

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# ESTADO DEL ARTE DE MICRORREDES ENERGÉTICAS EN ESPAÑA

Autor: Irene Matilde Vázquez Trujillos

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Grupo de Termotecnia  
Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **ESTADO DEL ARTE DE MICRORREDES ENERGÉTICAS EN ESPAÑA**

Autor:

Irene Matilde Vázquez Trujillos

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor titular

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Máster: ESTADO DEL ARTE DE MICRORREDES ENERGÉTICAS EN ESPAÑA

Autor: Irene Matilde Vázquez Trujillos

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Resumen

---

La creciente preocupación por el cambio climático debido al aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, ha iniciado en la última década la búsqueda activa de soluciones que sustituyan las energías no limpias actuales. El desarrollo de avances tecnológicos en la industria de la energía renovable se ha visto motivado por este hecho. Estos avances han logrado la creación de sistemas de generación distribuida (DG), también conocida como generación descentralizada, generación dispersa o energía distribuida. Estos sistemas consisten básicamente en la generación de energía eléctrica por medio de muchas pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas. Estas fuentes de energía son las energías renovables, entre las que tienen un uso más extendido, la energía solar y la energía eólica.

Sin embargo, es un hecho conocido que esta introducción de sistemas de generación distribuida puede tener efectos adversos en la estructura de la red y en su funcionamiento. El concepto de microrred es la solución propuesta tanto para controlar el impacto de estos sistemas como para hacer las redes convencionales más adecuadas para el futuro despliegue de grandes redes de energía distribuida. Cubriendo muchos aspectos relacionados con los sistemas de energía y los campos relacionados con la electrónica de potencia, las microrredes se han convertido en un campo de investigación bastante conocido.

Este trabajo comienza revisando los antecedentes y el concepto de microrred, componentes y estructura. A continuación, presenta los principales proyectos vigentes de microrredes en España, describiendo con detalle la estructura y composición de cada uno, junto a un análisis estadístico de la dimensión de estas microrredes. Por último, se concluirá con un apartado de conclusiones y aspectos importantes identificados a lo largo del trabajo.

Se concluye así que el objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, revisar el concepto completo de microrred y dar a conocer la importancia de las mismas en el mundo actual, y por otro dar una visión al lector de la presencia, dimensión e importancia de este campo de investigación en España.



# Abstract

---

The growing concern about climate change due to the increase in the emission of greenhouse gases, has initiated in the last decade the active search for solutions to replace the current non-clean energy. The development of technological advances in the renewable energy industry has been motivated by this fact. These advances have led to the creation of distributed generation (DG) systems, also known as decentralized generation, dispersed generation or distributed energy. These systems basically consist of the generation of electrical energy by means of many small energy sources in locations as close as possible to the loads. These energy sources are renewable energies, among which solar energy and wind energy are the most widely used.

However, it is a known fact that this introduction of distributed generation systems can have adverse effects on the structure of the grid and its operation. The microgrid concept is the proposed solution both to control the impact of these systems and to make conventional networks more suitable for the future deployment of large distributed energy networks. Covering many aspects related to energy systems and the fields related to power electronics, microgrids have become a well-known research field.

This work begins by reviewing the background and concept of microgrids, components and structure. Then, it presents the main current projects of microgrids in Spain, describing in detail the structure and composition of each one, together with a statistical analysis of the dimension of these microgrids. Finally, it will be concluded with a section of conclusions and important aspects identified throughout the work.

It is thus concluded that the objective of this work is twofold. On the one hand, to review the complete concept of microgrids and to make known the importance of them in today's world, and on the other hand to give the reader a vision of the presence, dimension and importance of this field of research in Spain.

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xviii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Desarrollo de microrredes por el mundo</i>	2
1.1.1 Estados Unidos	2
1.1.2 Unión Europea	4
1.1.3 Japón	5
1.1.4 China	6
1.1.5 Corea	7
1.1.6 Australia	8
1.2. <i>España y las microrredes</i>	9
<b>2 DESCRIPCIÓN DE UNA MICRORRED</b>	<b>11</b>
2.1. <i>Concepto de microrred</i>	11
2.2. <i>Componentes</i>	12
2.2.1. <i>Equipos de generación de energía</i>	13
2.2.2. <i>Equipos de almacenamiento de energía</i>	23
2.2.3. <i>Equipos de consumo de energía</i>	30
<b>3 MICRORREDES ENERGÉTICAS EN ESPAÑA</b>	<b>31</b>
3.1 <i>Microrredes del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)</i>	32
3.1.1 Microrred del CNH2	32
3.1.2 Laboratorio de microrredes del CNH2	33
3.2 <i>Microrred de la Universidad de Navarra (UNA)</i>	37
3.3 <i>Microrred de la Universidad de Valencia</i>	40
3.4 <i>Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa</i>	42
3.5 <i>Microrred Atenea (CENER)</i>	45
3.6 <i>Microrred del LIER (Laboratorio de Integración de Energías Renovables)</i>	47
3.7 <i>Microrred del GIPSE (Laboratorio de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia) del CIRCE</i>	48
3.8 <i>Microrred del LINTER (Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes) de la Fundación Gas Natural Fenosa</i>	50
3.9 <i>Microrred del SEIL (Laboratorio de Integración de Energía Inteligente) del Instituto IMDEA Energía</i>	52
3.10 <i>Microrred Walqa de la Fundación Hidrógeno Aragón</i>	55
3.11 <i>Microrred IREC (Instituto de Investigación en Energía de Cataluña)</i>	59
3.12 <i>Microrred del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial)</i>	61
3.13 <i>Microrred del IIE (Instituto De Ingeniería Energética)</i>	63
3.14 <i>Microrred Del ITE (Instituto Tecnológico De La Energía)</i>	64
3.15 <i>Microrred de Tecnalía</i>	67
3.16 <i>Microrred de la Universidad de Oviedo</i>	69

