



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



Unidad  
de Formación



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



# TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

*23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022*

**ALMACENAMIENTO HÍBRIDO: COMBINACIONES Y ALGORITMOS DE  
OPERACIÓN CONJUNTA**

**GUSTAVO NAVARRO**

**1 DE JUNIO 2022**

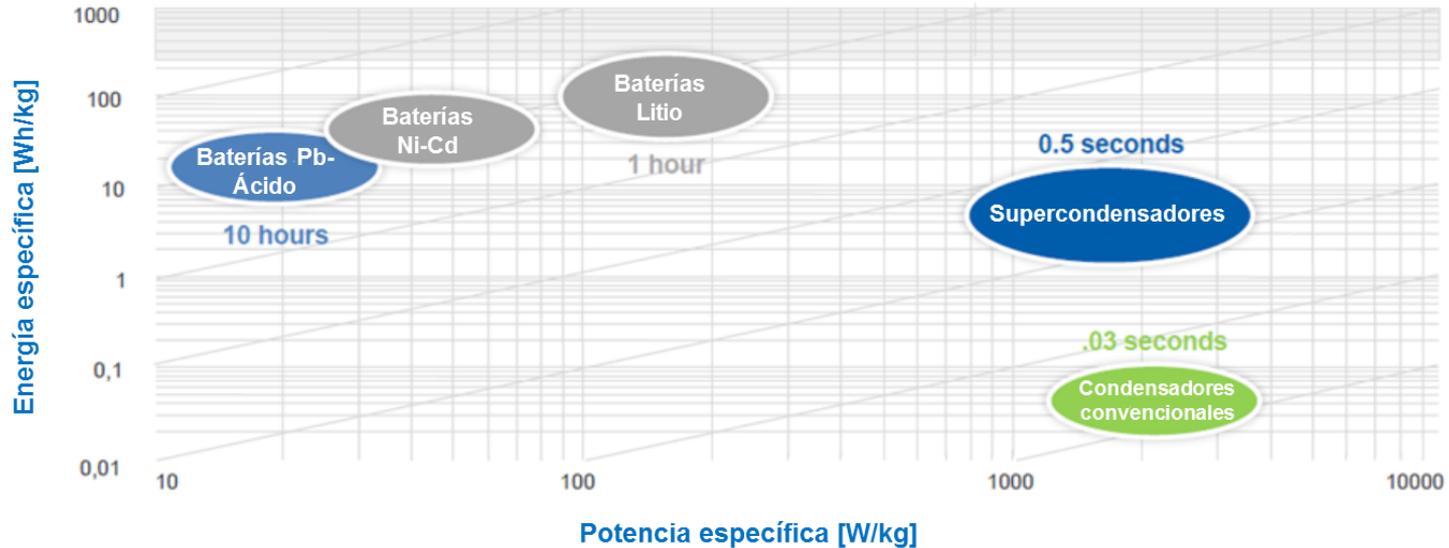
# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HES)
- III. Estrategias de control de HES
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HES
- V. Retos tecnológicos de los HES
- VI. Perspectiva futuro HES

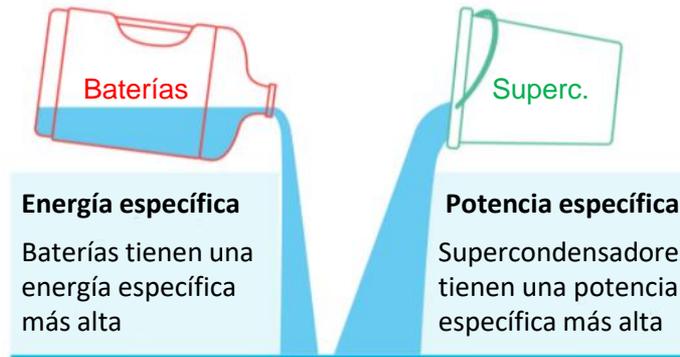
# Índice

- I. **Introducción**
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HESS)
- III. Estrategias de control de HESS
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HESS
- V. Retos tecnológicos de los HESS
- VI. Perspectiva futuro HESS

# Energía y Potencia específica baterías y SCs



**HES**  
Sistema de  
almacenamiento  
de alta energía



**HEP**  
Sistema de  
almacenamiento  
de alta potencia

## Comparativa entre baterías y supercondensadores (I)

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Baterías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja autodescarga</li> <li>• Baja variación de tensión en operación</li> <li>• Alta densidad de energía</li> <li>• Bajo coste de instalación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envejecimiento acelerado a <math>\uparrow</math> pulsos de P</li> <li>• Bajo reciclado de materiales</li> <li>• Bajo rango de Tª en operación</li> <li>• Baja densidad de potencia</li> <li>• Necesidad de un BMS</li> </ul>
Supercondensadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta densidad de potencia</li> <li>• Amplio rango operativo de Tª</li> <li>• Envejecimiento no depende tanto ciclo de trabajo</li> <li>• Eficiencia más estable en todo el rango de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta variación tensión en operación</li> <li>• Requerido convertidor de potencia</li> <li>• Sist. equilibrado tensiones requerido</li> <li>• Baja densidad de energía</li> <li>• Elevado coste</li> </ul>

## Comparativa entre baterías y supercondensadores (II)

### Baterías

Mayor energía específica

Menor autodescarga

Baja variación tensión operación

Menor coste (€/kWh)



