCENA, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

**Carlos Cadena** – cadenacinenco@gmail.com

INENCO, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Argentina

**Resumen.** El uso de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) durante los últimos años, demostró que es una solución presente y del futuro para la electrificación rural descentralizada (ERD). Sin embargo, se observa que la falta de un adecuado dimensionamiento, equipamiento y mantenimiento, afecta al funcionamiento de sistemas instalados y podrían comprometer el éxito de los próximos proyectos. El nivel de confiabilidad de cada SFA instalado depende directamente de factores típicos de su región, como lo son las condiciones climáticas. En la provincia de Corrientes, en Argentina, el Grupo Energías Renovables (GER) está llevando a cabo un estudio completo de caracterización de 85 SFA instalados en escuelas rurales, con el objetivo de ofrecer soluciones para optimizar el comportamiento de tales sistemas en la zona. Se realizaron ensayos en laboratorio de módulos fotovoltaicos (FV) y baterías a fin de controlar sus características nominales. Además, un monitoreo in situ de un SFA en condiciones reales de operación y datos generales de mantenimiento, permitieron analizar problemas específicos que afectan directamente al funcionamiento de los SFA. Se observaron casos concretos de mala calidad de módulos FV, de inversores afectados por la presencia de ranas, y de configuraciones de SFA inadecuadas en el control de carga y descarga de las baterías, provocando pérdidas prematuras de capacidad de las mismas. Finalmente, se concluye que un proyecto de electrificación con SFA no puede limitarse en las tareas de instalación. Se debe prever, financiar y organizar también un mantenimiento adecuado, sin el cual no se podrá lograr un éxito a largo plazo.

**Palabras-claves:** Electrificación Rural Descentralizada, Energía Solar.

### 1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética mundial aparece en la actualidad como un problema social de los más preocupantes. Por un lado, los límites en recursos que presentan las fuentes de energía tradicionales implican una búsqueda de alternativas. Por otro lado, se vinculan las energías fósiles con graves problemas ambientales, principalmente con la generación de gases de efecto invernadero que provocan un peligroso calentamiento global del planeta. Esta situación se hace mundial y favorece el uso de las energías renovables, no solamente por el potencial todavía no explotado que presentan, sino también por permitir el acceso a un modo de energía limpia en entornos urbanos y rurales.

#### 1.1. El uso actual de la energía solar fotovoltaica en la electrificación rural

En el informe anual 2011 del Consejo Mundial de Energía, su Secretario General relaciona el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (adoptados en el año 2000 por la comunidad internacional y definidos para ser alcanzados en 2015) con un indispensable acceso a servicios energéticos modernos para los 1.500 millones de personas que no se benefician todavía (World Energy Council, 2011). Es también uno de los objetivos principales presentados por las Naciones Unidas, que llegaron a designar el año 2012 como “el Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos”.

Al relacionarse con mejoras en las condiciones de vida, un aumento de la tasa de electrificación en un país del Sur puede influir directamente en sus indicadores de desarrollo. Generalmente, se trata de responder a las necesidades energéticas, individuales como colectivas, de los sectores rurales, para lograr un mejor acceso a la salud, a la higiene, a la educación, a la información (audiovisual) y a la telecomunicación, pero también favorecer a las actividades económicas (agricultura, artesanía, comercio, etc.) (de Gouvello y Maigne, 2000).

En Argentina, la red eléctrica pareció haber llegado a sus límites en el 2004 (Scarabée, 2008), debido a que las nuevas extensiones resultan poco rentables cuando más aislado se encuentra el usuario. Para mejorar las tasas de electrificación en el país, se promovió progresivamente a partir del año 1999 el uso de las energías renovables a través

del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER), que se define como un proyecto de alto contenido social: sus objetivos son “atender al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades rurales dispersas, contribuyendo al alivio a la pobreza en las mismas” (Secretaría de Energía de La Nación, 2009).

El PERMER está financiado por el Gobierno Nacional, donde el 70% es aportado por la Secretaría de Energía a través de un préstamo del Banco Mundial y la donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), el 4% por el Ministerio de Educación para la electrificación de escuelas rurales, el 9% con fondos provinciales (provenientes fundamentalmente del Fondo Nacional de la Energía) y el 17% restante por el sector privado: concesionarios y usuarios. En el 2009, este programa tenía activo más de 6.000 instalaciones fotovoltaicas autónomas. El mismo año, según datos informados por las Naciones Unidas, unas 70.000 familias argentinas no contaban todavía con acceso a la energía eléctrica (United Nations, 2009). Para cambiar esta situación, se aceleró el uso de SFA, finalizándose en el 2012 la instalación de más de 15.000 nuevos sistemas FV domiciliarios.