3.17	<i>Microrred de la Universidad de Sevilla-Laboratorio De Automática Hylab</i>	71
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DIMENSIONADO DE MICRORREDES</b>	<b>76</b>
4.1	<i>Fuentes de generación presentes en las microrredes de España</i>	77
4.1.1	Análisis del Tamaño Medio de los Equipos Renovables	77
4.1.2	Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y potencia gestionada por la microrred	80
4.2	<i>Fuentes de almacenamiento presentes en las microrredes de España</i>	82
4.2.1	Tipos de baterías	82
4.2.2	Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de las baterías.	83
4.2.3	Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de los ultracondensadores	85
4.2.4	Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la tecnología del hidrógeno	86
4.3	<i>Fuentes de consumo presentes en las microrredes de España</i>	92
4.3.1	Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y de los equipos de consumo de la microrred	93
4.3.2	Relación entre potencia gestionada por la microrred y la potencia instalada de los equipos de consumo de la microrred	93
4.3.3	Relación entre potencia instalada de los equipos de generación y de los equipos de consumo de la microrred	94
4.4	<i>Relación entre la potencia gestionada y potencia instalada de generación de las microrredes de España</i>	95
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	<b>96</b>
	<b>Referencias</b>	<b>100</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Asociación Numérica de las Microrredes	76
Tabla 2 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (1)-Equipos de Generación	107
Tabla 3 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (2)- Equipos de Almacenamiento	108
Tabla 4 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (3)- Equipos de Consumo	109
Tabla 5 Tabla 4 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (4)-Potencia Gestionada	110

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 En la imagen de la izquierda se muestra una gráfica donde el eje vertical muestra el nombre de las regiones mientras el eje horizontal muestra el número de proyectos operativos por cada una de esas regiones. A la derecha, un gráfico circular que muestra en porcentaje (tanto por ciento) la capacidad instalada por región. Fuente: Trabajo Fin de Grado “Análisis de la Viabilidad de la Implantación de Micro Redes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas. Autor: Mónica López Tafall Criado [10].	2
Ilustración 2 Selección de proyectos de evaluación y demostración de microrredes federales de EE.UU. Fuente: OE (Office of Electricity-Department of Energy-USA).[6]	3
Ilustración 3 Microrred de CERTS [9]	3
Ilustración 4 Esquema unifilar de Gaidouromantra, Isla de Kythnos, Grecia [8]	4
Ilustración 5 Sistema de Prueba de las Microrredes en DeMoTec, Alemania [3]	5
Ilustración 6 Diagrama del Proyecto de Microrred de Aichi, Japón Fuente: IEEE power & energy magazine (May/June 2008).[9].	6
Ilustración 7 Algunos microrredes en China. Fuente: Microgrid in China: A review in the perspective of application.[5]	7
Ilustración 8 Imágenes de la microrred del KERI, Corea. Fuente: Presentación de Dr. Kim, publicado en Word Press. [7].	7
Ilustración 9 A la izquierda aerogeneradores y placas solares de la microrred de la isla de Gasa. A la derecha el sistema de control de la microrred de la isla de Gasa.[7]	8
Ilustración 10 Modelo tradicional de generación, distribución y consumo de energía	11
Ilustración 11 Esquema de una microrred	12
Ilustración 12 Esquema de los componentes típicos de una microrred [14]	13
Ilustración 13 Composición de una célula fotovoltaica [16]	13
Ilustración 14 Tipos de soluciones de paneles solares fotovoltaicos [16]	14
Ilustración 15 Producción mundial anual de fotovoltaica por tecnología (en Gwp). Fuente:Datos desde 2000 hasta 2010: Navigant; desde 2011 hasta actualidad: IHS Markit. Gráfico: PSE GmbH 2019. [15]	15
Ilustración 16 Porcentaje de instalaciones solares fotovoltaicas (acumulada) por regiones en el mundo. Fuente: Datos: IRENA(International Renewable Energy Agency). Gráfico: PSE GmbH 2019. [15]	15
Ilustración 17 Potencia fotovoltaica instalada en España peninsular en MW. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting [19]	16
Ilustración 18 Diferencias entre barlovento y sotavento. [16]	17
Ilustración 19 Tipos de aerogeneradores [16]	17
Ilustración 20 Evolución de la potencia instalada en el mundo de energía eólica en MW. Fuente: GWEC (Global Wind Energy Council). [18]	17
Ilustración 21 Ranking de países por potencia instalada de energía eólica (acumulada) en MW. Fuente: GWEC	

