



Interreg
España - Portugal
Fondo Europeo de Desarrollo Regional



UNION EUROPEA



GERAR PLUS

A.2.2: Sistemas de demanda flexible

E.2.3: RESUMEN - Informes científicos sobre evaluación y validación de soluciones híbridas y estrategias de flexibilidad de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica para



Información del documento

Código del entregable	E2.3
Título	Informes científicos con datos de ensayos
Actividad	A2.2 – Sistemas de demanda flexible
Fecha límite de entrega	31/12/2025
Fecha de entrega	31/12/2025
Nivel de difusión	Interno
Socio responsable	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Autores	José María Sancho Peñate Rosa M ^a Rengel Gálvez Eduardo López González

Historial de versiones

Versión	Fecha	Autor(es)
01	31/12/2025	

© **AGERAR PLUS, 2023-2026**

Se autoriza la reproducción siempre que se reconozca la fuente

Tabla de contenido

1. Introducción	6
2. Gestión de la demanda en redes inteligentes para prosumidores	6
3. Tecnologías analizadas para la regulación de demanda flexible en sistemas de prosumidores	8
4. Instalación experimental	9
5. Pruebas y resultados.....	10
5.1 Prueba 1: carga de baterías de iones de litio	11
5.2 Prueba 2: Interacción con la demanda de la red local	12
5.3 Prueba 3: regulación del consumo del electrolizador según el estado de carga y la generación renovable.....	13
5.4 Prueba 4: Flexibilidad de demanda precisa mediante carga electrónica	14
6. Conclusiones	15

Listado de figuras

FIGURA 2: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA MICRORRED DE INTA.....	9
FIGURA 12: RESULTADOS EXPERIMENTALES PRUEBA 1.....	11
FIGURA 14: RESULTADOS EXPERIMENTALES PRUEBA 2.....	12
FIGURA 15: RESULTADOS EXPERIMENTALES PRUEBA 3.....	13
FIGURA 16: RESULTADOS EXPERIMENTALES PRUEBA 4.....	14

Listado de Términos y definiciones

Abreviación	Definición
SMES	Almacenamiento magnético superconductores
PHES	Almacenamiento hidroeléctrico por bombeo
CAES	Almacenamiento de energía por aire comprimido
TES	Almacenamiento de energía térmica
EDLCs	Condensadores electroquímicos de doble capa
LCO	Óxido de Cobalto y Litio
NMC	Óxido de Níquel, Manganeso y Cobalto con Litio
LFP	Fosfato de Hierro y Litio
VPP	Planta de Energía Virtual

Tabla 1: Términos y definiciones

1. Introducción

El presente texto resume el entregable E.2.3, centrado en la evaluación y validación de soluciones híbridas y estrategias de flexibilidad en sistemas de almacenamiento de energía para prosumidores.

La necesidad de integrar energías renovables en el sistema energético se ve reforzada por el elevado peso del consumo eléctrico estacionario y por los desequilibrios entre generación y demanda, especialmente en horas punta. En este contexto, la transición hacia una economía baja en carbono ha impulsado el desarrollo de microrredes con prosumidores, que combinan generación local, almacenamiento y gestión activa del consumo.

La variabilidad inherente a las fuentes renovables y el crecimiento de la generación distribuida hacen imprescindible la adopción de redes inteligentes y estrategias de demanda flexible, capaces de mejorar la estabilidad, la eficiencia y la fiabilidad del sistema eléctrico. El entregable se orienta así a la caracterización de la demanda flexible mediante una microrred experimental en corriente continua, integrando generación fotovoltaica, almacenamiento electroquímico y perfiles de consumo flexibles conectados a la red local.

2. Gestión de la demanda en redes inteligentes para prosumidores

Desde la perspectiva del prosumidor, la flexibilidad de la demanda se entiende como la capacidad de reducir, aumentar o desplazar su consumo energético mediante la gestión de su consumo, generación o almacenamiento en un periodo determinado. El autoconsumo y el almacenamiento permiten gestionar los excedentes de energía renovable durante los periodos de baja producción, estabilizando así la oferta y la demanda, aunque la intermitencia y variabilidad de fuentes como la solar o la eólica generan fluctuaciones en la producción energética y pueden provocar problemas de estabilidad y congestión en la red.