Surge entonces la pregunta ¿si las primeras experiencias con SFA resultaron positivas y si se logró el nivel de confiabilidad esperado? Si bien el PERMER se encarga del financiamiento y de la organización de las nuevas instalaciones, no parece existir un mecanismo seguro para controlar si los SFA públicos siguen o no en actividad. Sin embargo, resulta primordial registrar, analizar y resolver los problemas que se relacionan con el funcionamiento de cada SFA, para un necesario retorno de experiencias que permita mejorar las instalaciones actuales y futuras.

## **1.2. Niveles de confiabilidad**

La provincia de Corrientes se benefició a través del PERMER de la instalación de 85 sistemas de generación de tipo SFA en escuelas rurales muy aisladas durante el año 2008. Algunas de estas escuelas ya disponían de grupos electrógenos, sin embargo estos generadores presentan inconvenientes de mantenimiento y de re-abastecimiento de combustible en zonas retiradas. Además, los grupos electrógenos suelen ser sobre-dimensionados para las pocas luminarias, radio y televisor, que se encuentran en las escuelitas. Son artefactos que consumen poca corriente durante varias horas diarias. Para un tal uso, un SFA aporta indudablemente una mejor calidad de servicio, evitando gastos excesivos en combustible.

No obstante, el pedido de grupos electrógenos “de emergencia” por parte de varias escuelas correntinas que ya disponen de un SFA demuestra que la solución fotovoltaica no es confiable al 100%. En este contexto el término “confiabilidad” aplicado a un SFA toma un sentido particular. No se trata de la seguridad de la instalación, como en el ejemplo de una central nuclear, sino más bien de una relación directa con la disponibilidad del sistema de generación solar. Así, considerando que será la única fuente de energía para el usuario, el dimensionamiento llega a tomar mucha importancia.

Sin embargo, el diseño de un SFA resulta ser un proceso más complejo donde se deben considerar también las interacciones entre cada uno de los elementos que lo constituyen. Por ejemplo, la vida útil de una batería, el elemento el más crítico en un SFA, se relaciona directamente con sus tensiones de corte en carga y en descarga, las cuales no siempre se ven controladas de la mejor forma. Hasta ahora, los estudios de confiabilidad de los SFA se han centrado fundamentalmente en las labores de dimensionamiento, sin considerar la evolución de los sistemas en operación real, la degradación y averías de sus componentes, ni por lo tanto, sus influencias sobre dicha disponibilidad energética inicialmente estimada (Diaz Villar, 2003).

## **2. OBJETIVOS**

Basándose en experiencias previas, y con la hipótesis de que se puede optimizar el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos en aplicaciones rurales, se plantea como objetivo principal analizar el comportamiento de un grupo de sistemas FV con 4 años de actividad, centrando el estudio en los factores que afectan a la confiabilidad. Los resultados esperados servirán también a otras provincias, inclusive otros países, ya que ciertos problemas ligados a los SFA se encuentran en distintos artículos internacionales (Nkhonjera, 2009).

En primer lugar, corresponde caracterizar los elementos que se seleccionaron en el diseño de los SFA estudiados, es decir, controlar los valores nominales indicados por los fabricantes. Los módulos fotovoltaicos se caracterizan principalmente por sus potencias de generación, las baterías por sus capacidades de almacenamiento. Ambos parámetros son esenciales para el dimensionamiento de los SFA y se verifican a través de ensayos normalizados en laboratorio.

Los reguladores de carga y los inversores se caracterizan por sus interacciones con los otros elementos del SFA, lo cual implica controlar el funcionamiento completo de un SFA en condiciones reales de uso y determinar puntos de trabajo y de corte de los reguladores de carga y de los inversores. Esta determinación se realiza a través de un sistema de adquisición de datos, que registra con una frecuencia adecuada, variables propias del funcionamiento de un SFA.

Por último, se identifican los principales factores que afectan al funcionamiento de los SFA estudiados y a su confiabilidad. Para tal análisis, se deben considerar los perfiles de del usuario, el dimensionamiento inicial de los SFA y sus respuestas frente consumos reales, así como los problemas específicos encontrados durante las operaciones de mantenimiento.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS

A fin de cumplir con cada uno de los objetivos anteriores, se estableció una metodología de trabajo apropiada, considerando los componentes y la accesibilidad de los SFA en actividad.

Básicamente, un SFA es un sistema de generación eléctrica. Se constituye de un panel o conjunto de módulos fotovoltaicos, un banco de baterías, un regulador de carga, y generalmente un inversor CC/CA. La configuración y diseño de los SFA cambian de manera a adaptarse lo mejor posible a las necesidades del usuario. Cuando el uso se limita a la iluminación se eligen sistemas solamente de corriente continua (CC) por una cuestión de simplicidad y de eficiencia, y se opta por una conversión a corriente alterna (CA) cuando la mayoría de los artefactos utilizados lo necesitan. Por ejemplo, los SFA domiciliarios instalados por el PERMER, de potencia FV inferior a 200Wp, no disponen de inversores.