<i>(Global Wind Energy Council). [18]</i>	18
Ilustración 22 Potencia eólica instalada en España. <i>Fuente: AEE (Asociación Empresarial Eólica). [18]</i>	18
Ilustración 23 Clasificación de la energía solar térmica	19
Ilustración 24 Funcionamiento de una planta termo solar [22]	19
Ilustración 25 Proceso de funcionamiento de una pila de combustible. <i>Fuente: Ecured.</i>	20
Ilustración 26 Diagrama básico de una micro-turbina[22]	22
Ilustración 27 Distribución de la minicentrales hidroeléctricas en España. <i>Fuente: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. [23]</i>	23
Ilustración 28 Sistemas de almacenamiento de energía según relación de densidad de potencia/densidad de energía. <i>Fuente: Dotsch, C., 2009. Energy storage. en Technology Guide. Springer, pp. 362–367. [14]</i>	23
Ilustración 29 Esquema de sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno [21]	24
Ilustración 30 Esquema de funcionamiento de baterías de flujo Vanadio Redox [24]	26
Ilustración 31 Esquema de un sistema FES [24]	27
Ilustración 32 Esquema de una instalación de bombeo hidráulico [22]	28
Ilustración 33 Diagrama esquemático del funcionamiento del CAES [24]	29
Ilustración 34 Diagrama esquemático de un supercondensador [24]	29
Ilustración 35 Esquema de un superconductor (SMES) [24]	30
Ilustración 36 Esquema de la microrred del Centro Nacional de Hidrógeno [24]	33
Ilustración 37 Gestión realizada por las herramientas de optimización de los recursos de la microrred [25]	34
Ilustración 38 Equipos de electrónica de potencia del CNH2 [25]	35
Ilustración 39 Ejemplo del sistema SCADAs del CNH2 [25]	35
Ilustración 40 Esquema de las microrredes experimentales del CNH2 [25]	36
Ilustración 41 Vistas de los paneles fotovoltaicos, aerogenerador, baterías y supercondensadores. [25]	36
Ilustración 42 Convertidor Ingecon Hybrid MS30, con sus tres módulos, de arriba abajo: (1) convertidor eólico, (2) cargador de baterías y convertidor fotovoltaico y (3) inversor. (UPNA) [29]	37
Ilustración 43 Paneles fotovoltaicos en el tejado del laboratorio. (UPNA). [29]	38
Ilustración 44 Aerogenerador Bornay sobre la torre de 20 m y transformador.(UPNA). [29]	38
Ilustración 45 Carga programable junto a ordenador de simulación de demanda doméstica. (UPNA).[29]	38
Ilustración 46 Esquema general de la microrred de la UPNA [28]	39
Ilustración 47 Esquema de las comunicaciones de la microrred de la UPNA.[29]	40
Ilustración 48 Microrred experimental del Grupo de Sistemas [30]	40
Ilustración 49 Esquemático de la microrred híbrida con seis nodos y sus interfaces	41
Ilustración 50 Edificio Enertic en el Polígono Industrial 27 de San Sebastián [32]	42
Ilustración 51 Esquema de la microrred i-Sare [31]	43
Ilustración 52 Infraestructura de la red de comunicación y de control de la microrred [31]	44
Ilustración 53 Esquema de la microrred Atenea del CENER [35]	45
Ilustración 54 Equipos de generación de la Microrred Atenea Del CENER [35]	45
Ilustración 55 Equipos del almacenamiento de la microrred Atenea del CENER [35]	46
Ilustración 56 Equipos de consumo de la microrred Atenea del CENER [35]	46

Ilustración 57 Esquema del control de la microrred Atenea del CENER [35]	47
Ilustración 58 Esquema de la microrred del LIER [65]	48
Ilustración 59 Fotografía de los equipos que conforman el RTDS de la microrred del GIPSE. [65]	49
Ilustración 60 Esquema de la microrred del GIPSE, CIRCE [65]	50
Ilustración 61 Esquema de la microrred del LINTER [39]	51
Ilustración 62 Armario de contadores inteligentes de la microrred del LINTER [39]	52
Ilustración 63 Lay Out del laboratorio del SEIL [41]	53
Ilustración 64 Esquema unifilar del laboratorio del SEIL [40]	54
Ilustración 65 Esquema de los niveles de control del simulador de microrredes del SEIL [41]	54
Ilustración 66 Esquema de la microrred experimental del SEIL [41]	55
Ilustración 67 Turbinas eólicas de la microrred Walqa de la FHA[42]	56
Ilustración 68 A la izquierda, instalación de placa fija instalada en las marquesinas del parking. A la derecha, Seguidores solares en el parking de FHA.[42]	57
Ilustración 69 Instalaciones para la producción y consumo del hidrógeno producido de la FHA [42]	57
Ilustración 70 Esquema general de la microrred Walqa [45]	58
Ilustración 71 Esquema detallado de la microrred Walqa [45]	58
Ilustración 72 Esquema general de la microrred IREC Energy SmartLab [46]	60
Ilustración 73 Arquitectura general de la gestión y de la comunicación de la microrred del IREC. [46]	60
Ilustración 74 Instalaciones de la microrred implantada en las instalaciones del INTA, en Mazagón (Huelva) [49]	61
Ilustración 75 Esquema de la microrred del INTA [51]	62
Ilustración 76 Esquema de implantación de la red de sensores LoRAWAN desplegada por UAIG en la microrred del INTA [50]	62
Ilustración 77 A la izquierda, SCADA de la microrred experimental del INTA. A la derecha, arquitectura de la plataforma IoT desarrollada por ITG en la microrred del INTA [51]	63
Ilustración 78 Esquema de la microrred del IIE de la Universidad Politécnica de Valencia [52]	64
Ilustración 79 Instalaciones de la microrred del ITE en el Parque Tecnológico de Paterna, Valencia.[58]	65
Ilustración 80 Esquema de la microrred del Instituto Tecnológico de la Energía[65]	65
Ilustración 81 Placas solares de la microrred del ITE colocadas en la fachada del edificio.[58]	66
Ilustración 82 Imagen de las instalaciones del laboratorio Labein, Tecnalia [60]	67
Ilustración 83 Esquema de la microrred del laboratorio Labein en Tecnalia [60]	68
Ilustración 84 Microrred LEMUR de la Universidad de Oviedo [62]	69
Ilustración 85 Convertidor medio de energía de tensión : 4 kV junto a la fuente de corriente continua de 150 kW de la microrred de la Universidad de Oviedo [62]	70
Ilustración 86 Esquema de la microrred LEMUR de la Universidad de Oviedo [65]	71
Ilustración 87 Microrred original del HyLab de la Universidad de Sevilla [64]	72
Ilustración 88 Microrred del HyLab de la Universidad de Sevilla en la actualidad [64]	72
Ilustración 89 Esquema de la microrred del Hylab de la Universidad de Sevilla [64]	74
Ilustración 90 Arquitectura de control de la microrred en el HyLab de la Universidad de Sevilla [64]	74
Ilustración 91 Sistema de comunicaciones de la microrred Hylab en la Universidad de Sevilla [64]	75