Por este motivo, las redes inteligentes resultan fundamentales para gestionar de forma eficiente la producción distribuida, siendo la digitalización y automatización de la red eléctrica elementos esenciales.

Por este motivo, las redes inteligentes resultan fundamentales para gestionar de forma eficiente la producción distribuida, siendo la digitalización y automatización de la red eléctrica elementos esenciales. El concepto de red inteligente integra tecnologías de generación, almacenamiento y consumo, junto con tecnologías de gestión, tecnologías de la información y automatización, y sistemas de comunicación que permiten monitorizar, controlar y mantener la red eléctrica, posibilitando la entrega de electricidad con mayor calidad, sostenibilidad, seguridad y fiabilidad.

Una de las funciones clave de una red inteligente es la gestión de la demanda (DSM), que consiste en el control de las cargas en el lado del usuario con el objetivo de operar el sistema con mayor eficiencia y sostenibilidad. Esta gestión permite reducir la demanda máxima del sistema, suavizar la curva de carga, disminuir los costes operativos y retrasar la necesidad de nuevas inversiones, mediante estrategias como el recorte de picos, el relleno de valles, el desplazamiento de carga y la carga flexible.

Desde la perspectiva del usuario, el prosumidor dispone de generación distribuida propia y gestiona su demanda, lo que le otorga un papel central en la definición de las funciones de la microrred. El control de la demanda se aplica a nivel de cada prosumidor, favoreciendo la interacción con la red, un enfoque de control distribuido y una mejora de la fiabilidad y la capacidad de respuesta del sistema sin comprometer el confort del usuario.

3. Tecnologías analizadas para la regulación de demanda flexible en sistemas de prosumidores

Las técnicas de carga flexible, dentro de las posibles estrategias de demanda flexible, abarcan un amplio abanico de enfoques y constituyen la base para el diseño del sistema de caracterización de la demanda flexible orientado a prosumidores. Entre las principales estrategias aplicables se encuentran la respuesta a la demanda, la gestión inteligente de cargas, el almacenamiento de energía y la optimización del autoconsumo y la compartición de energía.

La respuesta a la demanda permite ajustar el consumo eléctrico en función de señales de precio o incentivos económicos, ya sea mediante precios dinámicos o compensaciones económicas por reducir la demanda en momentos críticos. En este contexto, los prosumidores consideran el factor económico para adaptar su demanda flexible.

La gestión inteligente de cargas, apoyada en dispositivos IoT y plataformas de gestión energética, permite programar el funcionamiento de cargas flexibles, aplicar desconexiones temporales de cargas no esenciales y desplazar el consumo hacia periodos de menor coste o mayor generación renovable, funcionando de forma automatizada y pudiendo incluir control predictivo.

El almacenamiento de energía mediante baterías, sistemas térmicos, vehículos eléctricos o almacenamiento de hidrógeno permite gestionar la intermitencia de las renovables, fomentar el autoconsumo y mejorar la estabilidad del sistema, flexibilizando la demanda en distintos horizontes temporales y aportando mayor resiliencia.

La optimización del autoconsumo colectivo y el intercambio de energía entre prosumidores se favorece a través de comunidades energéticas locales y plataformas descentralizadas para transacciones energéticas, lo que incrementa la flexibilidad de la demanda y mejora el equilibrio energético global.

Finalmente, el entregable E2.3 presenta las tecnologías analizadas mediante un sistema experimental orientado a validar estrategias de flexibilidad para prosumidores pequeños y medianos, centrado en el consumo tras el contador y en la gestión coordinada del almacenamiento y las cargas flexibles, incluyendo sistemas térmicos, almacenamiento electroquímico y almacenamiento de hidrógeno.