En la provincia de Corrientes, las potencias FV de los SFA instalados en 85 escuelas, van desde 400 hasta 1500Wp, con 600Wp en el 53% de los casos. El 64% de los SFA cuenta con dos inversores, y en las instalaciones con potencias a partir de 800Wp (22% de los casos), se instalaron dos reguladores de carga. Los bancos de baterías se ven configurados en 24V, con una conexión en paralelo de 2 a 5 pares de baterías directamente en salida del o de los reguladores de carga.

#### 3.1. Ensayos en laboratorio

La caracterización de los módulos fotovoltaicos utilizados en los SFA de las escuelas correntinas se realizó a través del ensayo de 64 módulos FV sin uso, 26 de la firma CONERGY y 38 de la firma PHOTON. Ambos son de fabricación hindú, de idénticas características eléctricas y geométricas: poli-cristalinos, 36 celdas, potencia nominal de 50Wp +/- 5%, 16,5V y 3,04A a potencia máxima, 20,0V en circuito abierto y 3,47A en corto circuito. Comercialmente, los módulos FV son sometidos individualmente a ensayos bajo condiciones controladas y estandarizadas (Standard Test Conditions - *STC*) de temperatura (25°C) y radiación (1000W/m<sup>2</sup>). De esta forma, el fabricante garantiza, para cada módulo, determinados valores de parámetros relevantes, tales como potencia pico, corriente de corto circuito (*I<sub>cc</sub>*), tensión de circuito abierto (*V<sub>oc</sub>*), entre otros. Son parámetros que se calculan a partir las características I-V y P-V de cada módulo, curvas que brindan información sobre el comportamiento del dispositivo frente a diferentes situaciones de carga (Firman *et al.*, 2011).

En el contexto del presente trabajo, se realizaron ensayos bajo condiciones ambientales de radiación y temperatura, en la terraza del edificio del GER, en día de cielo claro, sin viento, y una orientación adecuada para una incidencia de la radiación solar directa normal al plano del módulo. Las curvas I-V y P-V se relevaron utilizando un equipo portátil desarrollado para tal fin por el GER (Bello *et al.*, 2009).

Para la caracterización de las baterías utilizadas en los SFA de Corrientes, se realizaron también ensayos en laboratorio, con el fin de obtener sus curvas típicas de descarga, y por lo tanto, de controlar sus capacidades iniciales. A partir de junio del 2011, se inició la renovación de los bancos de baterías que presentaban una elevada tasa de degradación en las escuelas de la provincia, ofreciéndose la oportunidad de ensayar en laboratorio baterías nuevas, del mismo fabricante y del mismo modelo. Los ensayos se limitaron a 6 baterías.

Las baterías consideradas son acumuladores electroquímicos de tipo plomo-acido y se clasifican como baterías solares, de características y comportamiento diferentes de las baterías automotrices. Todos los ensayos fueron realizados en laboratorio con una temperatura ambiente estable de 25°C. La corriente de descarga (*I* = 9,5A) se calculó a partir de la capacidad nominal (*C*) para una duración de 20 horas, indicada por el fabricante. La corriente de descarga se reguló con un sistema que incorpora un micro-controlador, con un ajuste cada 10 segundos, garantizando la estabilidad de corriente. Además, un sistema de adquisición de datos registró los valores de tensión en el tiempo.

#### 3.2. Adquisición de datos y monitoreo

Para la caracterización del funcionamiento de un SFA y permitir un análisis de la interacción entre sus diferentes elementos, se desarrolló un sistema de adquisición de datos (SAD) adaptado a un monitoreo in situ. A las mediciones habituales de intensidad y tensión, se agregaron mediciones de temperaturas de trabajo y de radiación solar incidente.

Para la calibración del SAD desarrollado, se instaló en la terraza de la Facultad de Ciencias Exactas, en el campus universitario de la UNNE, un SFA con características similares a los que se encuentran en las escuelas. La calibración individual de cada canal se realizó con instrumentos de laboratorio de precisión (Bello *et al.*, 2010), verificándose elevados valores de correlación lineal ( $R^2$  mayor a 0,99). Luego, con el fin de estudiar con más detalles el comportamiento de un SFA en condiciones reales de uso, se instaló en octubre del 2010 el SAD desarrollado en una de las 85 escuelas rurales correntinas consideradas en este trabajo. Datos obtenidos durante siete meses de monitoreo permitieron definir un patrón de consumo energético típico para la escuela, analizando por separado la demanda en energía eléctrica en cada sector del establecimiento y asociándolos a distintos tipos de actividades (Bello *et al.*, 2011).