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Generación por tipología en las microrredes españolas	77
Gráfica 2 Tamaño de los Equipos Solares Fotovoltaicos (kW) vs Microrredes en España	78
Gráfica 3 Tamaño de los Equipos Solares Fotovoltaicos vs microrredes en España (excluyendo grandes microrredes)	78
Gráfica 4 Tamaño de los Equipos solares Eólicos vs Microrredes en España	79
Gráfica 5 Tamaño de los Equipos Eólicos vs Microrredes en España (excluyendo grandes microrredes)	79
Gráfica 6 Relación de Potencia Instalada de Fotovoltaica vs Potencia Gestionada por las microrredes de España	80
Gráfica 7 Relación de Potencia Instalada Eólica vs Potencia Gestionada por las microrredes	81
Gráfica 8 Potencia Instalada Eólica y Potencia Gestionada por las microrredes de España	81
Gráfica 9 Relación Potencia Instalada Eólica vs Potencia Gestionada por la microrred excluyendo grandes microrredes	82
Gráfica 10 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Almacenamiento por tipología en las microrredes españolas	82
Gráfica 11 Porcentaje de Presencia de Baterías por tipología en las microrredes españolas	83
Gráfica 12 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de las Baterías (kWh) de las microrredes españolas	83
Gráfica 13 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de las Baterías (kWh) de las microrredes españolas (excluyendo microrred 12)	84
Gráfica 14 Ratio de Capacidad de las Baterías vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas excluyendo microrred 12.	85
Gráfica 15 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Ultracondensadores (Wh) de las microrredes españolas	85
Gráfica 16 Ratio de Capacidad de los Ultracondensadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas	86
Gráfica 17 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Electrolizadores (KW) de las microrredes españolas	87
Gráfica 18 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Electrolizadores (KW) de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes	87
Gráfica 19 Ratio de Capacidad de los Electrolizadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas	88
Gráfica 20 Ratio de Capacidad de los Electrolizadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas	88

Gráfica 21 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de la Pila de Combustible (KW) de las microrredes españolas	89
Gráfica 22 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de la Pila de Combustible (KW) de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes	89
Gráfica 23 Ratio de Capacidad de la Pila de Combustible vs Potencia Instalada Renovable de las microrredes españolas	90
Gráfica 24 Ratio de Capacidad de la Pila de Combustible vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes	90
Gráfica 25 Tamaño de los tanques de hidrógeno (en litros) de las microrredes españolas	91
Gráfica 26 Potencia Instalada Renovable vs Capacidad de Almacenamiento de Hidrógeno de las microrredes españolas	91
Gráfica 27 Ratio de Potencia instalada Renovable vs Capacidad de Almacenamiento de Hidrógeno de las microrredes españolas	92
Gráfica 28 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Generación por tipología en las microrredes españolas	92
Gráfica 29 Ratio de Potencia instalada Renovable vs Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas	93
Gráfica 30 Ratio de Potencia gestionada vs la potencia instalada de consumo de las microrredes españolas	94
Gráfica 31 Ratio de Potencia instalada de generación vs la Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas	94
Gráfica 32 Ratio de Potencia instalada de generación vs la Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas	95
Gráfica 33 Potencia Instalada Fotovoltaica y Eólica vs Potencia Gestionada por las microrredes españolas	97
Gráfica 34 Potencia Instalada Fotovoltaica vs Potencia Instalada Eólica en las microrredes españolas	98



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La creciente preocupación por los impactos ambientales causados por las centrales de generación de carbón, sobre todos aquellos relacionadas con la alta cantidad de emisiones de dióxido de carbono, es el principal factor que ha impulsado la transición hacia una generación de energía eléctrica menos agresiva con el medio ambiente. Los gobiernos y las industrias de todo el mundo están buscando cada vez más formas de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sus operaciones, centrándose sobre todo en el uso e instalación de sistemas de energía sostenibles.