4. Instalación experimental

Como parte del proyecto AGERAR PLUS, el Laboratorio del Área de Energías Renovables del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), ubicado en El Arenosillo (Huelva, España), pone a disposición sus instalaciones basadas en una microrred renovable para el desarrollo de un sistema experimental de validación de demanda flexible orientado a prosumidores. Este sistema incluye bancos de ensayo específicos para la evaluación y demostración de tecnologías de almacenamiento electroquímico y de generación eléctrica, tanto a nivel de celda como de módulo, para aplicaciones estacionarias y móviles.

La microrred experimental de corriente continua del INTA integra fuentes renovables, como la generación fotovoltaica y la eólica, con sistemas de almacenamiento de energía, como baterías y supercondensadores, así como un circuito de hidrógeno mediante un bus de CC de alta tensión. Este bus de CC puede suministrar o recibir energía de un bus de CA trifásico y monofásico a través de convertidores CC/CA bidireccionales.

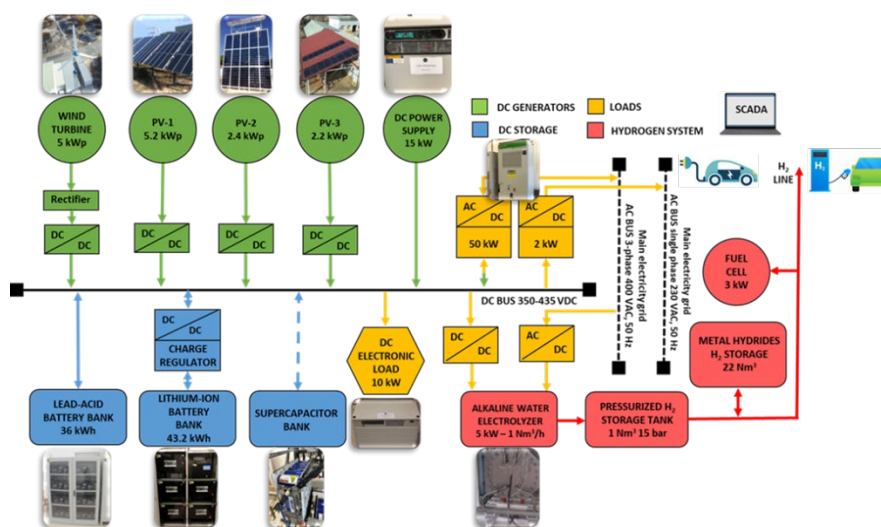


Figura 1: Diagrama de bloques de la microrred de INTA

El sistema de almacenamiento de energía se basa en baterías de plomo-ácido, baterías de iones de litio y el uso de hidrógeno como vector energético, incluyendo electrolizadores, tanques de almacenamiento y pilas de combustible. Asimismo, un convertidor CC/CA bidireccional permite la inyección de energía desde el bus de CC a la red y viceversa, y una carga electrónica programable de CC permite simular distintos perfiles de carga.

El sistema SCADA desarrollado permite la monitorización en tiempo real de la microrred en cada punto de interconexión. La microrred está integrada en la gestión energética del CEDEA y proporciona energía a puntos de recarga de vehículos eléctricos.

La microrred experimental del INTA es una infraestructura diseñada para la integración y validación de tecnologías renovables, cuya combinación de generación fotovoltaica, eólica y almacenamiento energético mediante baterías, supercondensadores e hidrógeno permite testear estrategias de gestión energética en condiciones reales y facilita el análisis y optimización de sistemas híbridos de energía.

5. Pruebas y resultados

Para demostrar y validar la capacidad de los prosumidores en el establecimiento de una demanda flexible, la microrred renovable del laboratorio se apoya en la capacidad de sus distintos componentes para gestionar el consumo y el almacenamiento en función de la generación disponible. Se plantea una serie de ensayos experimentales con el fin de analizar cómo estos consumos pueden adaptarse para optimizar el uso de la energía renovable disponible, minimizando el impacto de las fluctuaciones de generación y permitiendo que el sistema opere de forma estable y eficiente.