El monitoreo de los SFA se realizó también a través de un seguimiento sistemático de las operaciones de mantenimiento realizadas en las escuelas de la provincia. El GER se encargó de las principales intervenciones, y el uso de fichas de visita permitió implementar una misma metodología para la operación de mantenimiento. Las observaciones son registradas en una base de datos, con el fin de contar con datos estadísticos sobre los factores que afectan al funcionamiento de los SFA.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El seguimiento de 85 SFA en actividad, asociados a ensayos de módulos y baterías en laboratorio, permitió obtener resultados importantes para la caracterización de tales sistemas en condiciones reales de operación.

### 4.1. Caracterización de los módulos FV

Se ensayaron 64 módulos FV nuevos durante el mes de Abril del 2009, con cielo claro, 35°C de temperatura ambiente, 950W/m<sup>2</sup> radiación solar, incidencia normal, sin viento, y 55°C de temperatura de celda FV. Luego de extrapolar las curvas I-V a condiciones estándar, se obtuvo una potencia promedio máxima de 46,5Wp para los módulos PHOTON y de 43,5Wp para los CONERGY. Además, se detectaron 6 módulos CONERGY (23% de la muestra) cuyas curvas características presentaban un comportamiento de naturaleza diferente. Con el objetivo de verificar que los resultados anteriores no fueron causados por error instrumental o experimental, se llevó a cabo un nuevo trazado de las características I-V de estos 6 paneles. El ensayo se realizó durante el mes de Julio de 2009, con una temperatura ambiente de 20°C y una temperatura de celda entre 30 y 36°C. Las curvas resultantes mostraron un comportamiento normal, indicando la posibilidad de un problema inducido por efecto de la temperatura. Para verificar esta hipótesis, se relevaron las curvas características de uno de estos módulos con diferentes valores de temperatura. La Fig. 1 presenta las curvas I-V obtenidas, donde se puede apreciar que el efecto anómalo exhibido por el panel desaparece cuando la temperatura de celda es menor a 39°C.

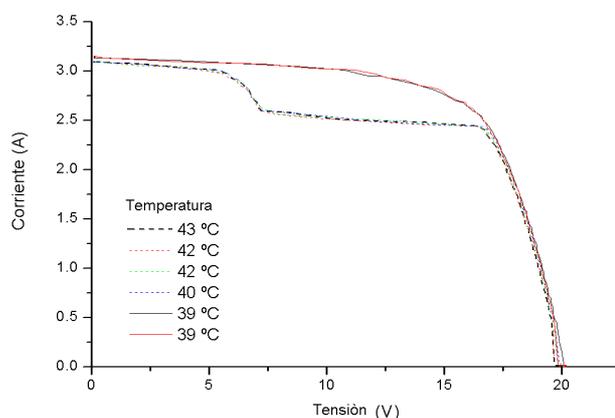


Figura 1- Comportamiento de la curva I-V de un mismo módulo de 50Wp para diferentes temperatura de celdas.

### 4.2. Caracterización de las baterías

Los ensayos de baterías se realizaron en condiciones estándar de temperatura (25°C). Cada curva de descarga obtenida permite definir un tiempo  $t$  en horas, por el cual la batería es capaz de entregar la corriente  $I$  de un teórico  $C_{20}$ . Para las 6 baterías, el tiempo de descarga experimental supera las 20 horas, y se necesita a la ley de Peukert para calcular el  $C_{20}$  real. Según esta ley, la dependencia de la capacidad con la corriente y el tiempo de descarga se expresa de la forma siguiente:  $I_n \cdot t = \text{constante}$ . A partir de la tabla de capacidades  $C_5$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  y  $C_{100}$  del fabricante, se determinó un exponente  $n = 1,2$ . La Tab. 1 da un resumen de las capacidades reales obtenidas en la primera descarga de cada una de las 6 baterías nuevas que se ensayaron. Todas presentan un  $C_{20}$  superior a los 190Ah anunciados por el fabricante.

Tabla 1. Tiempos de descarga y capacidades reales de baterías solares (plomo-acido) nuevas.

Referencia de batería	Tiempo de descarga $t$ (h)	$I^n \cdot t$ (con $n = 1.2$ )	$C_{20}$ (Ah)
Datos fabricante	20.00	298	190.0
Batería n°1	22.00	331	207.5
Batería n°2	21.85	326	204.5
Batería n°3	23.82	355	219.8
Batería n°4	23.85	355	220.0
Batería n°5	23.98	357	221.0
Batería n°6	21.92	327	205.1

Luego, se realizaron cargas y descargas sucesivas con una misma batería, de forma a visualizar la pérdida de capacidad habitual durante las primeras descargas de una batería nueva (Fig. 2), donde después de 4 descargas la capacidad que se obtuvo es de 206Ah.