### Supercondensadores

Mayor potencia específica

Menor envejecimiento ante  $\uparrow P$

Mayor rango de Tª en operación

Menor tiempo de respuesta

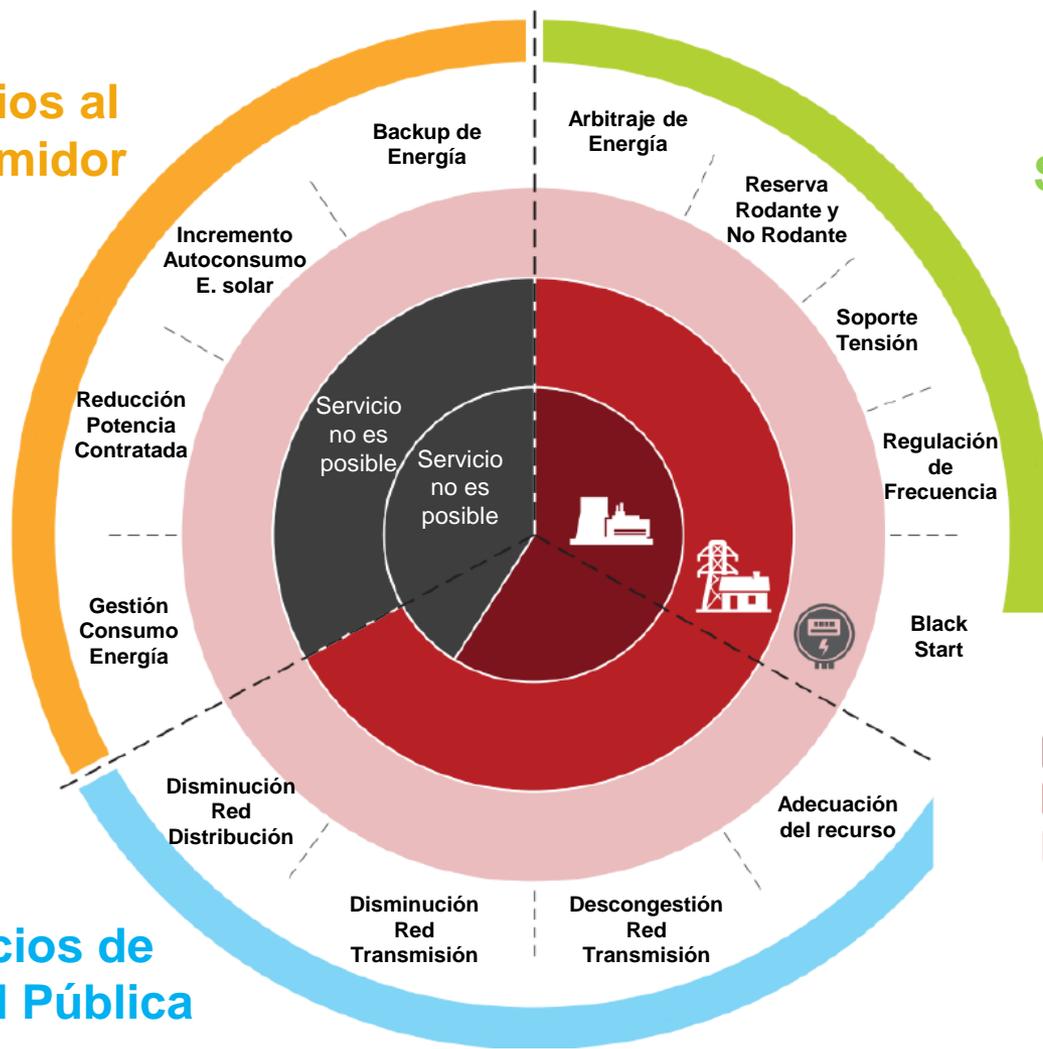
Mayor número de ciclos



## Servicios al Consumidor

## Servicios al Operador Sistema y Red Distribución

## Servicios de Utilidad Pública

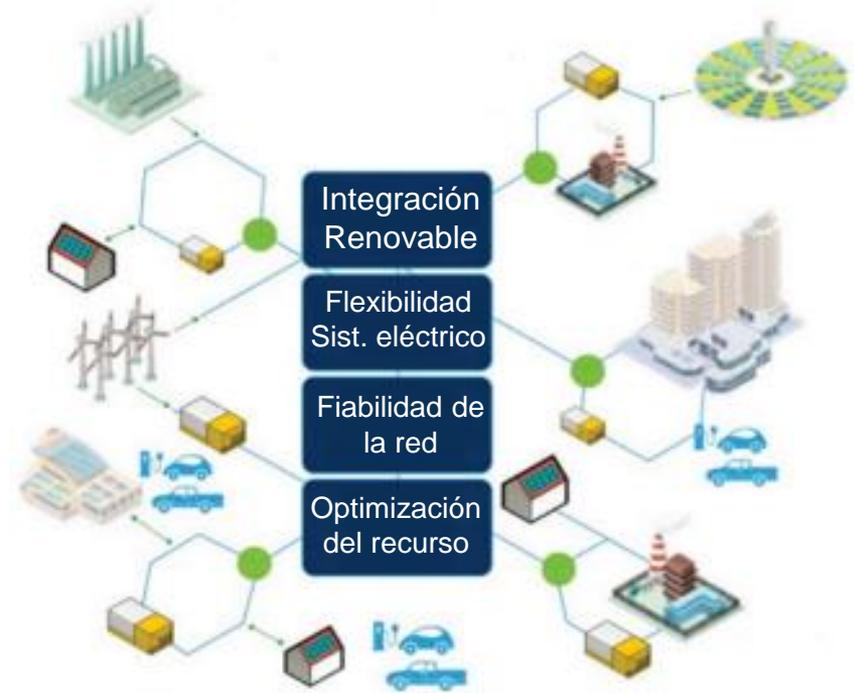
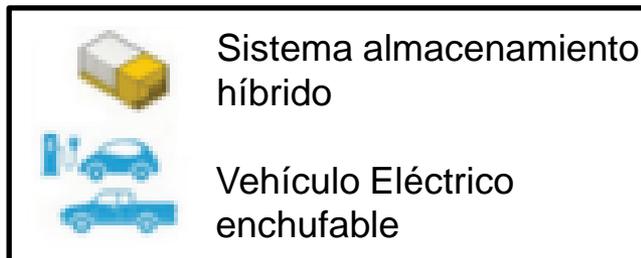


## Operación conjunta Supercondensadores/baterías

- **Objetivo:** Cubrir las necesidades de almacenamiento de energía de una determinada aplicación al menor coste (alargar vida útil batería)
- **Aspectos que debo tener en cuenta y qué necesito para evaluar hibridación:**
  - Perfil de potencia y energía requerida de almacenamiento (variables no independientes en baterías y supercondensadores)
  - Metodología de dimensionado:
    - Conocer muy bien las tecnologías (características eléctricas)
    - Modelos dinámicos de los sistemas de almacenamiento (evaluación pérdidas y eficiencia)
    - Modelos de envejecimiento y coste de reposición (condiciones reales de operación)
    - Estrategia de control para distribuir la potencia requerida entre ambos sistemas de almacenamiento
    - Elegir la variable a minimizar a la hora de seleccionar la estrategia de control
    - Coste inicial de equipos, coste de operación y mantenimiento de equipos, coste de amortización de equipos y políticas de remuneración (modelo de negocio)
  - Son muchos factores y es complicado elegir la mejor opción

## Beneficios sistemas almacenamiento de energía híbridos

- Minimizar el coste inicial en comparación de un único sistema de almacenamiento por desacoplo de potencia y energía
- Mejora la capacidad de almacenamiento y la vida útil de la planta
- Mejora la eficiencia global del sistema
- Mayor flexibilidad sistema eléctrico

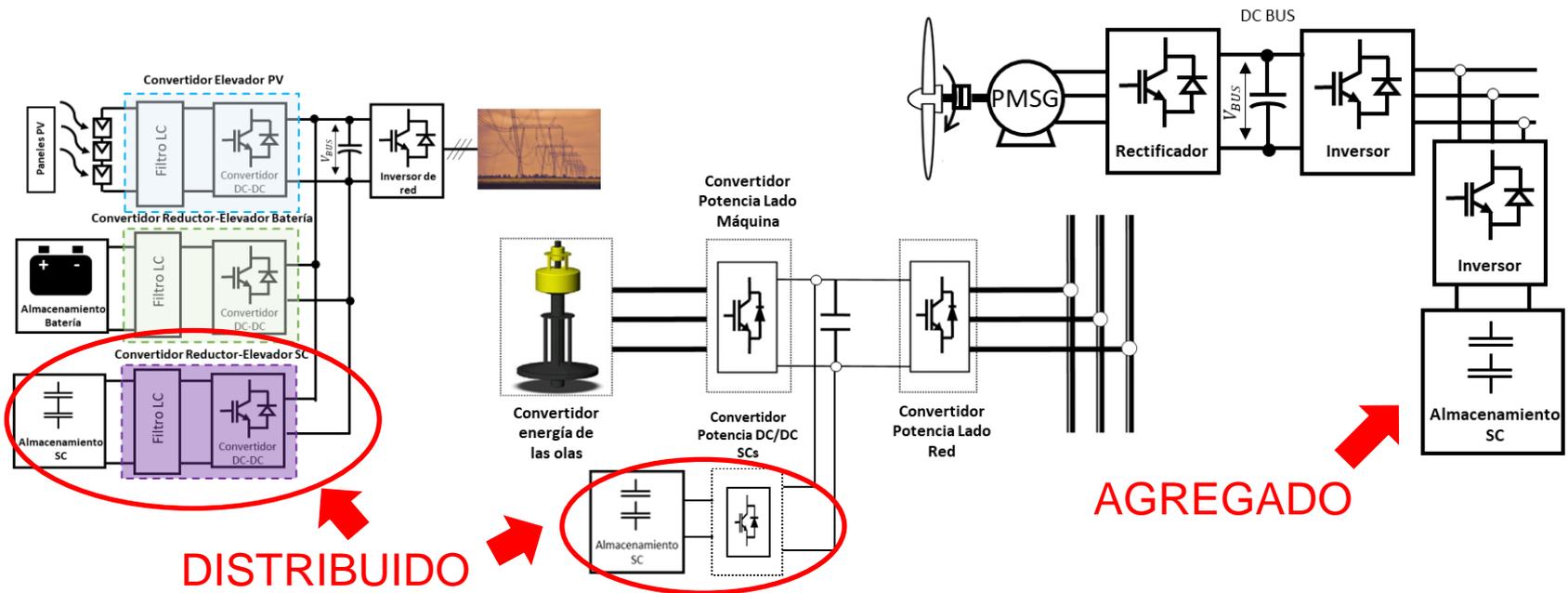


# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HESS)**
- III. Estrategias de control de HESS
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HESS
- V. Retos tecnológicos de los HESS
- VI. Perspectiva futuro HESS

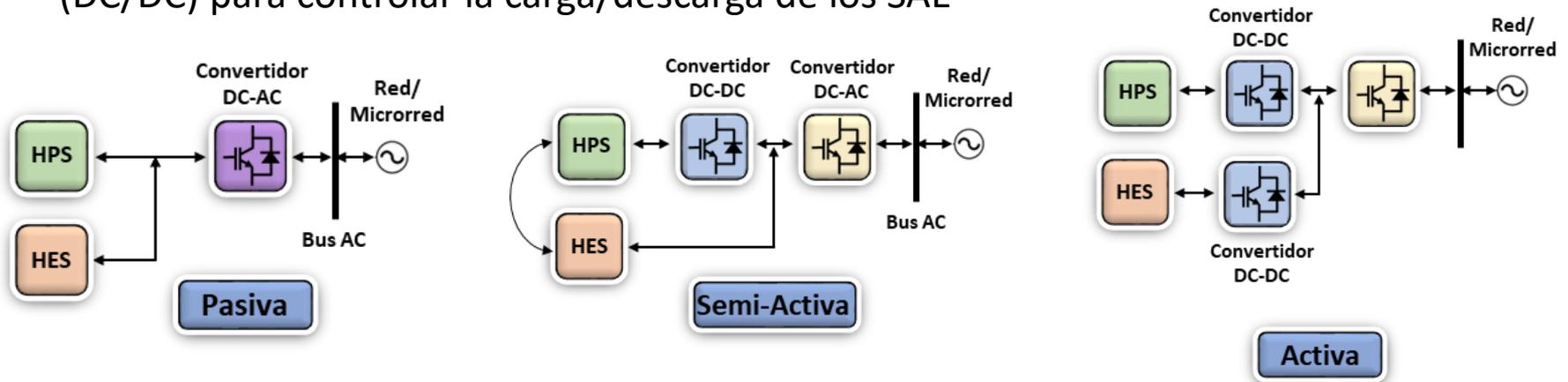
# Topologías de conexión sistemas híbridos energía (HES)

- **Sistema de almacenamiento distribuido:** Menor tamaño y conectado a una etapa de continua intermedia entre dos convertidores eléctricos de potencia
- **Sistema de almacenamiento agregado:** Mayor tamaño y conectado a punto de acoplamiento común (PCC)



# Topologías de conexión sistemas híbridos energía (HES)

- **Pasiva:** Conexión directa de los sistemas de almacenamiento de energía sin convertidores electrónicos de potencia
- **Semi-Activa:** Se emplea un convertidor de electrónica de potencia para controlar la carga/descarga del sistema de elevada potencia (HPS) y el sistema de elevada energía (HES) va directamente conectado al bus de continua
- **Activa:** Se emplean dos convertidores bidireccionales en potencia continua-continua (DC/DC) para controlar la carga/descarga de los SAE



