

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA BASADO EN UN INVERSOR BIDIRECCIONAL DE 5 kVA Y UNA BATERÍA DE LiFePO₄ DE 48 V / 4,8 kWh

Julio C. Durán^{1,2}, Elena M. Godfrin¹, Alejandro Krautner³

¹Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes, CNEA

²Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)

³Gerencia Investigación y Aplicaciones

Av. General Paz 1499, (B1650) San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Tel. +54 911 68157472 – e-mail: jcduran.cnea@gmail.com

Recibido 07/08/2025; Aceptado 10/10/2025

RESUMEN.- Se evalúa la eficiencia de un sistema de almacenamiento de energía con generación fotovoltaica (FV), instalado en una vivienda de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en base a datos de monitoreo del año 2024. El sistema consta de un inversor bidireccional de 5 kVA, una batería de LiFePO₄ (LFP) de 48 V / 4,8 kWh, y generación FV acoplada en corriente alterna (1,9 kWp) y en corriente continua (1,1 kWp), y está configurado para operar en el modo de autoconsumo. La eficiencia media anual fue de 95,4 % para la conversión de corriente continua a alterna, 92,6 % para la conversión de alterna a continua, y 96 % en los ciclos de carga/descarga de la batería, resultando una eficiencia global del sistema de 92 %. El uso de sistemas de almacenamiento asociados con generación FV permite gestionar la energía, aumentando el autoconsumo, reduciendo el consumo de red y recortando picos, resultando clave en sistemas eléctricos con alta penetración de generación FV.

Palabras clave: almacenamiento de energía, inversor bidireccional, batería de litio-ion, energía solar fotovoltaica, generación distribuida, eficiencia.

EFFICIENCY ASSESSMENT OF A PHOTOVOLTAIC ENERGY STORAGE SYSTEM BASED ON A 5 kVA BIDIRECTIONAL INVERTER AND A 48 V / 4.8 kWh LiFePO₄ BATTERY

ABSTRACT.- The efficiency of an energy storage system with photovoltaic (PV) generation, installed in a home in the Autonomous City of Buenos Aires, is evaluated based on monitoring data from 2024. The system consists of a 5 kVA bidirectional inverter, a 48 V / 4.8 kWh LiFePO₄ (LFP) battery, and PV generation coupled to alternating current (1.9 kWp) and direct current (1.1 kWp), and is configured to operate in self-consumption mode. The average annual efficiency was 95.4 % for direct current to alternating current conversion, 92.6 % for alternating current to direct current conversion, and 96 % for battery charge/discharge cycles, resulting in an overall system efficiency of 92 %. The use of storage systems associated with PV generation allows energy to be managed, increasing self-consumption, reducing grid consumption, and cutting peaks, which is key in electrical systems with high PV generation penetration.

Keywords: renergy storage, bidirectional inverter, lithium-ion battery, photovoltaic solar energy, distributed generation, efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes renovables – especialmente solar y eólica –, el uso racional y eficiente de la energía, la electrificación y el almacenamiento de energía son pilares fundamentales de la transición

energética hacia un modelo de emisiones netas cero al año 2050 (Breyer et al, 2022).

Desde 2012, más de la mitad de la nueva potencia eléctrica instalada en el mundo anualmente ha sido de fuentes renovables,



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

habiendo representado en 2024 más del 90 % del mercado anual global (REN21, 2022; REN21,2024). En la Unión Europea, por primera vez, la generación FV y eólica superó a la basada en combustibles fósiles, mientras que en Estados Unidos representó el 16 % de la matriz eléctrica, superando al carbón (IEA, 2025a). A nivel global, dichas tecnologías pasaron de cubrir menos del 3 % de la matriz eléctrica en 2012 a más del 13 % en 2023 (IEA, 2025a).

La energía solar fotovoltaica (FV) ha experimentado en los últimos años un crecimiento exponencial, consolidándose como una tecnología clave para la descarbonización del sector eléctrico. Dicho crecimiento ha sido impulsado, en gran medida, por la irrupción de la industria china en el mercado global, que permitió una drástica reducción de costos en los módulos FV: de aproximadamente 4 USD/W a principios de siglo, a menos de 0,10 USD/W en la actualidad. Como resultado de ello, en numerosas regiones, la energía solar se ha convertido en una alternativa más económica que las fuentes convencionales.

Los sistemas FV se clasifican en autónomos y conectados a red. Los primeros tienen aplicaciones sociales relevantes, como la reducción de la pobreza energética, contribuyendo al cumplimiento del ODS 7 de Naciones Unidas. Entre 2015 y 2023, la población mundial sin acceso a la electricidad se redujo de 958 a 666 millones de personas (IEA, 2025b).

Los sistemas conectados a red se dividen, a su vez, en generación distribuida y centralizada, abarcando desde unos pocos Watts hasta centenas de MW. La generación distribuida, próxima al punto de consumo, ofrece múltiples beneficios: reducción de pérdidas, regulación de tensión, generación de empleo local y disminución de costos. Gracias a su modularidad, la FV es la fuente renovable más utilizada en edificaciones residenciales, comerciales e industriales.

El almacenamiento de energía eléctrica a gran escala juega un papel relevante en el escenario de emisiones netas cero para el año 2050 (IEA, 2022), proporcionando importantes servicios que contribuyen a facilitar la inserción de energías renovables, reducir picos de demanda, disminuir pérdidas de transporte, moderar la necesidad de inversión en infraestructura y reducir los requerimientos de sistemas de reserva (*back-up*) basados en combustibles fósiles. Si bien el almacenamiento de energía eléctrica puede estar conectado en las áreas de transporte o de distribución, el almacenamiento ubicado cerca del consumo es el que más servicios puede ofrecer al sistema eléctrico en general (Fitzgerald et al., 2015).