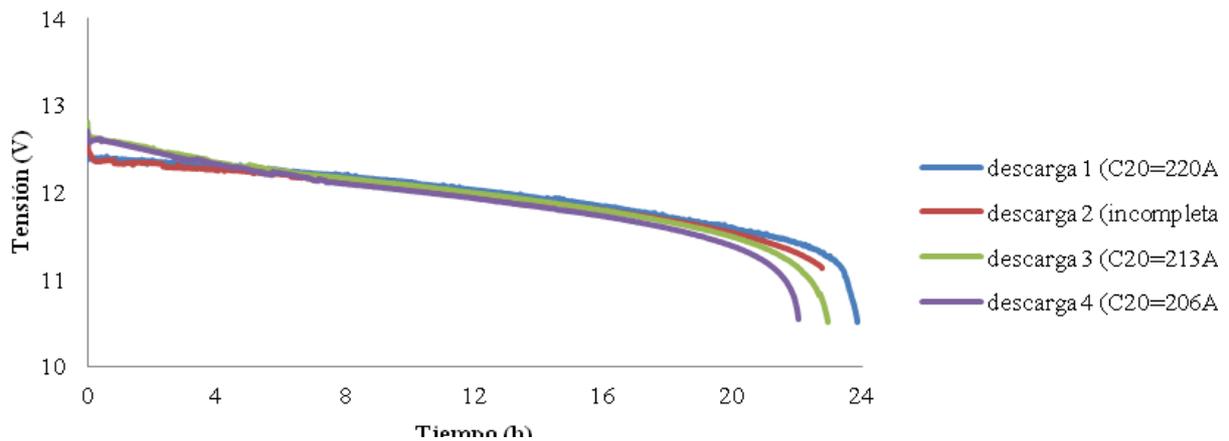


Figura 2- Descargas sucesivas de una misma batería.

### 4.3. Puntos de trabajo de los reguladores de carga y de los inversores

Un monitoreo de un sistema fotovoltaico experimental, simulando un perfil nocturno de consumo, fue realizado durante un mes. Los resultados obtenidos permitieron una primera caracterización de SFA en condiciones de operación. La Fig. 3 presenta de forma grafica los resultados de un día típico de monitoreo.

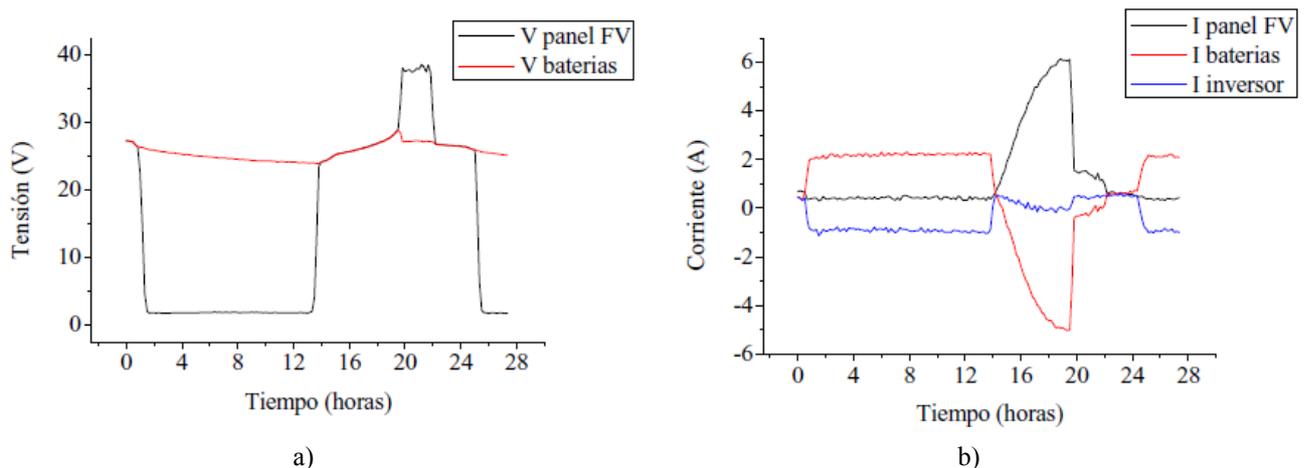


Figura 3- Datos registrados durante un día, con un SFA experimental a) tensión, b) corriente.

Durante las primeras horas graficadas, correspondientes al periodo nocturno, se observa que la tensión y la corriente del panel FV son muy próximas a cero (no existe generación FV). En este mismo período, una carga constante de 40W genera una demanda de corriente de igual magnitud a la corriente de descarga del banco de baterías. A medida que pasan las horas, continúa la demanda energética, y la tensión del banco de baterías disminuye levemente debido a la descarga de los acumuladores. Al empezar el día (existe incidencia de radiación solar sobre el sistema de generación FV), se observa que la tensión del panel FV se ajusta a la tensión del banco de baterías, caracterizando el rol del regulador de carga que cierra el circuito y habilita la recarga de los acumuladores. Los datos registrados permiten también observar la corriente generada por el panel FV y a posteriori su relación con la radiación solar medida de forma simultánea. Para evitar una sobre carga de las baterías, el regulador abre el circuito al llegar a una tensión predefinida (se consideran 2 baterías de 12V en serie para este SFA), acción que se visualiza en la Fig. 3 cuando la tensión del panel pasa a un valor cercano a la tensión de circuito abierto (aproximadamente 40V). En esta circunstancia, existe una mínima circulación de corriente hacia las baterías, para mantenerlas en una tensión de flote.