## Topologías de conexión sistemas híbridos energía (HES)

Topología	Coste	Flexibilidad	Rango adopción Estrategias control	Fluctuaciones bus DC
<b>Pasiva</b>	Bajo	No	Baja	Sí
<b>Semi-activa</b>	Medio	Media	Media	Sí con HPS sin convertidor
<b>Activa</b>	Moderado	Sí	Alto	No

Topología	Tolerancia a faltas	Espacio requerido	Complejidad del control	Recomendaciones
<b>Pasiva</b>	No	Bajo	Baja	Cuando el coste es principal factor
<b>Semi-activa</b>	Sólo HPS	Medio	Moderado	Merece la pena más coste para alargar vida útil bat.
<b>Activa</b>	Sí	Alto	Alto	La respuesta dinámica es el factor principal

# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HES)
- III. Estrategias de control de HES**
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HES
- V. Retos tecnológicos de los HES
- VI. Perspectiva futuro HES

# Sistema de gestión de la energía (EMS)

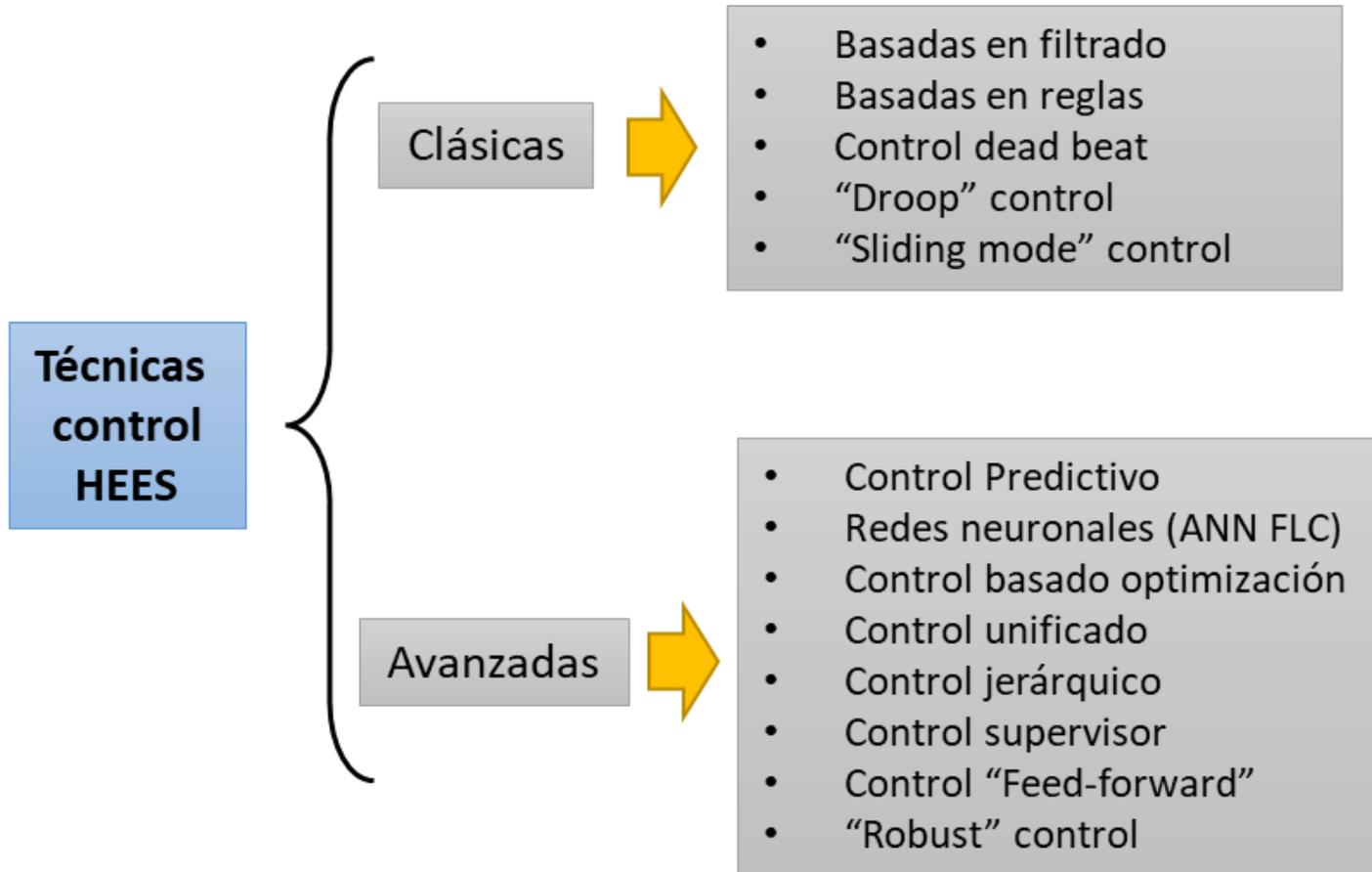
- Diseño del óptimo controlador es la clave en la operación de los sistemas de almacenamiento híbridos (HESS)
- La estrategia de control debe tener en cuenta una serie de parámetros: Vida útil de los SAE, reducción de la intermitencia de la energía, calidad de potencia, tiempo de respuesta del controlador , capacidad de cálculo del controlador y estructura de hibridación
- La implementación de una técnica de control realista adecuada es esencial para lograr un funcionamiento consistente, eficaz y seguro del HESS

# Sistema de gestión de la energía (EMS)

- 1. Sistema de control de bajo nivel:** Controla la tensión del bus de continua y mantiene el flujo de potencia
- 2. Sistema de control de alto nivel:** Encargado de repartir la potencia entre ambos SAE y monitorización del estado de carga (SoC) entre otros parámetros

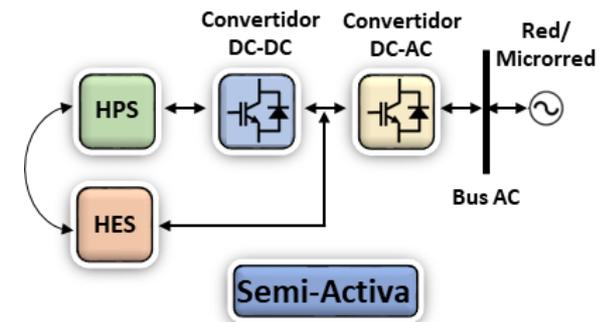
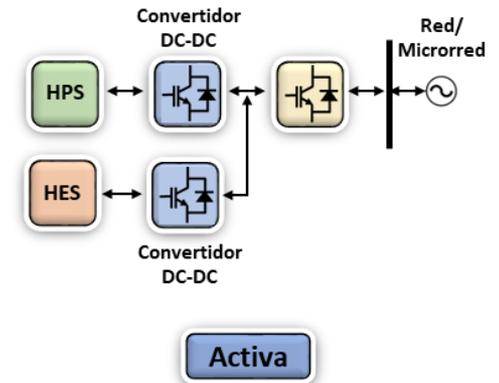
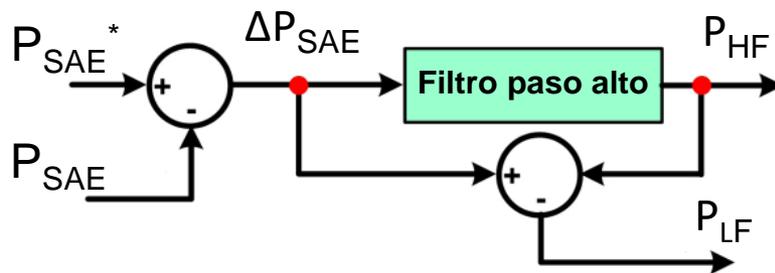
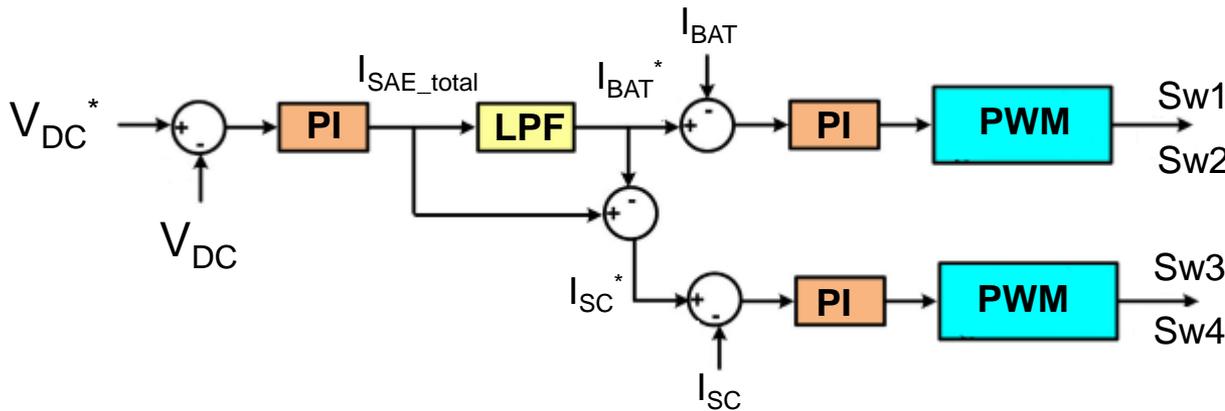