El uso de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (*BESS, Battery Energy Storage System*) en instalaciones de usuarios del sistema eléctrico con sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red interna permite aumentar el autoconsumo de la energía generada, minimizando la inyección de excedentes a la red pública. Esto es particularmente importante para usuarios residenciales donde, típicamente, menos del 50 % de la energía generada se consume en la vivienda debido al desfase entre la generación y el consumo (ver, por ejemplo, Godfrin et al., 2022).

El presente trabajo es continuación del publicado en la revista AVERMA en el año 2023 (Durán et al., 2023), donde se presentó el análisis del funcionamiento de un sistema de almacenamiento residencial con generación FV y se calculó el ahorro anual en el servicio eléctrico. En esta oportunidad, se evalúa el funcionamiento del mismo sistema en el año 2024 y se calculan las eficiencias del inversor bidireccional (inversor/cargador), de la batería y del sistema completo.

2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ARGENTINA

Argentina tiene alrededor del 91 % de población urbana (INDEC, 2025), muy superior a la media mundial y por encima de la media regional. Como consecuencia de ello, la mayor parte de su consumo eléctrico está concentrado en áreas urbanas. Dadas estas características y la disponibilidad de recurso solar apropiado, la utilización masiva de generación FV distribuida ubicada en áreas urbanas y periurbanas contribuirá en forma significativa a la transición hacia una matriz eléctrica más limpia y sostenible. Sin embargo, una participación importante de generación FV en la matriz requerirá el uso de sistemas de almacenamiento que contribuyan a manejar la variabilidad del recurso y a compensar los desacoplamientos entre oferta y demanda, ayudando en particular a cubrir los picos de consumo vespertinos, asociados esencialmente a los usuarios residenciales. En 2024 el consumo residencial representó el 46,7 % del consumo total del país (CMMESA, 2024).

La Ley 27.424, promulgada a fin del año 2017 y reglamentada mediante el Decreto 986/2018, estableció un régimen de fomento para la generación distribuida mediante energías renovables, que habilita a los usuarios a instalar sistemas de generación de electricidad a partir de fuentes renovables conectados a la red eléctrica pública para autoconsumo e inyección de excedentes. En junio de 2025, el Régimen de Generación Distribuida (Ley 27.424) contaba con 18 jurisdicciones adheridas, 339 Distribuidoras y Cooperativas inscriptas en la plataforma, y una potencia total instalada de 78 MW en 2918 usuarios-generadores (Ministerio de Economía, 2025).

El Decreto DNU 70/2023 del Poder Ejecutivo Nacional de diciembre de 2023 (DNU, 2023), “Bases para la reconstrucción de la economía argentina”, derogó los artículos 16 a 37 de la Ley 27.424, correspondientes a los siguientes capítulos:

- Capítulo V – Fondo Fiduciario para el Desarrollo de la Generación Distribuida
- Capítulo VI – Beneficios promocionales
- Capítulo VII – Régimen de fomento de la industria nacional

La eliminación de todas las herramientas de promoción previstas originalmente en la Ley 27.424, “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”, modificó drásticamente el espíritu de la ley.

Con anterioridad a la ley nacional, algunas jurisdicciones desarrollaron regulaciones para la generación distribuida. Santa Fe fue la primera provincia en habilitar la generación eléctrica distribuida en baja tensión para usuarios particulares, en el año 2013, y en 2024 adhirió a la Ley 27.424 (Santa Fe, 2024). Luego se sumaron las provincias de Salta (2014), que hasta el momento no adhirió a la Ley 27.424, y Mendoza (2015), que posteriormente adhirió a la Ley 27.424 (Mendoza, 2018). En Videla et al. (2023) puede verse una descripción de las diferentes regulaciones sobre generación distribuida mediante energías renovables en las jurisdicciones del país con mayor desarrollo de esta tecnología.

En lo referente a cuestiones técnicas, la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) emitió en el año 2015 la Reglamentación AEA 90364-7-712 (AEA, 2015), “Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos”, que no contempla sistemas con acumulación de energía. En la actualidad, se encuentra en etapa de desarrollo una actualización de dicha reglamentación, AEA 90364-7-712 Edición 02 “Sistema de suministro mediante generadores fotovoltaicos”, que amplía el alcance de la Edición

2015 incluyendo sistemas de almacenamiento de energía. Asimismo, a mediados de 2025 la AEA emitió la reglamentación AEA 90364-8-2 “Instalaciones eléctricas de prosumidores en baja tensión” (AEA, 2025), basada en la IEC 60364-8-82:2022 (IEC, 2023), que se aplica a instalaciones conectadas o no a una red de distribución capaces de operar con fuentes de alimentación y/o unidades de almacenamiento locales.

Por su parte, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) publicó, en el año 2023, la Norma IRAM 210025, Energía solar – Inversores bidireccionales para la conexión a la red de distribución – Requisitos generales (IRAM, 2023).

3. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA RESIDENCIAL EN CIUDAD DE BUENOS AIRES

El sistema de almacenamiento bajo estudio se encuentra instalado en una vivienda unifamiliar ubicada en el barrio de Saavedra de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), dentro del área de concesión de la Empresa Distribuidora y Comercializadora Norte (EDENOR S.A.). La vivienda tiene una superficie cubierta de 80 m² y un consumo anual de electricidad de aproximadamente 4.000 kWh. El acondicionamiento de aire se realiza mediante equipos eléctricos, esencialmente con equipos de aire acondicionado frío/calor de tecnología Inverter. El resto del equipamiento eléctrico incluye 1 heladera de 300 dm³ (sin freezer), 1 freezer de 207 dm³, 1 lavarropas, 1 lavavajillas, 2 televisores, 1 horno a microondas, 1 horno eléctrico, 2 computadoras portátiles, pequeños electrodomésticos y luminarias (en su amplia mayoría LED).