Luego, el traslado del SAD en una de las 85 escuelas consideradas, permitió el monitoreo de un SFA en condiciones reales de operación, poniendo en evidencia que el sistema está sobredimensionado frente al demanda (Bello *et al.*, 2011). Además, se observaron sucesivos cortes energéticos exactamente a los 3 años de actividad para este SFA, lo cual se debe a una pérdida de capacidad importante de su banco de baterías. Los datos registrados indican que la tensión de corte del regulador de carga corresponde a condiciones de trabajo estándar para las baterías, es decir, con una

temperatura ambiente de 25°C. Sin embargo, las temperaturas de operación registradas en las escuelas, para las baterías, superan los 40°C durante varios meses del año. En estas condiciones, se llega a la plena carga de los acumuladores antes de la tensión habitual de corte (28,8V). En descarga, las baterías se ven también afectadas por descargas excesivas, debido a que el modelo de inversor presente en la escuela no tiene sistema de corte en baja tensión.

Finalmente, el caso particular de la escuela donde se instaló el SAD puede generalizarse a muchas de las escuelas correntinas, que ven la confiabilidad de sus SFA afectada por una limitación de la vida útil de las baterías.

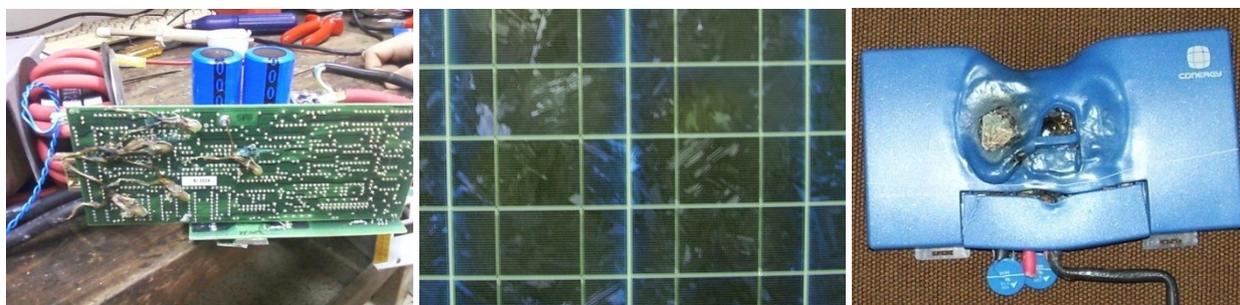
#### 4.4. Problemas destacados

En la Tab. 2 se exponen los problemas más frecuentes encontrados durante las visitas de mantenimiento. La falta de líquido o electrolito en las baterías (el 74% de las escuelas) no tiene repercusión a corto plazo sobre el funcionamiento de los SFA en el primer año de operación, pero sí resulta muy importante, respecto a pérdidas prematuras de capacidad en los acumuladores.

Tabla 2. Problemas encontrados en los SFA de Corrientes en el año 2010.

Total de referencia	Casos de electrolitos "secos"	Inversores fuera de servicio	Reguladores de carga fuera de servicio	Escuelas actualmente sin energía	Robos parciales o totales
Cantidad	32	8	1	10	4
50 visitas	64%	16%	2%	20%	8%
43 escuelas	74%	19%	2%	23%	9%

Se observó que las escuelas que menos usan sus baterías por falta de consumo nocturno tienen acumuladores con menor nivel de electrolito. En segundo lugar, aparecen fallas graves en los inversores, siendo el factor predominante la presencia de ranas dentro de los aparatos (Fig. 4a). Desde la puesta en operación de los SFA, pocos reguladores de carga presentaron fallas (Fig. 4c). En cuanto a los módulos fotovoltaicos, se ha observado a los dos años de operación una decoloración con un patrón característico. La misma se produce a lo largo de la zona central de las celdas tal como se aprecia en la Fig. 4b. De forma general, para la provincia de Corrientes, la selección de los diferentes elementos en el diseño de los SFA no resultaron ser la mejor solución técnica, ya sea por falta de adaptación a las condiciones reales de operación de la zona, o por simples cuestiones de calidad.



a) Inversor dañado por ranas.      b) Deterioro visible de un módulo FV.      c) Regulador de carga quemado.

Figura 4- Fotos de algunos elementos dañados de los sistemas FV instalados en las escuelas de Corrientes.