## Clasificación técnicas de control de HESS



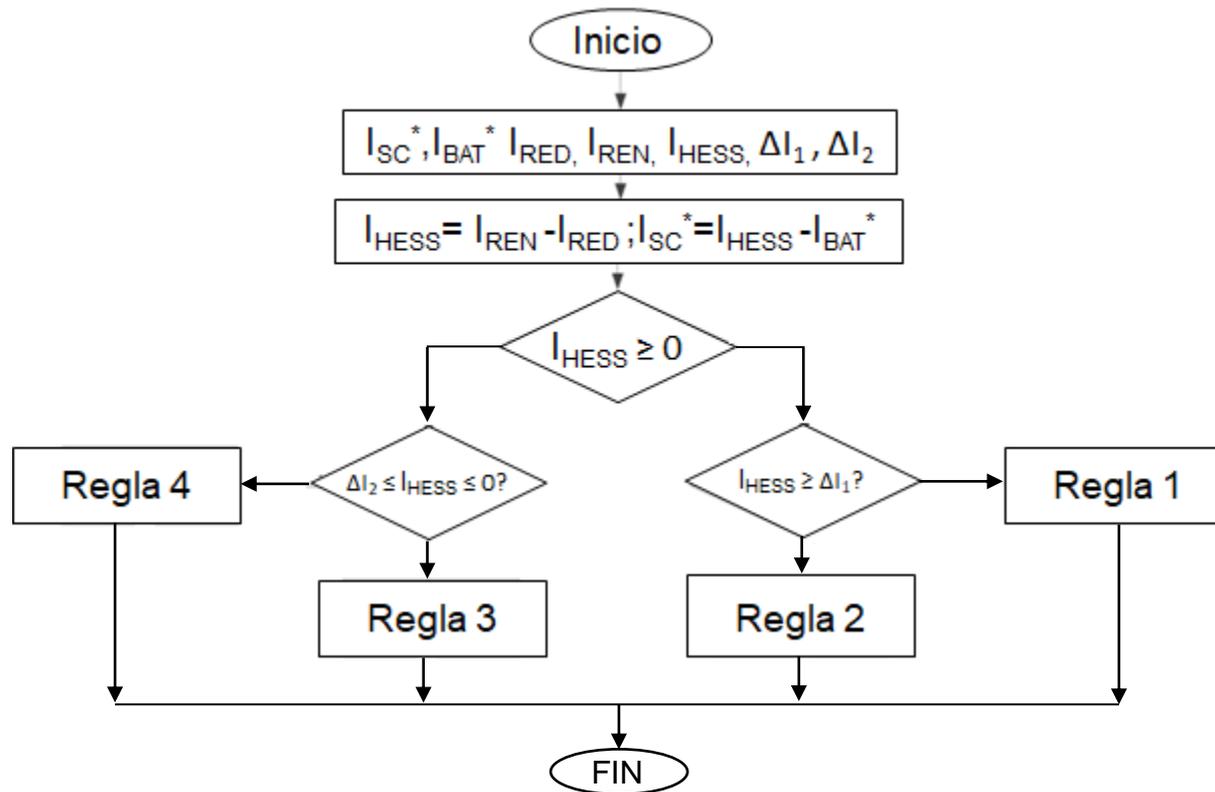
# Clasificación técnicas de control de HESS (Clásicas)

1. **Basadas en filtrado:** Potencia requerida del HESS se divide en componentes de alta frecuencia (HF) y en componentes de baja frecuencia (LF)



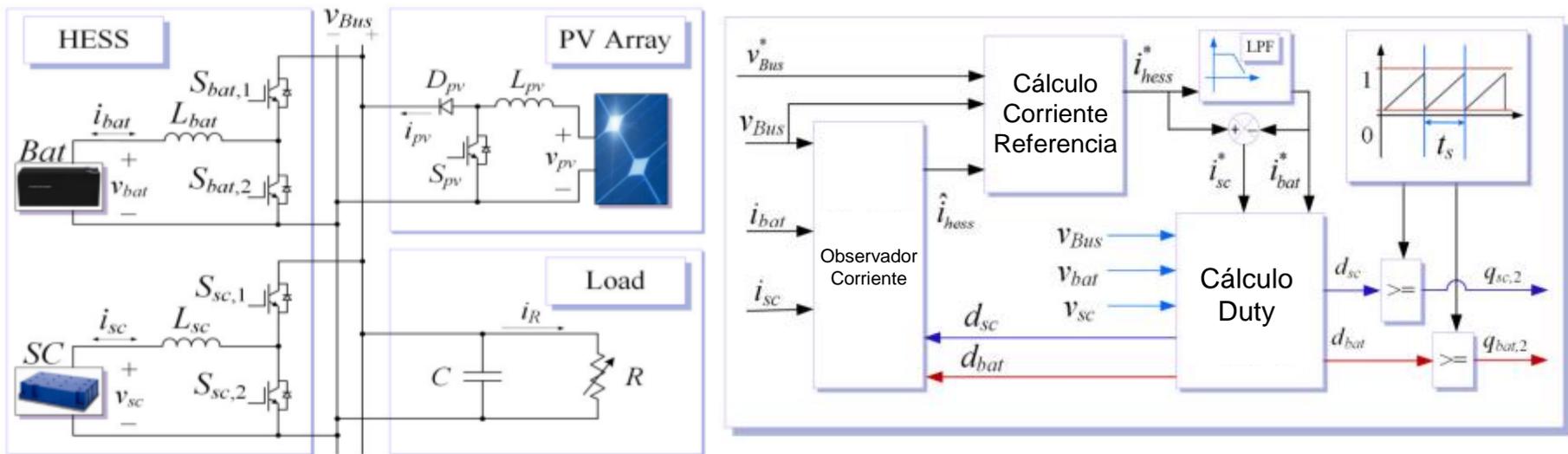
## Clasificación técnicas de control de HESS (Clásicas)

- Basadas en reglas:** Proceso secuencial de toma de decisiones en relación con el objetivo de control. Las reglas se definen en base a la experiencia o mediante modelos matemáticos.



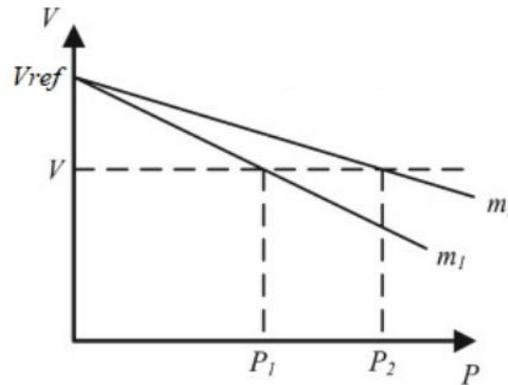
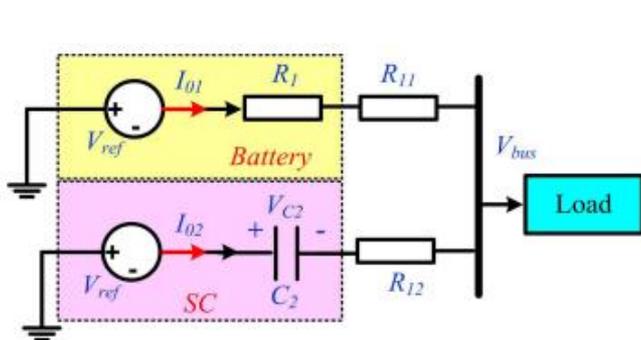
## Clasificación técnicas de control de HESS (Clásicas)

- Control deadbeat:** Se basa en el modelo del sistema. Genera la relación entre el ciclo de trabajo para minimizar la regulación del error en un ciclo de control y repartir la potencia entre los SAE
  - La respuesta dinámica rápida y la alta precisión del control son las características adicionales del controlador deadbeat



## Clasificación técnicas de control de HESS (Clásicas)

- 3. Droop control:** El reparto de potencia requerida entre los sistemas de almacenamiento se basa en diferentes relaciones definidas para cada sistema de almacenamiento entre la variación de la tensión en la etapa de continua respecto al valor de referencia y la potencia



$$\Delta P_{HESS} = \sum \Delta P_i = -\Delta V \cdot \sum \frac{1}{m_i}$$

$$m_{eq} = \frac{1}{\sum \frac{1}{m_i}}$$

$$V_{BUS} = V_{BUS\_ref} - m_{eq} \cdot P_{HESS}$$

$$P_i = \frac{V_{BUS\_ref} - V_{BUS}}{m_i} = \frac{m_{eq}}{m_i} \cdot P_{HESS} = \frac{P_{n_i}}{\sum P_{n_i}} \cdot P_{HESS}$$

- 4. Sliding mode control:** Algoritmo inherentemente robusto a los cambios en los parámetros, los modelos no lineales, las perturbaciones externas y la incertidumbre