La Figura 1 muestra la configuración del sistema de almacenamiento con generación FV acoplada en corriente alterna (inversor FV de conexión a red, on-grid) y en corriente continua (regulador de tensión con seguidor de punto de máxima potencia MPPT), que cuenta con los siguientes componentes (Victron, 2022):

- Inversor/cargador Victron MultiPlus-II GX 48/5000/70-50, con una potencia continua máxima de salida de 4 kW a 25°C y 3,7 kW a 40°C (Victron, 2023a).

- Batería de LiFePO₄ (LFP) Pylontech UP5000, con tensión nominal de 48 V, capacidad nominal de 4,8 kWh, capacidad utilizable de 4,56 kWh y una profundidad máxima de descarga del 95 % (Pylontech, 2023).
- 1 inversor FV SMA Sunny Boy 1.5 de 1,5 kW (SMA, 2021).
- 7 módulos FV de silicio policristalino de 275 Wp, Amerisolar modelo AS-6P30 (Amerisolar, 2017), orientados a 32° al oeste del norte (Azimut \cong -32°), siguiendo la orientación de la construcción, con una inclinación de 15° con respecto al plano horizontal, y conectados en serie.
- Protecciones según lo especificado en la reglamentación vigente, AEA 90364-7-712 (AEA, 2015).
- 1 regulador de carga Victron modelo SmartSolar MPPT 150/35, para baterías de 12, 24, 36 o 48 V con selección automática y una potencia FV nominal de 2 kW (Victron, 2023b).
- 2 módulos FV de silicio monocristalino de 550 Wp, Jinko modelo JKM550M-72HL4-V (Jinko, 2023), orientados a 58° al este del norte (Azimut \cong 58°), con una inclinación de 10° con respecto al plano horizontal, y conectados en serie.

El dispositivo de control integrado en el inversor/cargador gestiona el sistema de almacenamiento, comunicándose con otros componentes a través de diferentes interfaces de comunicación (interfaz BMS-Can, puertos USB, Ethernet y VE.Direct).

4. MODOS DE OPERACIÓN, CONFIGURACIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Un sistema híbrido con almacenamiento en baterías y fuentes de generación distribuida tiene tres modos de operación:

- Aislado o autónomo (*stand-alone*), no conectado a la red de distribución.
- Sistema de reserva de energía (*back-up*) ante cortes del suministro eléctrico.
- Autoconsumo, con el objetivo de minimizar el consumo desde la red eléctrica del distribuidor y maximizar el autoconsumo de la energía FV generada.

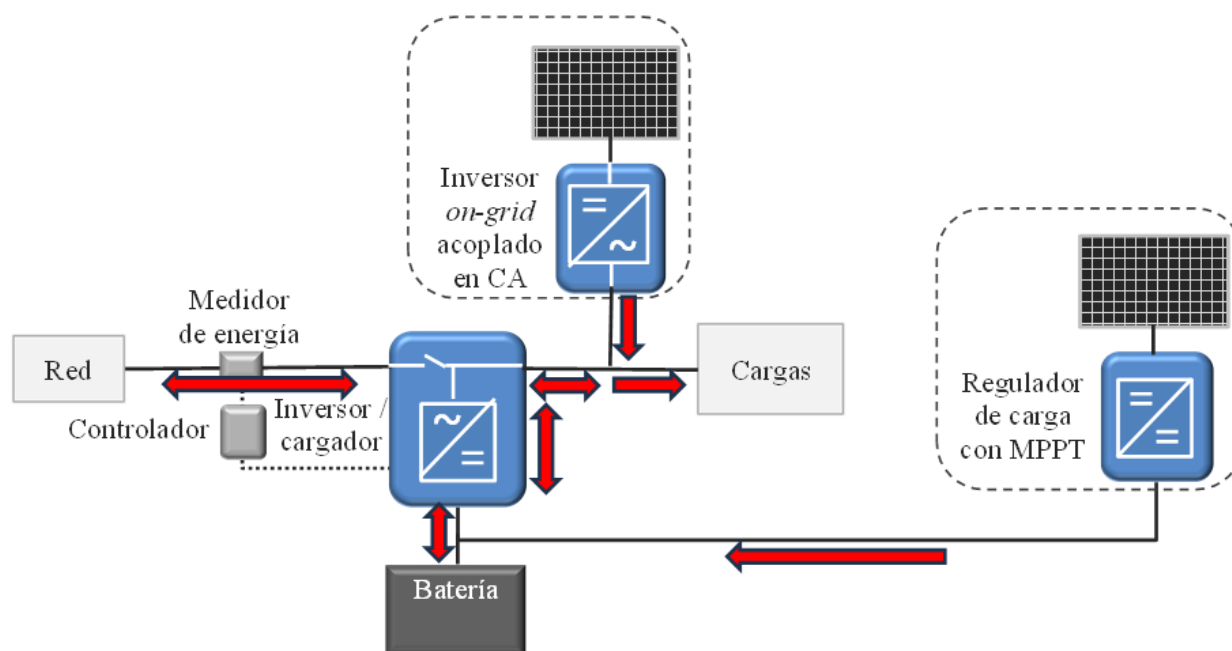


Fig. 1: Sistema de almacenamiento de energía con generación FV acoplada en corriente alterna y en corriente continua.