#### 4.5. Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos estudiados

En la Tab. 3, se presenta un resumen de las fallas, defectos y problemas determinados, los cuales afectan directamente a la confiabilidad de los SFA. Además, se establecen para cada uno de ellos las consecuencias directas, a corto o largo plazo, sobre el funcionamiento de los sistemas.

Tabla 3. Clasificación de problemas registrados respecto a los SFA en actividad en Corrientes.

Clase de Problema	Casos concretos	Consecuencias
1. Calidad de los productos	Módulos fotovoltaicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Casos de módulos que ven sus curvas I-V afectadas con temperaturas de celda mayores a 45°C (disminución de sus potencias reales).</li> <li>- Pérdida óptica de módulos a los 3 años de actividad.</li> </ul>	La pérdida de potencia de un solo módulo afecta a la capacidad de generación de todo el arreglo FV. El oscurecimiento de módulos reduce sus rendimientos a largo plazo. Un cambio de módulos antes de los 15 años de actividad no entraba en el plan inicial de mantenimiento.
2. Condiciones ambientales	Inversores: <ul style="list-style-type: none"> <li>- El 50% de los inversores modelo 3300VA quedaron afuera de servicio debido a infiltraciones de ranas.</li> </ul>	Los arreglos de inversores dañados implicaron gastos importantes no previstos en los presupuestos de mantenimiento, sumando a la necesidad de formar técnicos a nivel local.
3. Configuración del SFA	Reguladores de carga: <ul style="list-style-type: none"> <li>- No consideran la temperatura del electrolito para cortes de carga en tensiones adecuadas.</li> <li>- No cortan en sobre-descarga.</li> </ul> Inversores: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos 2000VA no limitan las descargas de batería en tensiones.</li> </ul> Bancos de baterías: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se encuentran hasta 5 grupos de baterías conectados en paralelo, sin reguladores de carga e inversores propios.</li> </ul>	Para una batería, un corte de la carga a una tensión habitual, pero con una temperatura ambiente que supera ampliamente los 25°C, genera sobrecargas repetitivas, generando una evaporación excesiva del electrolito y daños irreversibles de los acumuladores. Las descargas excesivas afectan gravemente a la vida útil de las baterías. Según la configuración actual de los SFA de Corrientes, la degradación prematura de uno de los acumuladores provoca sobrecargas de los otros acumuladores en serie, y descargas no deseadas de los acumuladores en paralelo.

De forma general, los problemas identificados en la provincia de Corrientes, acerca de 85 SFA instalados en escuelas rurales aisladas, demuestran que son factores no previstos, que no se tomaron en cuenta durante el diseño de estos sistemas. Algunos, como la intrusión de ranas en los inversores, son difíciles de prever. Sin embargo, la falta de control en la carga y descarga de las baterías proviene de una configuración inicial inadecuada. Como consecuencia, se inició el cambio de baterías con un año de anticipación, generando gastos importantes no previstos para el año 2011, mientras que los años 2009 y 2010 se vieron afectados por la falla de inversores en 15 escuelas. En ambos casos, son problemas que afectan al suministro de energía durante varios meses para cada escuela, debido a la falta de proveedor de baterías solares en la provincia, a las demoras en pedidos de fondos para compras, o a los tiempos de reparación de los inversores.

Para el PERMER, la provisión de fondos vía Banco Mundial implica de alguna manera entrar en un sistema economicista. Esto explica que al momento de la toma de decisiones frente a diferentes arquitecturas para los SFA, se priorizan los factores económicos por sobre los de confiabilidad y de sustentabilidad. En la provincia de Corrientes, en solamente 4 años de funcionamiento, los SFA instalados ya sufrieron de problemas tan importantes que los gastos de mantenimiento asociados justifican una reevaluación de las configuraciones iniciales. Por simple falta de adaptabilidad a condiciones locales de operación, estos sistemas alternativos de generación eléctrica ven su imagen afectada en las poblaciones rurales en contacto con las escuelas, comprometiendo una futura expansión de tales sistemas.

## 5. CONCLUSIÓN

Con el uso de sistemas fotovoltaicos autónomos para la electrificación rural descentralizada, surgen preocupaciones acerca de la adecuación de tales sistemas con sus condiciones reales de trabajo. Un estudio de 85 SFA en actividad en escuelas aisladas de la provincia de Corrientes demostró que, tanto la calidad de ciertos elementos, en particular de los módulos FV, como la inadecuación del diseño de los sistemas para una regulación correcta de las cargas y descargas de las baterías, provocan pérdidas prematuras de capacidad de generación y de almacenamiento, y

hasta cortes energéticos prolongados. Si bien los problemas encontrados ya fueron analizados y resueltos, resulta importante replantear el diseño de los SFA estudiados en prevención de nuevos daños.