La necesidad de sistemas de gestión de la electricidad mucho más eficientes y con fuentes de energía limpias ha dado lugar al desarrollo de tecnologías innovadoras y de ideas revolucionarias en la generación y transmisión de la energía. Una de estas soluciones es aumentar la implantación de sistemas de generación distribuida en el suministro de la electricidad. La generación distribuida de electricidad es conocida por este nombre debido a que se basa en la generación de energía eléctrica por medio de fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas/consumidores. La generación distribuida puede incluir también sistemas de energía renovable tales como son la solar, la eólica o la energía procedente de las olas, las cuales prometen ser energías limpias que conducen a la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. Esto contribuirá por lo tanto a la reducción del calentamiento global, aspecto fundamental en la conservación del planeta y de nuestra especie.

En consecuencia, los gobiernos y las autoridades de regulación de la energía en todo el mundo están fomentando el despliegue de las energías renovables basado en sistemas de generación distribuida. Sin embargo, la introducción de estas microfuentes (paneles fotovoltaicos de pequeña escala, turbinas de viento y generadores diésel) en la red cambia la estructura tradicional radial de la red. Este cambio revolucionario en la estructura desencadena muchos problemas que antes eran desconocidos para los operadores de red e ingenieros dedicados a este campo. Ahora existen varias microfuentes a diferentes niveles de penetración en la red y esta nueva estructura invalida los métodos tradicionales de control de flujo de la energía en la red. Se puede decir que actualmente aún hay presentes muchos desafíos técnicos que deben ser superados para que estos sistemas de energía distribuida se puedan integrar a los sistemas de energía eléctrica existentes de forma rentable, fiable y segura. La principal razón es que los sistemas de distribución existentes no están diseñados para una introducción de sistemas de generación distribuida. Esto es debido a que estos sistemas de distribución fueron diseñados con el supuesto de una red pasiva. Se explicará este concepto con más detalle. Una red de distribución pasiva es una red diseñada para aceptar energía del sistema de transmisión y distribuir a los clientes. En cambio, las redes de distribución activas (como las microrredes) añaden a lo anterior generadores distribuidos locales, lo que implica que hay flujos de energía bidireccionales y ello exige un control flexible e inteligente de la red. La interconexión de los sistemas descentralizados de generación de energía renovable a esas redes cambia inevitablemente las características del sistema y presenta desafíos técnicos como la coordinación de la protección de los circuitos, la calidad de la energía, la fiabilidad del suministro y los problemas de estabilidad. Es por ello que el objetivo de tener el control de muchos sistemas de generación distribuida al mismo tiempo está aún en fase de desarrollo.

En conclusión, la integración de estas fuentes de energía para hacer frente al calentamiento global implica cambios fundamentales en el campo de la ingeniería eléctrica en todo lo asociado a la distribución y transmisión de esta electricidad renovable. Las microrredes se presenta como una solución capaz de coordinar y gestionar los sistemas de energía renovable de manera más descentralizada, reduciendo así la necesidad de coordinación y gestión centralizadas de esos sistemas. Sin embargo, todavía queda un largo camino en la investigación y

desarrollo para poder implementar las microrredes en su totalidad. A continuación, se repasará estos estudios de investigación y desarrollo en el campo de las microrredes a nivel mundial. [9],[13]

## 1.1. Desarrollo de microrredes por el mundo

Actualmente gran parte de los proyectos operativos se localizan en Estados Unidos, China y Japón. Según el criterio de capacidad instalada los primeros de la lista son Estados Unidos (205 MW), China (86 MW) y Japón (68 MW), y por detrás se encuentran los proyectos de Dinamarca (63 MW), Australia (37 MW), Corea del Sur (28,5 MW), Guadalupe (28,5 MW), Cabo Verde (25 MW) y Brasil (25 MW) que, junto con los tres primeros, reúnen el 75% de la potencia total instalada a nivel mundial. [10].

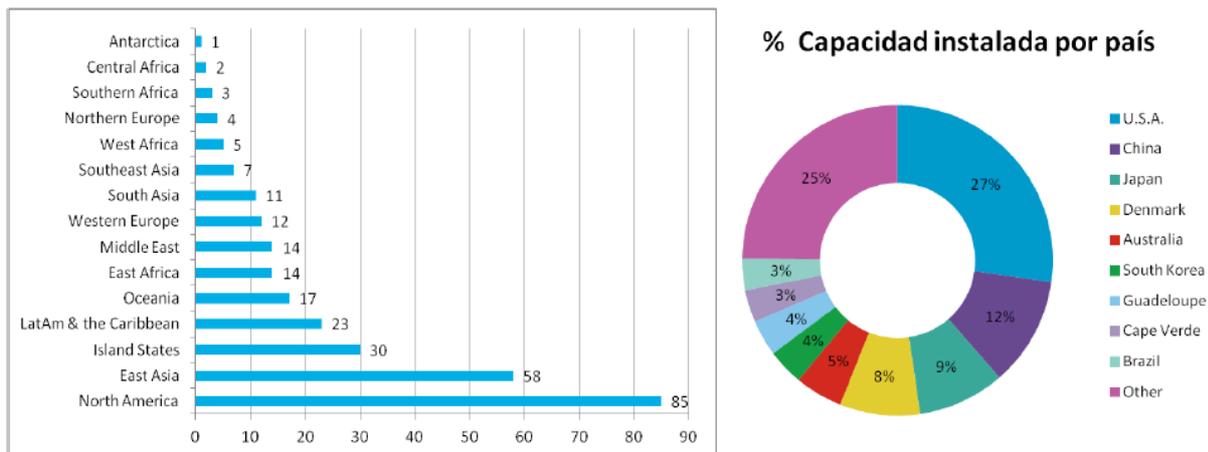


Ilustración 1 En la imagen de la izquierda se muestra una gráfica donde el eje vertical muestra el nombre de las regiones mientras el eje horizontal muestra el número de proyectos operativos por cada una de esas regiones. A la derecha, un gráfico circular que muestra en porcentaje (tanto por ciento) la capacidad instalada por región. Fuente: Trabajo Fin de Grado "Análisis de la Viabilidad de la Implantación de Micro Redes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas. Autor: Mónica López Tafall Criado [10].