El portal web VRM (VRM, 2025) permite monitorear, controlar y gestionar de forma remota a través de internet y en tiempo real instalaciones fotovoltaicas basadas en equipos Victron Energy. Las múltiples funciones de este portal incluyen:

- Monitorización remota: visualización y registro de datos, a intervalos de tiempo programable, tales como producción fotovoltaica, consumo de energía, flujo de energía entre los diferentes componentes del sistema, estado de la batería y otros parámetros relevantes de la instalación.
- Gestión remota: ajuste de configuraciones de los dispositivos que componen el sistema, actualización del *firmware* de los equipos, programación de los interruptores de relé, etc., sin necesidad de acceder físicamente a la instalación.
- Detección de fallas: detección temprana de anomalías en el sistema, gracias a la posibilidad de configurar alertas y alarmas.

Para utilizar VRM se necesita un dispositivo “inteligente” GX (Victron, 2025) conectado al sistema fotovoltaico. Este dispositivo actúa como centro de comunicaciones entre los diferentes componentes del sistema. El inversor/cargador Victron Multi-Plus-II GX tiene integrado el dispositivo GX.

El modo Autoconsumo cuenta con dos alternativas de funcionamiento, (i) optimizado protegiendo la batería (que Victron denomina *optimized with battery life*) y (ii) optimizado sin contemplar la vida de la batería (*optimized without battery life*). En el modo *optimized with battery life* el sistema ajusta diariamente algunos parámetros del funcionamiento del BESS, en particular la máxima profundidad de descarga, teniendo en cuenta las previsiones de generación FV y consumo para 7 días a futuro. Ello implica que, en algunas épocas del año, típicamente en los meses de menor radiación solar, el estado de carga (State of Charge, SOC) mínimo activo resulta superior al establecido por el usuario.

El sistema se configuró en modo autoconsumo optimizado con cuidado de la batería (*optimized with battery life*), con SOC mínimo igual a 30 %, y con un intervalo de registro de los parámetros de la instalación cada 5 minutos.

5. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO Y ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA GLOBAL

El análisis del funcionamiento del sistema se realizó considerando las siguientes variables, medidas por el inversor/cargador y registradas en la plataforma VRM, a excepción de la generación FV acoplada en CA, que se obtuvo de la plataforma Sunny Portal de SMA. Todas las variables corresponden a la potencia media (en kW) en los intervalos de registro, 5 minutos en VRM y 15 minutos en Sunny Portal.

P_{Input} [kW]: flujo de energía eléctrica de la red eléctrica de la distribuidora a la entrada (*Input*) del inversor/cargador. Los valores positivos corresponden a consumo desde la red y los negativos a inyección a red.

P_{Output} [kW]: flujo de energía eléctrica en la salida (*Output*) del inversor/cargador. Los valores positivos corresponden a flujo de energía desde el inversor/cargador hacia el circuito interno de la vivienda, o sea a consumo de las cargas de la vivienda mayor a la generación FV acoplada en CA.

P_{FVCA} [kW]: potencia eléctrica entregada por el inversor on-grid SMA Sunny Boy 1.5 conectado a la red interna de la vivienda (generación FV acoplada en CA).

P_{Cargas} [kW]: consumo eléctrico de las cargas de la vivienda, dado por la Ec. (1).

$$P_{Cargas} = P_{Output} + P_{FVCA} \quad (1)$$

P_{FVCC} [kW]: potencia eléctrica entregada por el regulador de carga SmartSolar MPPT (generación FV acoplada en CC).

P_{FV} [kW]: generación FV total, definida en Ec. (2).

$$P_{FV} = P_{FVCA} + P_{FVCC} \quad (2)$$

P_{Bat} [kW]: flujo de energía eléctrica de carga/descarga de la batería. Los valores positivos corresponden a carga y los negativos a descarga.

P_{Total} [kW]: consumo eléctrico total de la vivienda, incluyendo pérdidas en el inversor/cargador y en los procesos de carga y descarga de la batería, dado por la Ec. (3).

$$P_{Total} = P_{Input} + P_{FV} \quad (3)$$

El consumo de red y la inyección a red de la instalación en un período determinado se obtienen mediante las Ecs. (4) a (9).

$$\text{Consumo de red [kWh]} = \sum_{P_{Input} > 0} P_{Input} * \Delta t \quad (4)$$

$$\text{Inyección a red [kWh]} = \sum_{P_{Input} < 0} P_{Input} * \Delta t \quad (5)$$

$$\text{Generación FV [kWh]} = \sum P_{FV} * \Delta t \quad (6)$$

$$\text{Generación FV autoconsumida} = \text{Generación FV} - \text{Inyección a red} \quad (7)$$

$$\text{Consumo de las cargas [kWh]} = \sum (P_{Output} + P_{FVCA}) * \Delta t \quad (8)$$

$$\text{Consumo total [kWh]} = \text{Consumo de red} + \text{Generación FV} - \text{Inyección a red} \quad (9)$$

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para los 12 meses del año 2024. Se observa que el sistema de almacenamiento está subdimensionado en relación con la potencia FV instalada, dando lugar a períodos del año en los cuales hubo excedentes de energía que fueron inyectados a la red pública y no pudieron ser almacenados para reducir el consumo de red.

El consumo total de la vivienda se incrementa con el agregado del almacenamiento como consecuencia de las pérdidas en el inversor bidireccional y en los ciclos de carga y descarga de la batería, pasando de 3.856 kWh/año en la instalación sin almacenamiento a 4.177 kWh/año, con una eficiencia global a lo largo del año de aproximadamente 92 %.