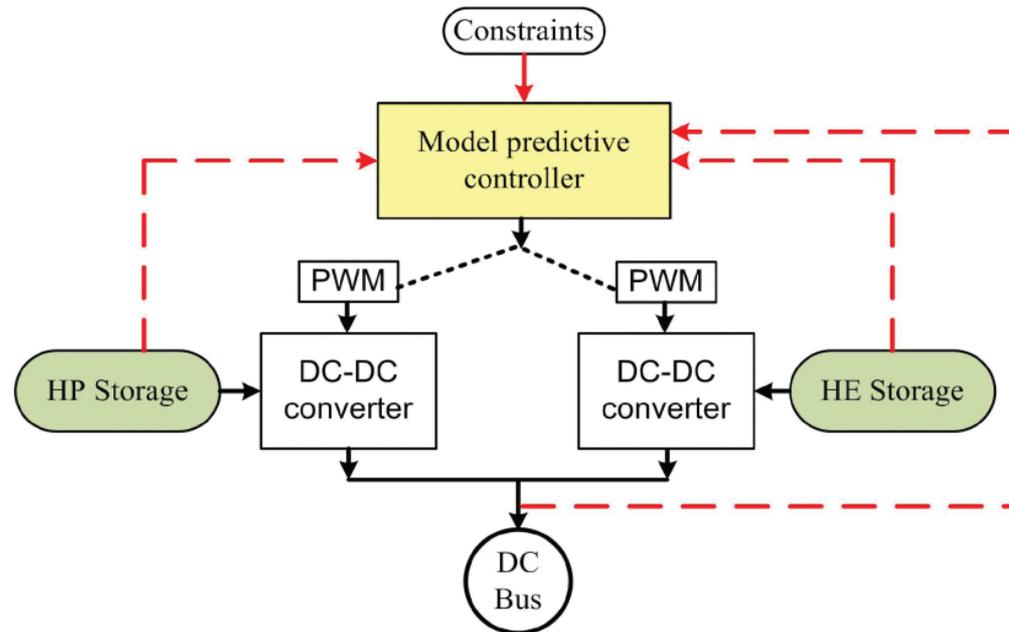
## Comparativa técnicas de control de HESS (Clásicas)

Técnica control	Características	Limitaciones
<b>Basada filtrado</b>	Fácil implementación y bajo coste computacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño filtros complejo</li> <li>• Requiere modelos precisos</li> <li>• Menos efectivo</li> </ul>
<b>Basada en reglas</b>	Fácil implementación y bajo coste computacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a cambio de parámetros y rígido</li> </ul>
<b>Droop control</b>	Altamente fiable, descentralizado y fácil implementación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos precisión en el reparto de tensión</li> <li>• Respuesta más lenta</li> </ul>
<b>Dead beat</b>	Rápida respuesta dinámica y control de gran precisión e implementación simple	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy sensitivo a cambio de parámetros y requiere modelos exactos</li> </ul>
<b>Sliding mode</b>	Controlador de alta robustez y menos sensitivo a cambios de parámetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implica un procedimiento de diseño complejo</li> </ul>

## Clasificación técnicas de control de HESS (Smart)

Los sistemas implementados con estas técnicas tienen un rendimiento de control mejorado, sin embargo, el tiempo que se necesita para los cálculos en cada ciclo es elevado y el coste del sistema se incrementa

- 1. Control predictivo:** El MPC es una técnica de optimización de procesos de planta que prevé el efecto de las futuras decisiones de control sobre el estado cambiante de la planta



## Clasificación técnicas de control de HESS (Smart)

- 2. Redes neuronales:** Están inspiradas en las redes neuronales biológicas y son un sistema de cálculo masivo y en paralelo que consiste en un gran número de procesadores simples (neuronas) con muchas interconexiones
- 3. Lógica difusa:** La lógica difusa es una lógica multivariable que permite definir valores intermedios entre los valores lógicos pudiendo formular matemáticamente términos como “bastante urgente” y ser procesados por ordenadores, simulando así una forma de pensar más parecida a la humana
- 4. Métodos evolutivos:** Dan unas reglas o estrategias que guían la construcción o el diseño del algoritmo heurístico concreto que resolverá el problema dado (algoritmos genéticos)
- 5. Multiobjetivo:** Son una alternativa práctica en la búsqueda de soluciones de compromiso para problemas reales donde los métodos exactos son inaplicables o ineficientes.
- 6. Robust control:** Diseño de controladores que trata la incertidumbre para funcionar correctamente siempre que los parámetros inciertos o las perturbaciones se encuentren dentro de algún conjunto (normalmente compacto)

## Clasificación técnicas de control de HESS (Smart)

Técnica control	Características	Limitaciones
<b>Redes Neuronales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos sensible a cambios de parámetros</li> <li>• No se requiere modelo exacto ni entrenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño filtros complejo</li> <li>• Requiere modelos precisos</li> <li>• Menos efectivo</li> </ul>
<b>Métodos evolutivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejan funciones multiobjetivos y mejor respuesta técnicas clásicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a cambio de parámetros y rígido</li> </ul>
<b>Multiobjetivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede manejar restricciones y funciones objetivos a la vez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos precisión en el reparto de tensión</li> <li>• Respuesta más lenta</li> </ul>
<b>Control predictivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predice futuro del comportamiento</li> <li>• Incorporación fácil restricciones</li> <li>• Controla varias variables a la vez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy sensitivo a cambio de parámetros y requiere modelos exactos</li> </ul>
<b>Robust control</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Da mejor respuesta controladores convencionales y poco sensible cambio de parámetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implica un procedimiento de diseño complejo</li> </ul>

# Software simulación HESS

NOMBRE	TIPO	DESARROLLADOR	FORMATO
<b>HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN</b>			
<b>QuEst</b>	Free	SNL	Python-based, open-source
<b>StorageVET</b>	Free	EPRI	Python-based, open-source
<b>Energytoobase</b>	Commercial	Energy Toolbase	Executable, Web-based
<b>BatSIMM</b>	Commercial	Ascend analytics	Executable, Web-based
<b>HERRAMIENTAS DE DISEÑO</b>			
<b>MASCORE</b>	Free	PNNL	Web-based
<b>MDT</b>	Free	SNL	Executable
<b>DER-CAM</b>	Free	LBNL	Executable
<b>REopt</b>	Free	NREL	Web-based
<b>Homer</b>	Commercial	Homer Energy	Executable, web-based

# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HES)
- III. Estrategias de control de HES
- IV. Aplicaciones, Proyectos y Operación de HES**
- V. Retos tecnológicos de los HES
- VI. Perspectiva futuro HES

# APLICACIONES DEL ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

## 1. Sector de la potencia

- Servicios auxiliares como regulación de frecuencia y tensión
- Backup de potencia para la red

## 2. Sector del transporte

- Demanda de picos elevada potencia en EVs
- Elevados picos de potencia en el frenado regenerativo en EVs
- Alisado de picos de potencia aceleración/freno trenes eléctricos

## 3. Sector de las energías renovable

- Mejorar la calidad de potencia generada con fuentes renovables
- Mejorar la eficiencia en conjunto del sistema de generación renovable

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

TIPO	País	Capacidad	Compañía	Aplicación	Año
SC/Bat	EEUU	1.2MW	DUKE Energy	Respuesta ante picos de demanda, desplazamiento curva demanda apoyo a la red	2016



<https://news.duke-energy.com/releases/duke-energy-to-put-new-battery-and-ultracapacitor-system-to-the-test-in-n-c>

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

TIPO	País	Capacidad	Compañía	Aplicación	Año
Li/NaS battery	Alemania	11.5MW	EWE, NEDO, HITACHI	Equilibrar fluctuaciones de frecuencia red regional de electricidad	2018



<https://www.ewe.com/en/media/press-releases/2018/11/intelligent-large-scale-battery-officially-commences-operation-in-varel-ewe-ag>

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

TIPO	País	Capacidad	Compañía	Aplicación	Año
VFB/Li Battery	Australia	1MWh	RedT	Plataforma flexible integrada EMS edificio con paneles solares y cargadores de EVs	2018



<https://www.smart-energy.com/storage/monash-welcomes-worlds-largest-ci-hybrid-storage-system/>

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

TIPO	País	Capacidad	Compañía	Aplicación	Año
Pb Bat /Li ion SC	Japón	1.5MW	Hitachi & Shin-Kobe	Integración de renovables	2014



<https://www.rechargenews.com/solar/hitachi-starts-1-5mw-storage-test-project-on-island-south-of-tokyo/1-1-869642>