En el sistema experimental, los consumos más relevantes para la validación de la demanda flexible incluyen el convertidor bidireccional con conexión a la red local, el electrolizador alcalino, la carga de baterías de iones de litio y la carga electrónica, cada uno con distintos grados de flexibilidad que pueden aprovecharse para adaptar la demanda en función del estado del almacenamiento energético y de la generación disponible.

El convertidor bidireccional facilita la interacción entre el bus de corriente continua de la microrred, sus sistemas de almacenamiento y generación y la conexión a la red local, permitiendo la regulación de flujos energéticos en un escenario realista. El electrolizador representa una carga ajustable diseñada para operar durante los periodos en los que la generación renovable supera significativamente el consumo, mientras que las baterías de iones de litio pueden gestionarse tanto como almacenamiento principal como carga flexible, activándose ante excedentes de generación y desconectándose para reducir la demanda.

Por otro lado, la carga electrónica permite simular distintos perfiles de consumo, lo que resulta útil para evaluar la capacidad de respuesta de la microrred ante variaciones en

la disponibilidad energética. Las pruebas propuestas se centran en diferentes escenarios operativos, en los cuales los consumos se ajustan dinámicamente y son controlados mediante estrategias previamente establecidas en función de la generación renovable y la capacidad de almacenamiento disponible.

5.1 Prueba 1: carga de baterías de iones de litio

Esta prueba tiene como objetivo analizar el comportamiento de la carga de las baterías de iones de litio en función de la disponibilidad de generación renovable y de la demanda global del sistema. Durante los periodos de alta generación renovable, se prioriza la carga de las baterías para maximizar el aprovechamiento de la energía excedente, mientras que en los periodos de baja generación, la carga se interrumpe, contribuyendo a reducir la demanda sobre el sistema eléctrico y manteniendo la estabilidad del bus de corriente continua.

Como se puede ver en la figura, la generación fotovoltaica comienza una subida progresiva con picos más pronunciados, seguida de un periodo de mayor estabilidad. Las baterías adaptan su demanda de recarga de manera flexible acorde a la disponibilidad fotovoltaica, aumentando su estado de carga. Posteriormente, ante una caída de la generación fotovoltaica, la recarga se flexibiliza a una demanda mucho menor, en relación a la disponibilidad.

La prueba confirma que las baterías de iones de litio pueden actuar como carga flexible eficiente, adaptando su comportamiento de forma dinámica a la variabilidad de la generación renovable.

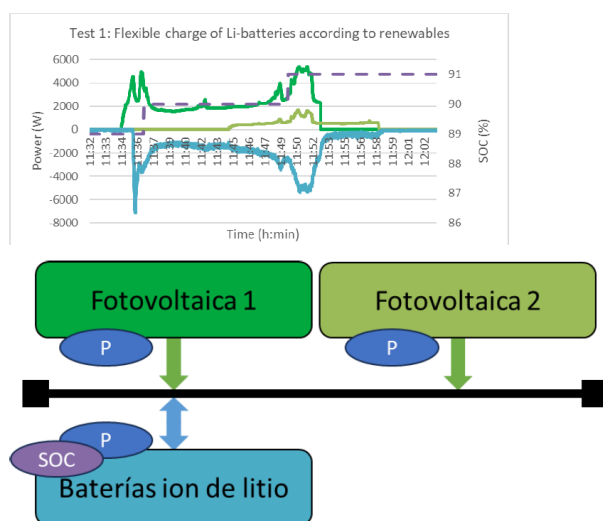


Figura 2: Resultados experimentales prueba 1

5.2 Prueba 2: Interacción con la demanda de la red local

Esta prueba analiza la interacción entre la microrred y la demanda de la red local bajo diferentes escenarios de generación renovable, considerando casos críticos y estableciendo criterios de suministro basados en el estado del almacenamiento y en el nivel de prioridad de los consumos. En este contexto, el convertidor bidireccional facilita la demanda flexible controlando simultáneamente la generación renovable y el apoyo energético desde las baterías de litio, mientras que las baterías ajustan su demanda de forma flexible para adaptarse a las necesidades del sistema.