La Figura 2 muestra el consumo mensual de energía entre enero y diciembre de 2024, discriminado en energía aportada por FV (barra en amarillo) y consumida de la red (barra en rojo), y la energía solar inyectada a la red pública (cuadrado en verde). Los meses de mayor consumo y baja generación FV (mayo a agosto) muestran una baja inyección de excedentes. Por el contrario, en los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre hubo una elevada inyección de excedentes, superando en algunos casos el autoconsumo, como consecuencia, en parte, del subdimensionamiento del banco de baterías.

Tabla 1: Valores mensuales de consumo de red, inyección a red, generación FV, autoconsumo, consumo de las cargas, consumo total y eficiencia del BESS para el año 2024.

Mes	Consumo de red [kWh]	Inyección a red [kWh]	Generación FV [kWh]	Energía FV autocons. [kWh]	Consumo cargas [kWh]	Consumo total [kWh]	Eficiencia global del sistema
ene-24	38	354	530	175	184	213	86%
feb-24	98	203	402	199	268	297	90%
mar-24	54	186	365	179	204	232	88%
abr-24	98	93	243	150	223	248	90%
may-24	337	28	207	180	492	516	95%
jun-24	275	21	182	161	415	436	95%
jul-24	481	26	241	215	674	696	97%
ago-24	390	30	220	190	558	580	96%
sep-24	137	143	341	197	308	334	92%
oct-24	42	211	397	186	197	228	86%
nov-24	41	265	431	166	177	207	86%
dic-24	32	329	485	156	155	188	82%
Anual	2023	1891	4045	2155	3856	4177	92%

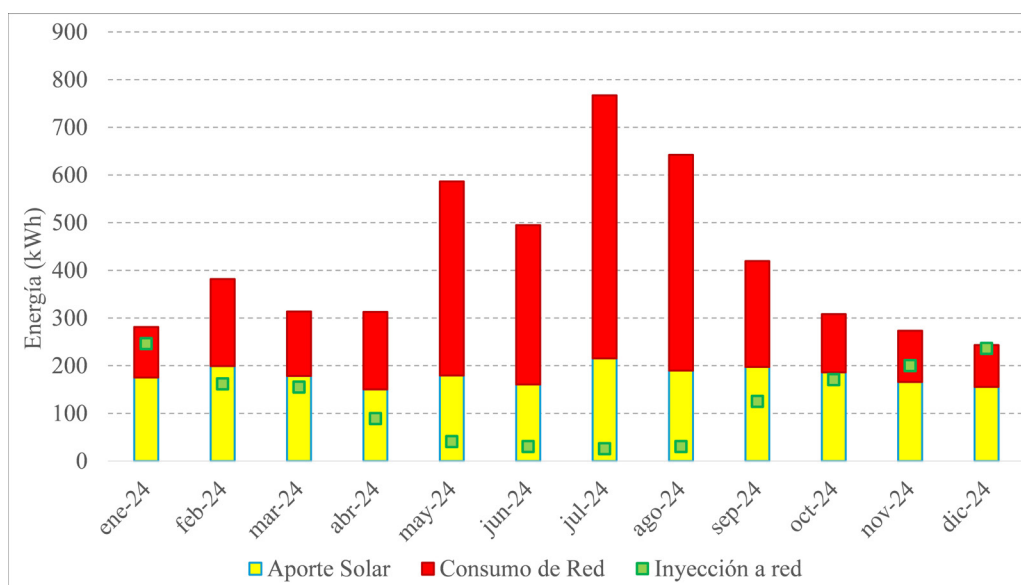


Fig. 2: Consumo mensual de energía entre enero y diciembre de 2024, discriminado en energía aportada por FV y consumida de la red, y energía solar inyectada a la red.

El cálculo de los ahorros en el pago del servicio eléctrico fue presentado en Durán et al. (2023).

6. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL INVERSOR/ CARGADOR Y LA BATERÍA

La eficiencia global del BESS está determinada, principalmente, por los siguientes procesos: ciclo de carga/descarga de la batería y conversión de CC en CA y de CA en CC en el inversor/cargador. Para evaluar el peso relativo de las pérdidas en estos procesos, se utilizaron los valores de la potencia eléctrica media horaria en cada rama del circuito eléctrico del BESS, para todas las horas (8784) del año 2024. Dichos valores se calcularon a partir de los datos de monitoreo (en intervalos de 5 minutos) del portal VRM de Victron. No se analizaron las eficiencias de conversión CA-CC

en el inversor Sunny Boy 1.5 (no se dispone de datos del lado de continua) ni CC-CC en el regulador de carga SmartSolar MPPT.

6.1 Eficiencia de conversión CC – CA y CA – CC

Para evaluar las eficiencias de conversión de continua a alterna y de alterna a continua, se definieron 2 nuevas variables:

$$P_{CC} = P_{FVCC} - P_{Bat} \quad (10)$$

$$P_{CA} = P_{Input} - P_{Output} \quad (11)$$

P_{CC} es el flujo de energía por la rama del circuito conectada al lado de continua del inversor/cargador. Es positiva cuando hay flujo de energía del lado de continua al lado de alterna a través del inversor, y negativa cuando el flujo es en sentido contrario.

P_{CC} es mayor que 0 cuando la potencia generada por el sistema FV acoplado en continua es mayor que la potencia de carga de la batería o cuando la batería está entregando potencia.

Por su parte, P_{CA} es el flujo de energía por la rama del circuito conectada a lado de alterna del inversor/cargador. Es positiva cuando hay flujo de energía del lado de alterna al lado de continua a través del inversor, y negativa cuando el flujo es en sentido contrario. Cuando hay flujo de energía de continua a alterna, P_{CA} es negativa ($P_{Output} > P_{Input}$). Por el contrario, cuando hay excedente de generación FV acoplada en alterna, P_{CA} es positiva ($P_{Output} < 0$).