Seguidamente, se revisarán los proyectos más destacables en los distintos países. Estos proyectos tienen como finalidad comprender el funcionamiento de las microrredes y solucionar los problemas anteriormente descritos. Se han estudiado diferentes tecnologías y topologías para diferentes propósitos. Algunos de estos experimentos se llevan a cabo con fines de investigación y desarrollo y otros se despliegan en islas o redes aisladas.

### 1.1.1 Estados Unidos

Las microrredes se han hecho cada vez más populares en los Estados Unidos. Alrededor del 34% de los proyectos de microrredes del mundo se encuentran en los Estados Unidos.

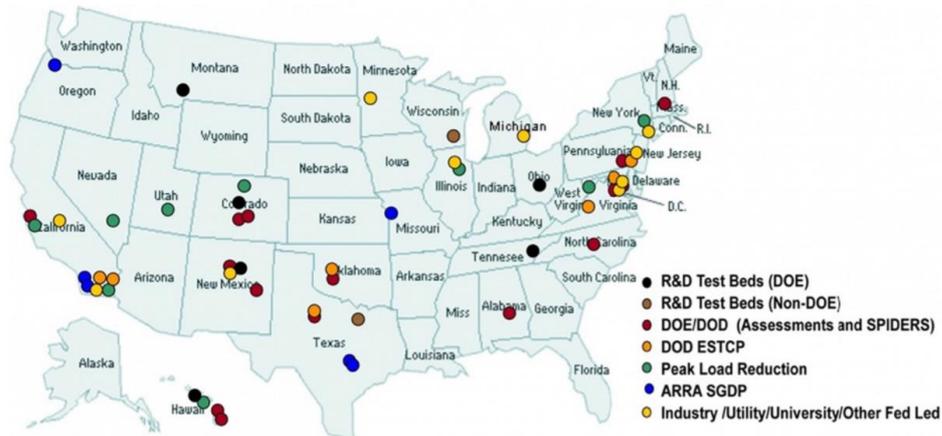


Ilustración 2 Selección de proyectos de evaluación y demostración de microrredes federales de EE.UU.

*Fuente: OE (Office of Electricity-Department of Energy-USA). [6]*

La microrred del CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions), es de las microrredes más conocidas de Estados Unidos. Surge de la colaboración entre varias entidades: AEP, TECOGEN, Northern Power Systems, S&C Electric Co, Sandia National Laboratories y la Universidad de Wisconsin. Consiste en varios sistemas de generación distribuida y un tiristor para permitir el aislamiento de la red. El objetivo principal de esta investigación fue facilitar la conexión de los pequeños generadores distribuidos a la red. Como resultado, tres teorías avanzadas, también conocidas como la teoría de microrred de CERTS, se han desarrollado disminuyendo así el trabajo de ingeniería en el campo de las microrredes. Estas teorías pueden resumirse en un método que permite asegurar la transición automática y sin problemas entre el estado de la red conectada y el estado de red aislada, y que por otro lado proporciona una mayor protección y control de la microrred para estabilizar la frecuencia y el voltaje del sistema. Además, en relación con el proyecto CERTS están siendo desarrolladas dos herramientas de software requeridas para el correcto funcionamiento de una microrred. Se trata de herramientas de análisis de redes (Grid) desarrolladas por Georgia Institute of Technology y por Distributed Energy Resources Customer Adoption Model (DER-CAM) en el Berkeley Lab.

También existen otras implementaciones en marcha en Mad River Waitsfield llevadas a cabo por Northern Power Systems, British Columbia Institute of Technology Microgrid y por General Electric Microgrid. Estos sistemas se encuentran actualmente en fase de I+D y tienen como objetivo diseñar estrategias de control y protección para los diferentes tipos de microrredes. [9],[6].