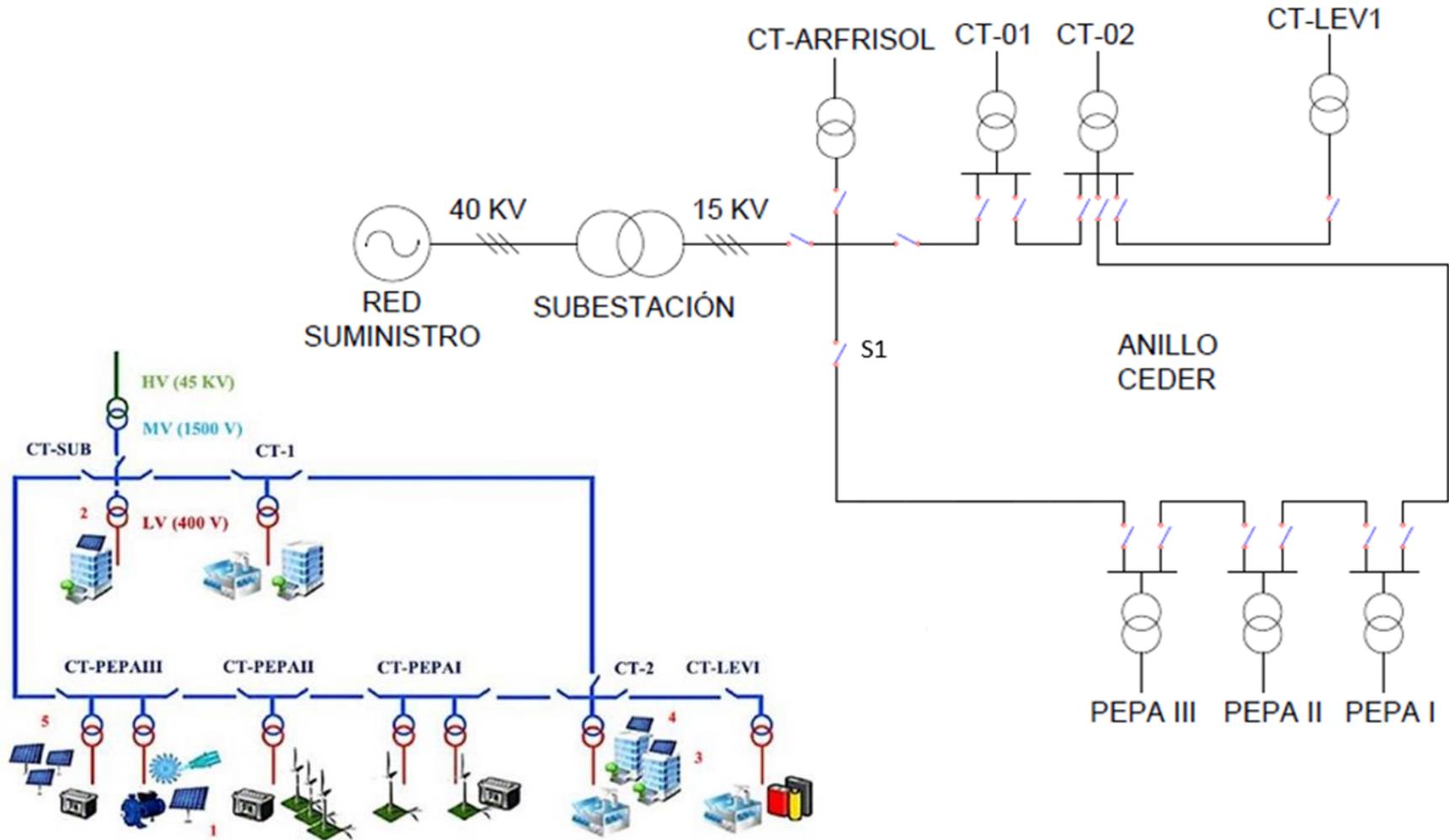
# APLICACIONES DEL ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

Sector	Tecnología
Transporte [1]	Imanes superconductores (SMES)/Baterías
Energía renovable [2]	Energía térmica; energía térmica/baterías/hidrógeno SC/baterías; Baterías/baterías
Microrred, energía renovable [3]	SC/baterías; FC/baterías; SMES/Baterías; FC/SC; baterías/volantes; FC/volantes y baterías/CAES
EVs (baterías) [4]	SC/Baterías
Microrred [5]	Baterías/Volantes
Microrred [6]	Baterías/SC
Transporte, energía renovable [7]	Batería/SC; Hidrobombeo/ESS; CAES/Baterías-Volantes-SMES-SC; Batería/SC-Volantes-SMES
Sistemas potencia [8]	Baterías/SC
Sistemas potencia, energía renovable [9]	Baterías/SC
Transporte (EV) [10]	Baterías/SC-Volantes

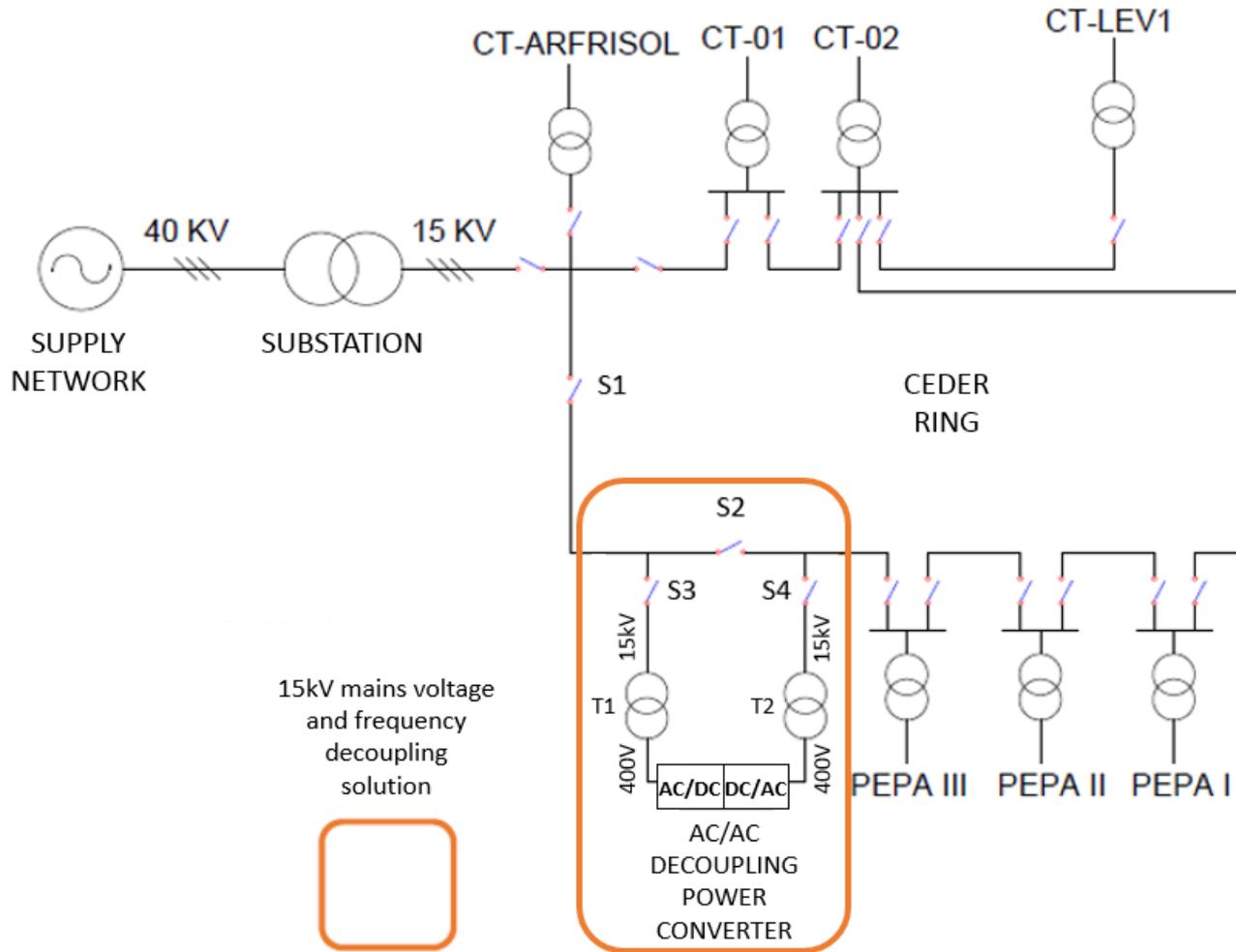
# APLICACIONES DEL ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

- [1] <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0110>
- [2] <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.01.004>
- [3] <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.017>
- [4] <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.095>
- [5] <https://doi.org/10.3390/en11020396>
- [6] <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0500>
- [7] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.029>
- [8] <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2786283>
- [9] <https://doi.org/10.3390/s17081856>
- [10] <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.036>

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO



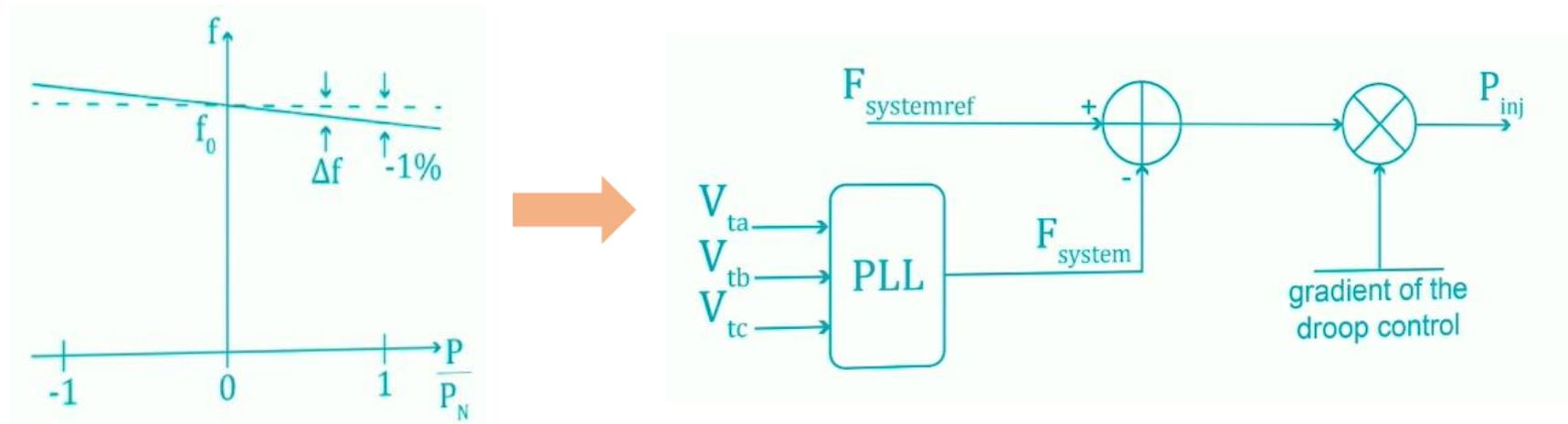
# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO



# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

El equipo deberá permitir el funcionamiento de la microrred en modo autónomo o conectado a la red principal

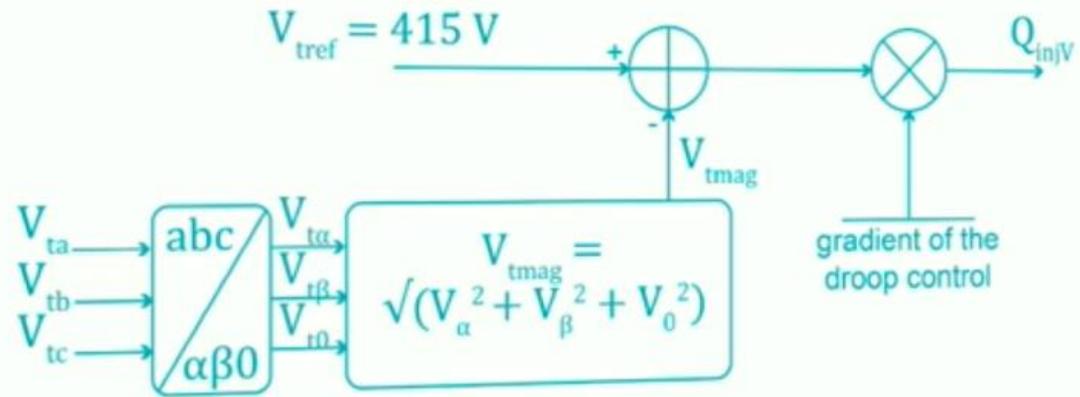
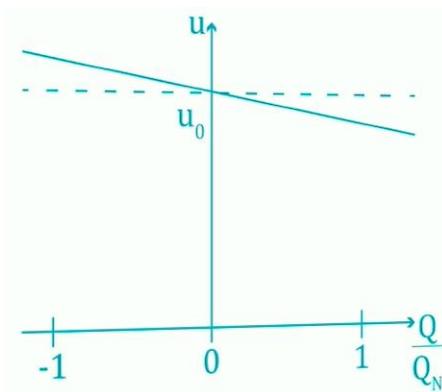
1. Control de la frecuencia en la microrred a partir de un valor de referencia ( $f^*$ )
2. Control de la frecuencia en la microrred según un perfil de frecuencia/potencia (droop control)



# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

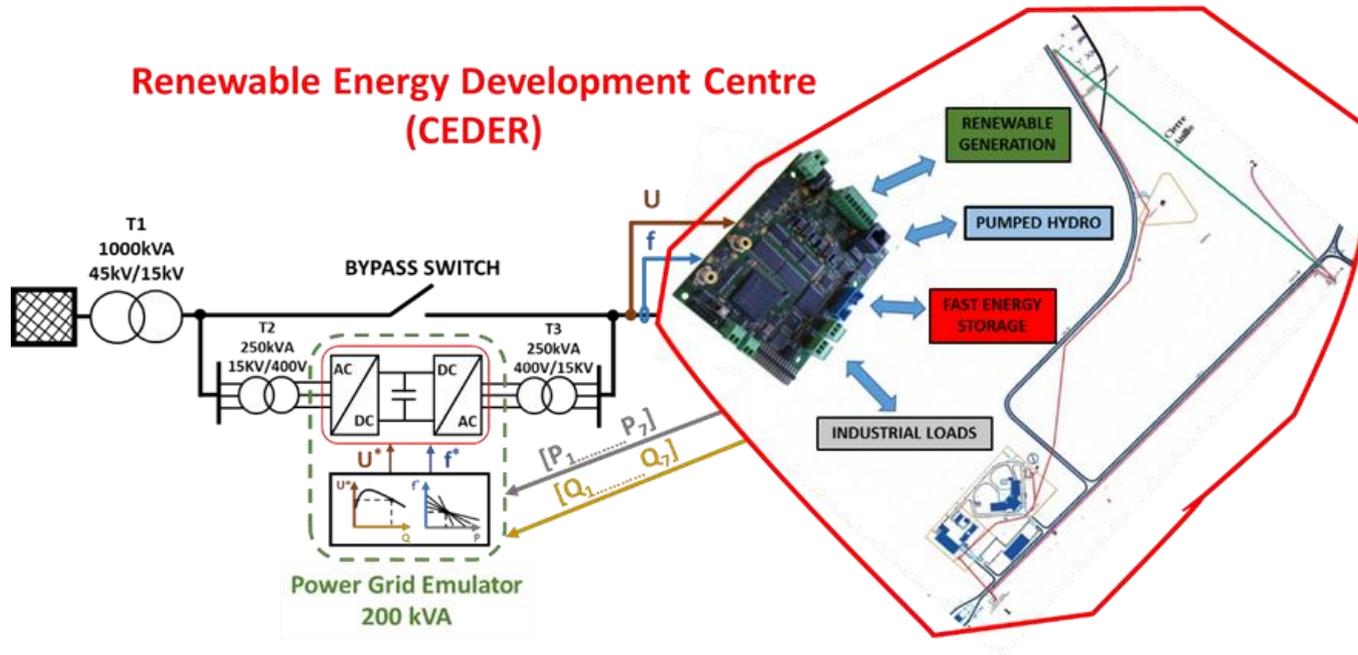
El equipo deberá permitir el funcionamiento de la microrred en modo autónomo o conectado a la red principal

1. Control de la frecuencia en la microrred a partir de un valor de referencia ( $f^*$ )
2. Control de la frecuencia en la microrred según un perfil de frecuencia/potencia (droop control)
3. **Control de la tensión en la microrred según un valor de referencia ( $V^*$ )**
4. **Control de la tensión en la microrred según un perfil de tensión/reacción (droop control)**



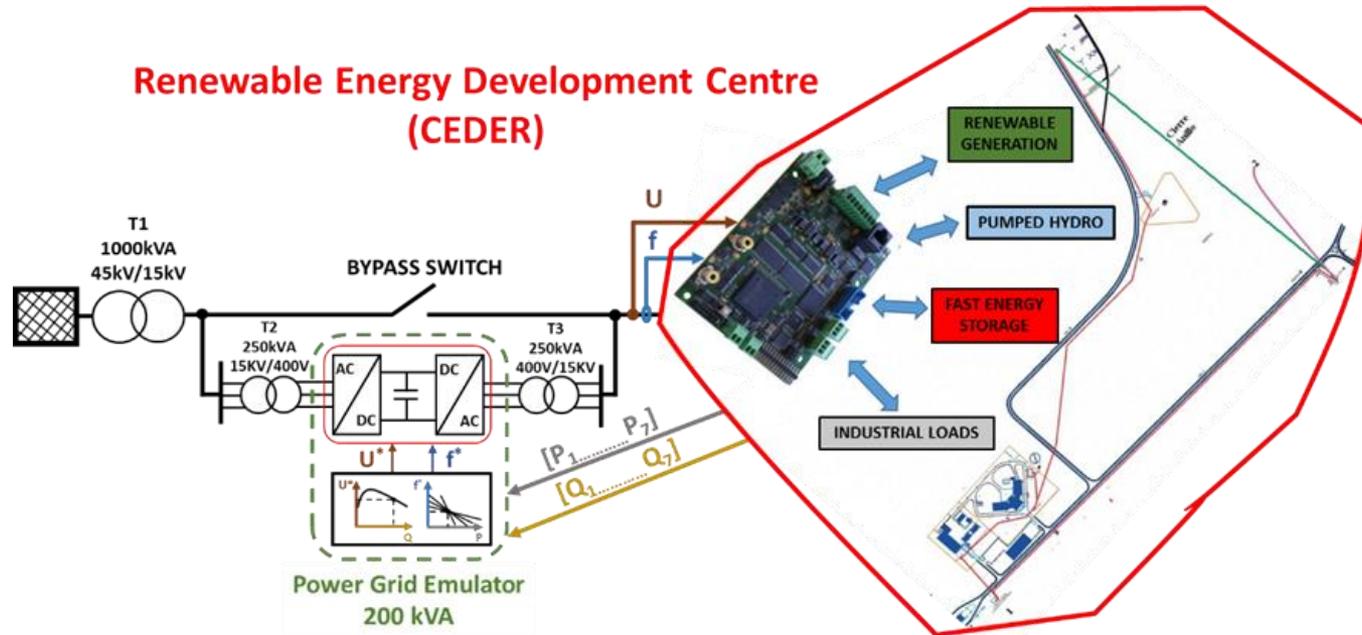
# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

5. Emulación de la dinámica de la microrred a partir de modelos de inercia variable que representan las características de cualquier red conocida con hardware in the loop (HIL, emulación de inercia y generador síncrono)



# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

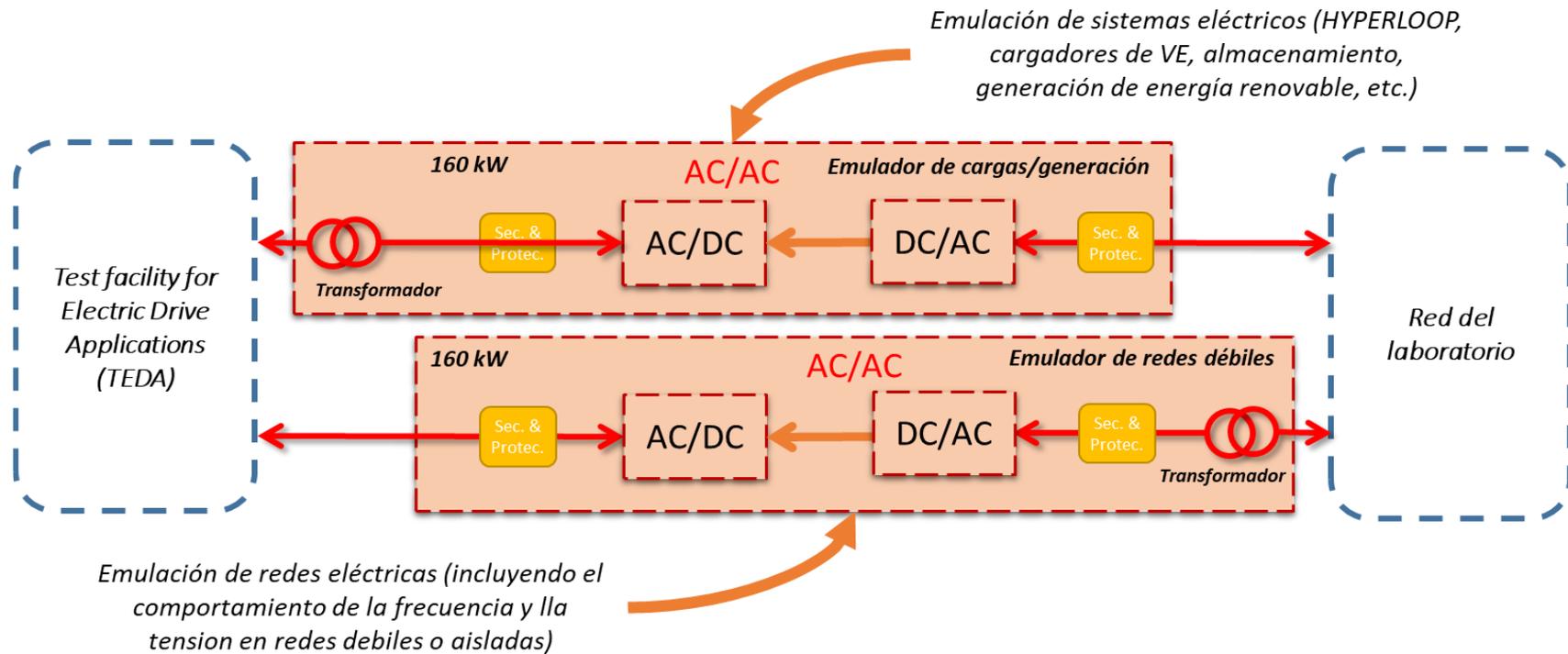
- Emulación de la dinámica de la microrred a partir de modelos de inercia variable que representan las características de cualquier red conocida con hardware in the loop (HIL, emulación de inercia y generador síncrono)



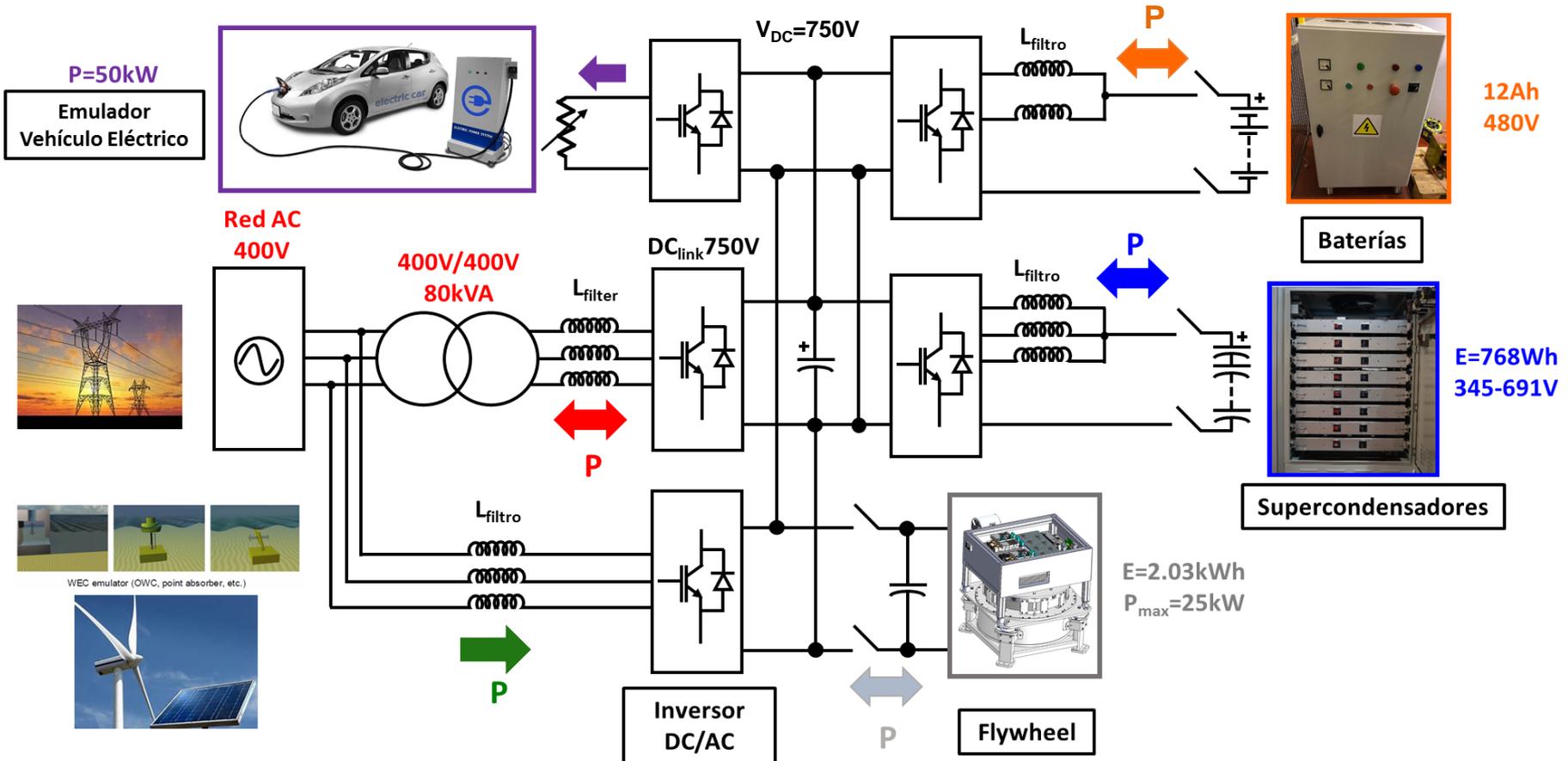
- Control de potencia directa con valor de referencia de potencia activa y reactiva ( $P^*$   $Q^*$ )

# PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

El equipo deberá permitir el funcionamiento de la microrred en modo autónomo o conectado a la red principal



# Esquema de conexionado de un sistema híbrido



# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HESS)
- III. Estrategias de control de HESS
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HESS
- V. Retos tecnológicos de los HESS**
- VI. Perspectiva futuro HESS

## RETOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDOS

- **Concienciación pública** para mejorar las tecnologías HESS
- Debe garantizarse el **apoyo** al desarrollo de la **infraestructura**, la **instalación** y el **mantenimiento** regular para aumentar la capacidad de instalación del HESS
- Es necesario ofrecer **incentivos** para la inversión en tecnologías de HESS
- La **mejora** de los **mercados energéticos** y las **redes débiles** atraerá a las empresas de distribución de energía de energía hacia el despliegue del HESS
- Las **directrices universales** para la selección de HESS y sus procedimientos operativos deben mejorarse de acuerdo con el desarrollo tecnológico actual
- La **investigación** sobre la tecnología HESS está estancada a **escala de laboratorio** con una perspectiva únicamente teórica, por lo que es necesario el desarrollo de proyectos que promuevan la comercialización e industrialización de la tecnología HESS
- Es aconsejable **idear soluciones** de HESS con el apoyo de **investigadores, asesores económicos, compañías eléctricas, consumidores y organizaciones sociales**

# Índice

- I. Introducción
- II. Topología de conexión sistemas híbridos de energía (HES)
- III. Estrategias de control de HES
- IV. Aplicaciones, Proyectos y operación de HES
- V. Retos tecnológicos de los HES
- VI. **Perspectiva futuro HES**

## PERSPECTIVA FUTURO DEL ALMACENAMIENTO HÍBRIDO

- Un **controlador EMS inteligente** con un rendimiento superior de HESS facilitará la adopción de redes inteligentes o microrredes en un futuro próximo
- El enfoque innovador de "**Internet de la energía**" para el futuro sistema de suministro y distribución de energía dependerá en gran medida del rendimiento, la flexibilidad y la fiabilidad del HESS
- El **desarrollo de nuevas tecnologías de baterías**, como el aluminio, el litio-aire, el sodio-ion y el grafeno para mejora sustancial de la vida útil y el rendimiento
- La novedosa **combinación de ESS** en diferentes medios (mecánico, térmico) ampliará las opciones de HESS para diversas aplicaciones
- El desarrollo de una **nueva estrategia de control** para el HESS mediante optimización multiobjetivo teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y económicas aún no se ha alcanzado
- **Banco de ESS reconfigurables** para cambiar la configuración del banco de baterías de forma dinámica para minimizar la carga de cada batería y mejorar el rendimiento del rendimiento del HESS y dar una larga vida útil



# MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

[gustavo.navarro@ciemat.es](mailto:gustavo.navarro@ciemat.es)