La Figura 3 muestra, en un gráfico de $(P_{Output} - P_{Input})$ en función de $(P_{FVCC} - P_{Bat})$, los puntos correspondientes a las horas del año en que hay flujo de energía del lado de continua al lado de alterna. Se excluyeron los puntos con potencias inferiores a 0,05 kW (50 W) dado que tienen una dispersión relativamente grande y no corresponden claramente a un flujo de energía entre continua y alterna. Se observa una buena correlación ($R^2 = 0,9969$), con

una eficiencia de conversión de 95,4 % con una dispersión de 0,1 %. El resultado obtenido está en buen acuerdo con la eficiencia máxima del inversor informada por el fabricante (96 %) en la hoja técnica del equipo (Victron, 2023a).

La Figura 4 muestra, en un gráfico de $(P_{Bat} - P_{FVCC})$ en función de $(P_{Input} - P_{Output})$, los puntos correspondientes a las horas del año en que hay flujo de energía del lado de alterna al lado de continua. Se excluyeron los puntos con potencias inferiores a 0,05 kW. Se observa una buena correlación ($R^2 = 0,9906$), con una eficiencia de conversión de 92,6 % con una dispersión de 0,3 %.

6.2 Eficiencia del ciclo carga-descarga de la batería

La eficiencia del ciclo carga-descarga de la batería depende de múltiples factores, pero principalmente de la corriente de carga, la corriente de descarga y la profundidad de descarga en cada ciclo. En consecuencia, la eficiencia de la batería varía permanentemente según el consumo y la generación.

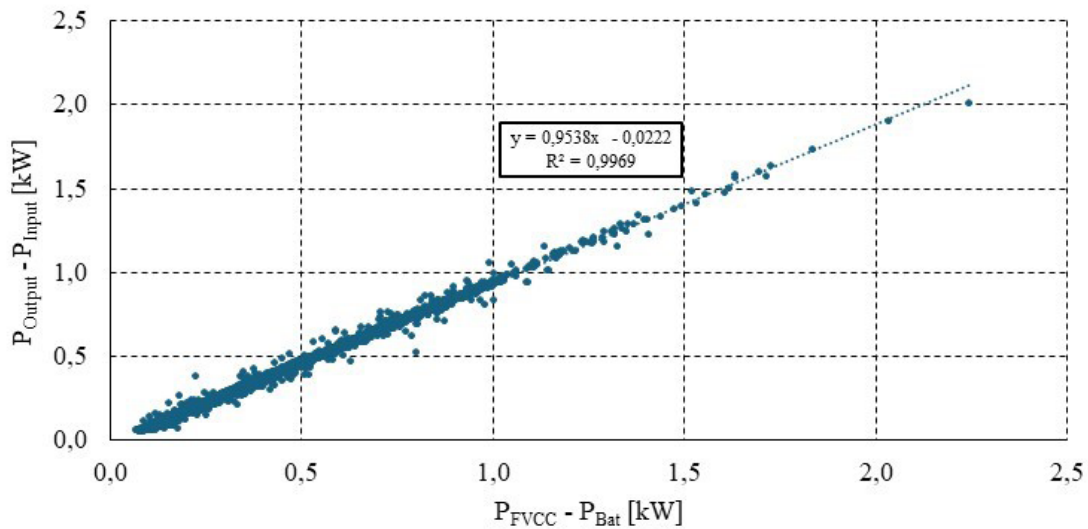


Fig. 3: $(P_{Output} - P_{Input})$ en función de $(P_{FVCC} - P_{Bat})$ para las horas del año en que hay flujo de energía del lado de continua al lado de alterna.

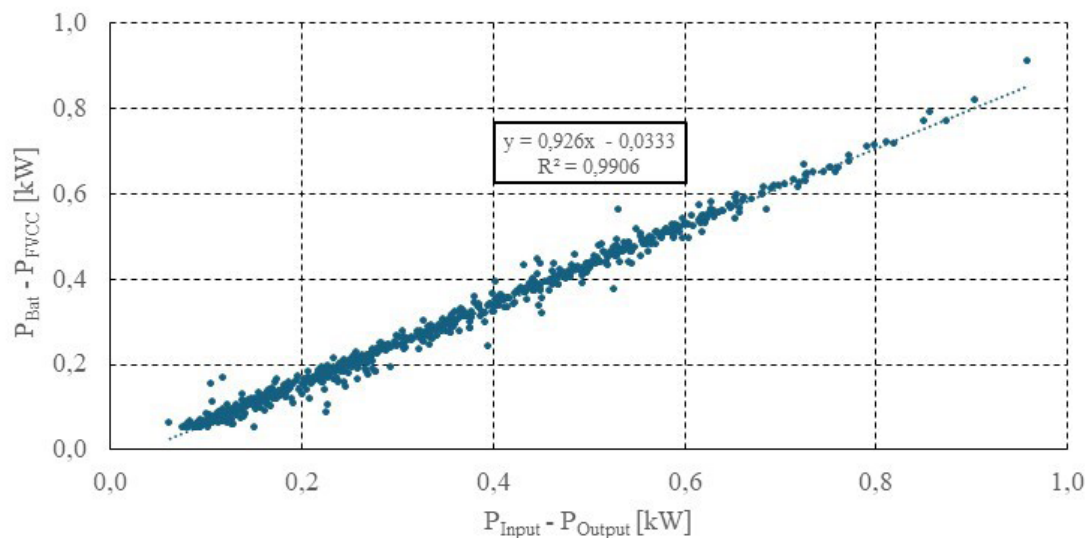


Fig. 4: $(P_{Bat} - P_{FVCC})$ en función de $(P_{Input} - P_{Output})$ para las horas del año en que hay flujo de energía del lado de alterna al lado de continua.