En el escenario experimental, se cuenta inicialmente con disponibilidad en el campo fotovoltaico 1, que suplente la demanda flexible proveniente de la red local. Posteriormente, la red local adapta su demanda a un mayor nivel, incorporando la energía proveniente de las baterías de ion de litio. En una etapa posterior, al participar también el segundo campo fotovoltaico, la red local adapta su demanda permitiendo la recarga de las baterías de litio en el momento más efectivo. Finalmente, en ausencia de fotovoltaica, la red local adapta su demanda a la disponibilidad en baterías.

Estos resultados reflejan la capacidad del sistema para gestionar de forma flexible el suministro energético hacia la red local, combinando de manera eficiente generación renovable y almacenamiento, y demuestran un comportamiento flexible y autónomo de la microrred, capaz de adaptarse a variaciones tanto en la generación como en la demanda manteniendo la estabilidad y el aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles.

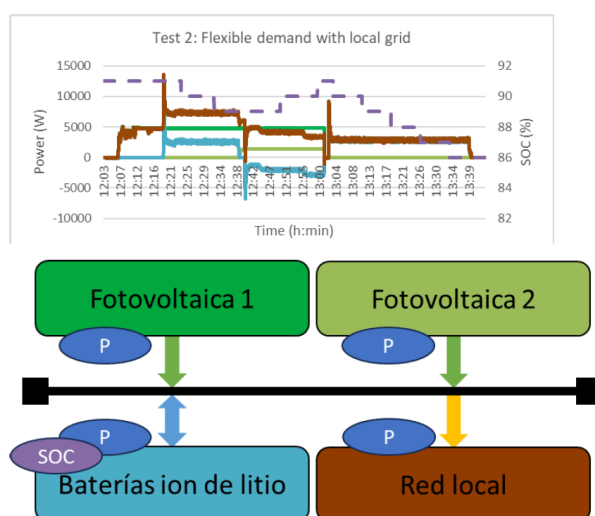


Figura 3: Resultados experimentales prueba 2

5.3 Prueba 3: regulación del consumo del electrolizador según el estado de carga y la generación renovable

Esta prueba se centra en la regulación del consumo del electrolizador en función del estado de carga de las baterías de iones de litio y la disponibilidad de generación renovable. El objetivo es determinar el umbral de carga de las baterías a partir del cual se considera viable suministrar energía al electrolizador sin comprometer la estabilidad del sistema, y analizar cómo varía la eficiencia global del sistema utilizando hidrógeno como medio de almacenamiento energético. Debido a la alta inercia de arranque del electrolizador, se requiere establecer estrategias de activación bien definidas.

En la prueba realizada, el perfil de demanda flexible del electrolizador regula un primer pico de consumo en su arranque hasta estabilizarse con las baterías de ion de litio. Al contar con disponibilidad fotovoltaica, su demanda se adapta a un mayor nivel, apagando el equipo en ausencia de la misma.

Este ensayo confirma que el electrolizador puede operar como una carga controlada y eficaz dentro de la microrred, aprovechando el excedente energético renovable solo cuando las condiciones del sistema lo permiten. La coordinación con las baterías de litio y la desconexión automática ante la caída de generación aseguran un funcionamiento eficiente sin comprometer la estabilidad del sistema ni el estado de carga del almacenamiento principal.