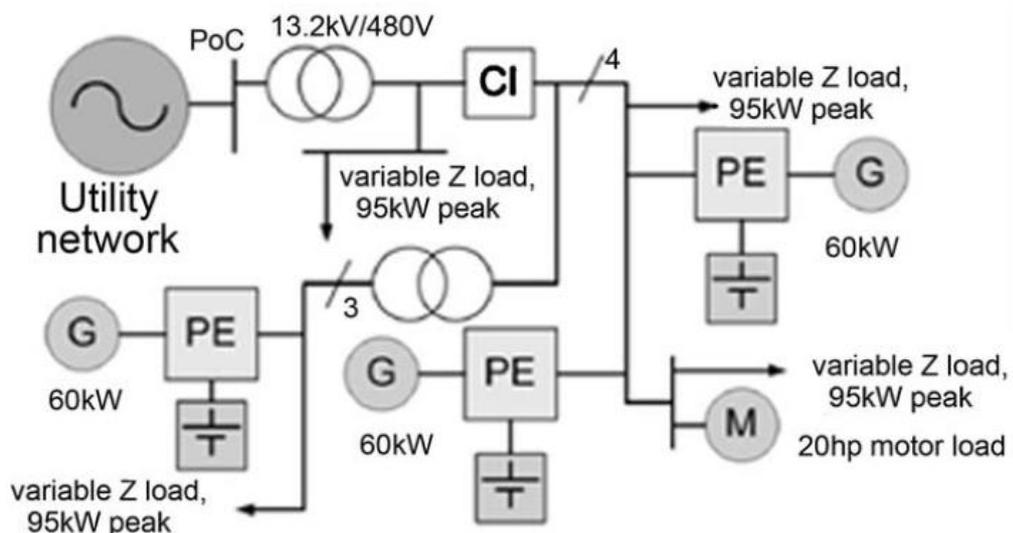


Ilustración 3 Microrred de CERTS [9]

### 1.1.2 Unión Europea

El nivel de concienciación acerca del cambio climático en la UE es bastante elevado y hay ciertos objetivos que deben ser alcanzados por sus estados miembros para el año 2020. Hay varias directivas aprobadas por el Parlamento de la UE como la 2001/77/EC, 2003/30/CE y 2006/32/CE. Estas directivas estipulan reducir las emisiones de carbono (causantes del cambio climático) en ciertas cantidades, incrementar la participación de las energías renovables en el mercado energético y disminuir el consumo energético mediante el incremento de la eficiencia energética.

En consecuencia, hay incentivos de la UE y varios proyectos en curso entre sus países miembros. El primer proyecto financiado por la UE fue el “Microgrids Project”, emprendido por un consorcio liderado por National Technical University of Athens (NTUA). El objetivo era investigar la dinámica de los sistemas de generación distribuida en las microrredes y desarrollar estrategias para una serie de cuestiones como los algoritmos de control, esquemas de protección y la definición de la respuesta interfaz del sistema de generación distribuida, así como los requisitos de inteligencia. Se realizó una instalación piloto en la Isla de Kythnos, Grecia.

El objetivo de este proyecto era diseñar y construir una microrred que permitiera electrificar las casas vacacionales de la isla. El resultado fue la microrred en Gaidouromantra (Kythnos), una microrred trifásica compuesta por las líneas aéreas y un cable de comunicación en paralelo. Este sistema electrifica a un total de 12 casas con un servicio eléctrico monofásico. Además, las especificaciones de red y de seguridad para las conexiones de las casas respetan las soluciones técnicas de la compañía eléctrica local.

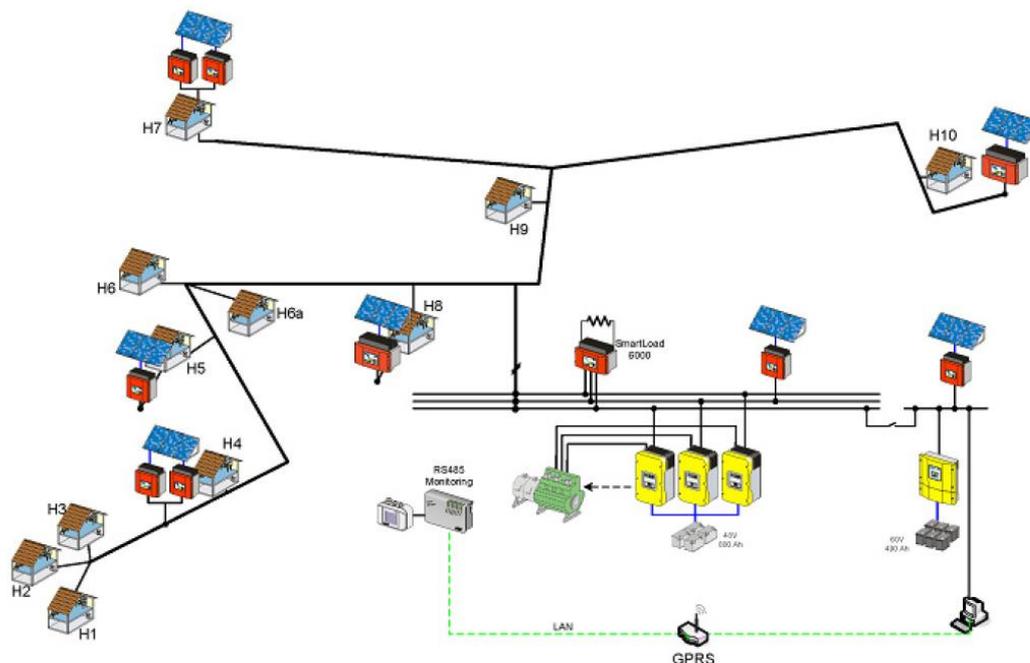


Ilustración 4 Esquema unifilar de Gaidouromantra, Isla de Kythnos, Grecia [8]

La microrred de Kythnos posee un total de 7 conjuntos fotovoltaicos distribuidos con una potencia de 11 KWp, dos bancos de baterías de plomo ácido y un generador diésel de respaldo de 9KVA. Las cargas se componen principalmente por los refrigeradores, la luminaria y las bombas de las viviendas representadas como cargas óhmicas e inductivas, constantes y programables. La microrred incluye controladores de carga para protegerse contra la sobrecarga o la descarga extrema de la batería. [8],[9].