Es evidente que las fallas en SFA actualmente registradas no deben comprometer la implementación de la energía solar fotovoltaica como solución adecuada a la electrificación rural. Muy por el contrario, se deben aprovechar urgentemente las pocas experiencias en el sector para permitir el sostenimiento en el tiempo de los sistemas instalados y a instalar. Programar un seguimiento de cada SFA, directamente desde el inicio de cualquier proyecto de ERD, permitiría disponer de fondos adecuados y de un equipo capacitado para garantizar un funcionamiento correcto de los sistemas a largo plazo.

En complemento, con los datos del monitoreo registrados directamente de un SFA en actividad, se espera ajustar los modelos de simulación a condiciones reales de operación a fin de optimizar, desde la etapa de diseño, la configuración de este tipo de sistema, y con ello, obtener un aumento de la confiabilidad.

## REFERENCIAS

- Bello, C., Jimenez, V., Toranzos, V., Busso, A., Vera, L., Cadena, C., 2009. Relevador Portatil de Curvas I-V de Paneles Fotovoltaicos como Herramienta de Diagnostico in situ de Sistemas de Generación Fotovoltaica. Congreso ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 13.
- Bello, C., Busso, A., Vera, L., Cadena, C., 2010. Factores que Afectan el Funcionamiento de Instalaciones Fotovoltaicas Autónomas en Regiones del Nordeste Argentino. Congreso ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14.
- Bello, C., Busso, A., Vera, L., Cadena, C., 2010. Equipamiento de Adquisición de Datos para Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Instalados en Escuelas de Corrientes. Congreso Mundial de Ingeniería, Buenos Aires.
- Bello, C., Busso, A., Vera, L., Cadena, C., 2011. Demanda Energética en una Escuela Rural Equipada con un Sistema Fotovoltaico Autónomo: un Caso de Estudio en la Provincia de Corrientes. Congreso ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15.
- Firman, A., Toranzos, V., Busso, A., Cadena, C., Vera, L., 2011. Determinación del Punto de Trabajo de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red: Método Simplificado de Traslación Punto a Punto a Condiciones Estándar de Medida, Congreso ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15.
- Diaz Villar, P., 2003. Confiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: Aplicación a la Electrificación Rural. Tesis doctoral, Madrid.
- de Gouvello, C., Maigne, Y., 2000. L'Electrification Rurale Décentralisée. Une chance pour les hommes, des techniques pour la planète. Systèmes Solaires, Paris.
- Mala, K., Schlapfer, A., Pryor, T., 2008. Better or Worse? The Role of Solar Photovoltaic (PV) Systems in Sustainable Development: Case Studies of Remote Atoll Communities in Kiribati, Elsevier, Renewable Energy 34, 358–361.
- Nkhonjera, L., 2009. Simulation and Performance Evaluation of Battery Based Stand-Alone Photovoltaic Systems of Malawi, Master of Science in Environmental Sustainable Development, National Central University, Taiwan.
- Scarabée, 2008. Boletín de Conexión de la Red de Expertos en Electrificación Descentralizada, N° 22.
- Secretaría de Energía de la Nación, 2009. Proyecto PERMER, Manejo Ambiental y Social, Condiciones para su Implementación en las Provincias. Ministerio de planificación, inversión pública y servicio de la República Argentina.
- United Nations, 2009. Rural Population by Major Area, Region and Country, 1950-2050.
- World Energy Council, 2011. World Energy Insight 2011. Official Publication of the World Energy Council.

## PERFORMANCE EVALUATION OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN RURAL AREAS IN CORRIENTES, ARGENTINA.

**Abstract.** *The use of stand-alone photovoltaic systems (SAPV) in recent years proved that it is the best actual solution and for the future, for the decentralized rural electrification. However, it has been seen that the lack of appropriate sizing, equipment and maintenance, affect the operation of installed systems and could compromise the success of future projects. The reliability level of each installed SAPV directly depends on factors typical of their region, such as weather condition. In the province of Corrientes in Argentina, the Renewable Energy Group is conducting the characterization of 85 SAPV installed at rural schools, with the aim to offer solutions to optimize the use of such systems in the region. Laboratory tests were conducted with photovoltaic modules and batteries to control their origin technical characteristics. In addition, in situ monitoring of a SAPV under real conditions of operation and general maintenance data, helped to analyze specific problems that directly affect the functioning of the SAPV. There were individual cases of poor quality of PV modules, power inverters affected by the presence of frogs, and configurations of SAPV inadequate in controlling the charge and discharge of batteries, causing early loss of capacity. Finally, it is concluded that an electrification project with SAPV must not be limited to installation tasks. It must be anticipated, funded and scheduled an appropriate maintenance, to ensure a successful long-term.*

**Key words:** *Decentralized Rural Electrification, Solar Energy, Reliability of Photovoltaic Systems.*