Tabla 2: Valores mensuales y anual de la energía de carga, la energía de descarga y la eficiencia de la batería.

Mes	Energía de Carga [kWh]	Energía de Descarga [kWh]	Eficiencia
Enero	82,7	79,8	96%
Febrero	92,8	90,7	98%
Marzo	93,9	91,4	97%
Abril	77	72,7	94%
Mayo	68,9	66,1	96%
Junio	58,9	56,4	96%
Julio	59	55,5	94%
Agosto	57,3	53,8	94%
Septiembre	90,7	89,5	99%
Octubre	90,1	88,1	98%
Noviembre	82,6	80,1	97%
Diciembre	76,7	68,1	89%
2024	931	892	96%

Utilizando los valores de potencia media de carga/descarga en intervalos de 5 minutos, provistos por el portal VRM, se calcularon la energía recibida y la energía entregada por la batería mensualmente y en el año. Para cada mes, se seleccionó un intervalo de tiempo con igual estado de carga inicial y final, de manera que abarcara un número completo de ciclos de carga/descarga. La Tabla 2 muestra los valores de la eficiencia del conjunto de ciclos de carga/descarga correspondiente a cada mes del año y al año completo. La eficiencia media anual obtenida (96 %) es levemente superior a los valores publicados (92 % a 95 %) en Madej y Wojciechowski (2021) para baterías de la misma tecnología (LiFePO₄).

7. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la eficiencia de un sistema residencial de almacenamiento de energía acoplado a generación fotovoltaica en un entorno urbano de Buenos Aires durante el año 2024. Los resultados muestran un rendimiento apropiado con una operación estable bajo el modo de autoconsumo optimizado con cuidado de la batería (optimized with battery life), destacándose las siguientes conclusiones:

- La eficiencia media anual del inversor/cargador fue de 95,4 % en conversión de corriente continua a alterna y 92,6 % de corriente alterna a continua.
- El ciclo de la batería de LiFePO₄ presentó una eficiencia promedio anual de 96 %.
- El consumo anual de la vivienda (consumo de red + generación FV) pasó de 3.856 kWh (sin BESS) a 4.177 kWh (con BESS) debido a pérdidas en el inversor/cargador y en los ciclos de carga-descarga de la batería, resultando una eficiencia anual global del sistema de 92 %.
- El sistema de almacenamiento permitió incrementar el autoconsumo de energía solar y reducir la dependencia de la red.

Las fluctuaciones estacionales, tanto de generación como de demanda, han conducido a un mayor aprovechamiento de la energía FV en meses de baja radiación, mientras que en verano y primavera se han observado inyecciones de excedentes a la red que sugieren un subdimensionamiento del banco de baterías respecto de la capacidad fotovoltaica instalada.

Asimismo, se identificaron puntos concretos a considerar para facilitar el avance del uso de estos sistemas.

- Optimización económica: análisis de rentabilidad con distintos escenarios tarifarios, tarifas variables según bandas horarias y configuraciones técnicas (capacidad del banco de baterías, potencias del inversor y del campo FV).
- Evaluación ambiental: estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero atribuible al autoconsumo solar y al almacenamiento.
- Modelos predictivos de operación: desarrollo de algoritmos de gestión que ajusten la operación del BESS según pronósticos de irradiación y perfil de demanda.
- Escalamiento y recomendaciones regulatorias: exploración de esquemas comunitarios (microrredes, barriales, etc.) y propuestas normativas orientadas a mejorar accesibilidad, eficiencia y resiliencia de sistemas FV+BESS.

En cuanto al marco regulatorio, la derogación de los capítulos de la Ley 27.424 correspondientes a las herramientas de promoción de la generación distribuida podría afectar el despliegue de sistemas FV con almacenamiento en el sector residencial.

En resumen, se ha aportado evidencia sobre la viabilidad técnica y los beneficios de sistemas residenciales FV+BESS en áreas urbanas. Estudios como el presentado en este trabajo contribuyen a un correcto dimensionamiento de sistemas híbridos basados en fuentes renovables variables y almacenamiento en baterías.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Jorge Jakimczyk y Pablo Maril por el asesoramiento técnico y la certificación del cumplimiento de la normativa vigente, para el registro de la instalación en la plataforma de la Secretaría de Energía para sistemas de generación distribuida.

NOMENCLATURA

P_{Bat} [kW]: flujo de energía eléctrica de carga/descarga de la batería. Valores positivos corresponden a carga y negativos a descarga.

P_{FV} [kW]: generación FV total.

P_{Cargas} [kW]: consumo eléctrico de las cargas de la vivienda.

P_{FVCA} [kW]: potencia eléctrica generada por el sistema FV on-grid conectado a la red interna de la vivienda (acoplado en CA).

P_{FVCC} [kW]: potencia eléctrica generada por el sistema FV acoplado en CC.

P_{Input} [kW]: flujo de energía eléctrica de la red eléctrica de la distribuidora a la entrada (Input) del inversor/cargador. Valores positivos corresponden a consumo desde la red y negativos a inyección a red.

P_{Output} [kW]: flujo de energía eléctrica en la salida (Output) del inversor/cargador. Valores positivos corresponden a flujo de energía desde el inversor/cargador hacia el circuito interno de la vivienda.

P_{Total} [kW]: consumo eléctrico total de la vivienda.