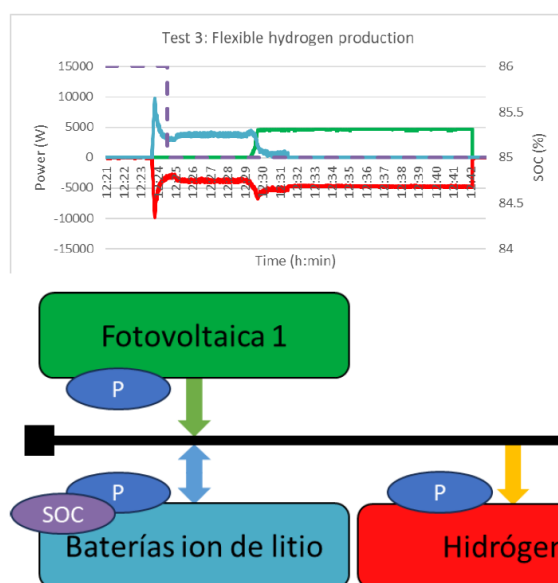


Figura 4: Resultados experimentales prueba 3

5.4 Prueba 4: Flexibilidad de demanda precisa mediante carga electrónica

Esta prueba evalúa la capacidad de la carga electrónica para ajustar su consumo con gran precisión ante las fluctuaciones de generación renovable, con el objetivo de mantener la estabilidad del bus de corriente continua (DC). A diferencia de otros elementos con mayor inercia, esta carga permite una respuesta precisa y sin rizados, lo que la convierte en un recurso adecuado para estrategias de regulación fina de la demanda.

Durante el ensayo, la demanda de la carga se incrementa progresivamente hasta alcanzar un punto en el que comienza a reducirse el estado de carga de las baterías, momento a partir del cual la carga se estabiliza de forma flexible. Posteriormente, con nueva producción fotovoltaica, la demanda vuelve a aumentar y, ante requerimientos energéticos superiores, el sistema complementa la energía renovable con descarga desde las baterías, evidenciando una gestión conjunta eficaz.

Los resultados permiten evaluar el comportamiento de sistemas híbridos que combinan generación, almacenamiento y control, reproduciendo perfiles reales y verificando cómo las cargas variables pueden alinearse con la flexibilidad de la oferta, contribuyendo al desarrollo de sistemas de gestión adaptativos y escalables para microrredes con alta penetración renovable.

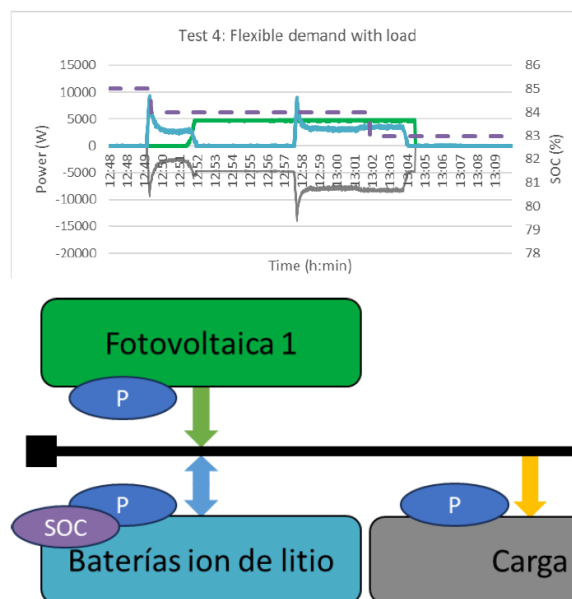


Figura 5: Resultados experimentales prueba 4

6. Conclusiones

El análisis de la demanda energética flexible para prosumidores demuestra el potencial de la gestión activa del consumo energético para optimizar el uso de los recursos y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico. La implementación de estrategias de demanda flexible, junto con el uso de tecnologías de almacenamiento energético, contribuye a reducir costes, disminuir la dependencia de fuentes no renovables y fomentar una mayor integración de energías limpias.

Los prosumidores, dotados de generación y almacenamiento distribuido, pueden participar activamente en la gestión de la demanda, ajustando su consumo en función de la disponibilidad de energía renovable, lo que contribuye a la estabilidad y resiliencia del sistema eléctrico. En este contexto, la demanda flexible se identifica como un habilitador clave hacia un sistema energético más sostenible y descentralizado.



@AgerarPlus



@AgerarPlus