REFERENCIAS

- AEA (2015). AEA 90364 - Parte 7 - Sección 712, "Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos", Asociación Electrotécnica Argentina. Dirección URL: <https://aea.org.ar/?s=90364-7-712>
- AEA (2025). Reglamentación AEA 90364-8-82 Eficiencia energética en las instalaciones eléctricas de baja tensión. Sección 82 – Prosumidores en BT. Edición 2025. Dirección URL: <https://aea.org.ar/producto/aea-90364-8-eficiencia-energetica-en-las-instalaciones-electricas-de-baja-tension-seccion-2-prosumidores-de-bt/>
- Amerisolar (2017). Módulo Fotovoltaico Policristalino AS-6P30, Amerisolar. Dirección URL: <https://www.weamerisolar.eu/wp-content/uploads/2017/03/AS-6P30-Module-Specification.pdf>
- Breyer et al. (2022). On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research. IEEEAccess Vol. 10, 78176-78218. Dirección URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9837910>
- CAMMESA (2024). Resumen Anual 2024. Mercado Eléctrico Mayorista. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. Dirección URL: <https://cammesaweb.cammesa.com/variables-relevantes-del-mem-resumen-anual/>
- DNU (2023). Decreto DNU 70/2023 del Poder Ejecutivo Nacional de diciembre de 2023, "Bases para la reconstrucción de la economía argentina". Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-70-2023-395521>
- Durán J.C., Godfrin E.M. y Krautner A. (2023). Análisis del funcionamiento de un sistema residencial de almacenamiento de energía con generación fotovoltaica durante un año de operación, AVERMA, Vol. 27, pp. 239-250.
- Fitzgerald, G., Mandel, J., Morris, J., Touati, H. (2015). The Economics of Battery Energy Storage: How multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. Rocky Mountain Institute, September 2015. Dirección URL: <https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>
- Godfrin, E.M., Krautner, A., Durán, J.C. (2022). Análisis de un sistema fotovoltaico con almacenamiento conectado a red en una vivienda unifamiliar en la Ciudad de Buenos Aires: autoconsumo, inyección a red y ahorros en la factura del servicio eléctrico, AVERMA, Vol. 26, pp. 103-114 (2022).
- IEA (2022) Grid-Scale Storage, International Energy Agency (IEA). Dirección URL: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>
- IEA (2025a). Global Energy Review 2025, IEA. Dirección URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- IEA (2025b). Tracking DSG7, The Energy Progress Report 2025, IEA / IRENA / UN / The World Energy Bank / World Health Organization. Dirección URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2025>
- IEC (2023). IEC 60364-8-82:2022, Low-voltage electrical installations - Part 8-82: Functional aspects - Prosumer's low-voltage electrical installations, International Electrotechnical Commission. Dirección URL: <https://webstore.iec.ch/publication/66287>
- INDEC (2025). Encuesta Permanente de Hogares (EPH) total urbano - Resumen ejecutivo – Principales tasa del tercer trimestre de 2024, INDEC. Dirección URL: https://www.indec.gob.ar/uploads/informesdeprensa/eph_total_urbano_02_2537391AF8E3.pdf
- IRAM (2023). <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/13057>
- Jinko (2023). Tiger Pro 72HC 530-550 Watt Monofacial Module, Datasheet, Jinko Solar. Dirección URL: [https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf)
- Madej W. y Wojciechowski A. (2021). Analysis of the Charging and Discharging Process of LiFePO4 Battery Pack. Energies 2021, 14, 4055. Dirección URL: <https://doi.org/10.3390/en14134055>
- Mendoza (2018). Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, Ley 9084, Poder Legislativo Provincial, Mendoza. Dirección URL: <https://argentiniambiental.com/legislacion/mendoza/ley-9084-regimen-fomento-la-generacion-distribuida-energia-renovable-integrada-la-red-electrica-publica/>
- Ministerio de Economía (2025). Generación Distribuida en Argentina, Evolución de trámites, Conexión de usuario-generador, junio 2025, Ministerio de Economía. Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida/reportes-de-avance-implementacion-de-la-ley-27424>
- Pylontech (2023). Pylontech UP5000. Dirección URL: <https://www.teci.co.za/wp/wp-content/uploads/2021/02/UP5000-V1.0-Product-Manual.pdf>
- REN21 (2022). Renewables 2022, Global Status Report, REN21. Dirección URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
- REN21 (2024). Renewables 2024, Global Status Report, REN21. Dirección URL: <https://www.ren21.net/gsr-2024/>
- Santa Fe (2024). Ley N° 14259, Legislatura de la Provincia de Santa Fe. Dirección URL: <https://www.santafe.gob.ar/boletin-oficial/ver.php?seccion=2024/2024-04-26ley14259-2024.html>
- SMA (2021). Sunny Boy 1.5 / 2.0 / 2.5, SMA Solar Technology AG. Dirección URL: <https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-boy-15-20-25.html>

- Victron (2022). Manual de diseño es instalación de ESS, Rev 06 09/2022, Victron Energy. Dirección URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Energy_Storage_System/6292-ESS_design_and_installation_manual-pdf-es.pdf
- Victron (2023a). Hoja Técnica MultiPlus-II GX, Victron Energy. Dirección URL: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-MultiPlus-II-GX-inverter-charger-ES.pdf>
- Victron (2023b). Controlador de carga SmartSolar MPPT 150/35, Victron Energy. Dirección URL: <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-150-35-&-150-45-ES.pdf>
- Victron (2025). Gama de productos Victron GX, Victron Energy. Dirección URL: <https://www.victronenergy.com/live/venus-os:start>
- Videla, M., Krautner, A., Eyra, I., Durán, J.C., Plá, J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica en Argentina, Ciencia e Investigación Tomo 73 N° 1, 54-71. Dirección URL: <https://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2023/05/04-Duran-Cei73-1.pdf>
- VRM (2025). VRM - Monitorización a distancia, Victron Energy. <https://www.victronenergy.com.es/panel-systems-remote-monitoring/vrm>