Por otra parte, también cabe destacar el estudio exhaustivo sobre el control de la microrred llevado a cabo por el Instituto de Tecnología de Suministro de Energía Solar (ISET) en Alemania. El estudio fue desarrollado en el centro de diseño del laboratorio de Microrredes (DeMoTEC) en el ISET, el cual es un emplazamiento destinado a probar las fuentes de energía distribuida. DeMoTEC posee una capacidad total de generación de 200 KW, constituido por un generador fotovoltaico, un generador eólico, dos unidades de batería y dos generadores diésel. [3],[9].

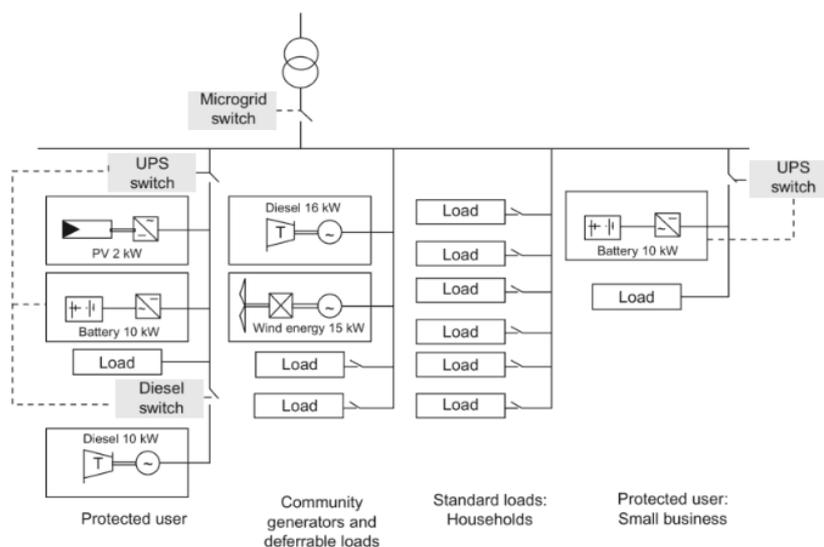


Ilustración 5 Sistema de Prueba de las Microrredes en DeMoTec, Alemania [3]

El proyecto “Microgrids Project” fue proseguido por el proyecto “More Microgrids Project”, de nuevo emprendido por un consorcio liderado por la NTUA. Este proyecto fue ejecutado para estudiar métodos y estrategias alternativos junto con nuevos conceptos como el “plug-and-play” (referido a la capacidad de un sistema de configurar automáticamente los dispositivos conectados). El emplazamiento elegido para la demostración es una finca con categoría ecológica en Mannheim–Wallstadt, Alemania. [9]

Dinamarca también tiene una política energética muy proactiva. El parlamento danés estableció un acuerdo energético con los siguientes objetivos: una penetración de la energía eólica del 50% para 2020 y del 100% de la energía renovable en los sectores de la electricidad y calefacción para 2035 y el objetivo final de ser 100% independientes de los combustibles fósiles para el año 2050. En relación con la planificación y operación del futuro sistema de energía y el desarrollo de microrredes inteligentes, la Isla Bornholm es de gran interés debido a las características de su sistema energético. El sistema de energía de Bornholm tiene una alta proporción de electricidad suministrada por fuentes de energía renovable. El sistema de generación de energía en la isla consiste en una unidad de vapor (combinación de calor y energía (CHP)), dos unidades de generación de biomasa, 14 unidades diésel y generadores de energía eólica que suministran el 30% del consumo total de electricidad. Está prevista la ampliación de la potencia instalada de los aerogeneradores en 20 MW. El sistema de energía de la isla es capaz de pasar de conexión a la red a modo de operación isla/aislado. [4]

Otras implementaciones con escalas más pequeñas incluyen el Labein Microgrid en España, Frielas Feeder en Portugal, CESI Microgrid en Italia, Continuum Holiday Camp Microgrid en los Países Bajos y Am Steinweg Settlement en Alemania. [9]

### 1.1.3 Japón

Japón está comprometido con el uso de energías renovables. Tras los accidentes nucleares que ha sufrido el país, Japón inició una transición energética encaminada a reducir el peso de la energía nuclear y a aumentar la importancia de las energías renovables. Los sistemas de energía renovable usados en Japón son principalmente turbinas eólicas y sistemas fotovoltaicos, cuya naturaleza intermitente es un contratiempo adicional. La capacidad de las microrredes de abordar estos problemas ha motivado nuevos proyectos en este campo y, por ende, Japón se ha convertido en el país que tiene la mayor cantidad de proyectos de microrredes en ejecución del mundo. La mayoría de los proyectos están financiados por New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). En 2003 se instalaron tres emplazamientos dedicados a pruebas en el marco del “Proyecto de Energía Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables” de NEDO. El primer proyecto comenzó a funcionar en la Exposición Mundial de 2005 en Aichi, aunque fue trasladado a la ciudad de Tojoname, cerca de Nagoya, en 2006. Este sistema usa pilas de combustible, paneles fotovoltaicos y un sistema de almacenamiento de baterías de sodio-azufre. La microrred se utiliza para alimentar algunos pabellones importantes y se puso a prueba dos veces para su funcionamiento independiente en 2005 y 2007. Aunque la primera prueba reveló algunas deficiencias en el control del voltaje y la frecuencia, el segundo experimento fue

más exitoso.

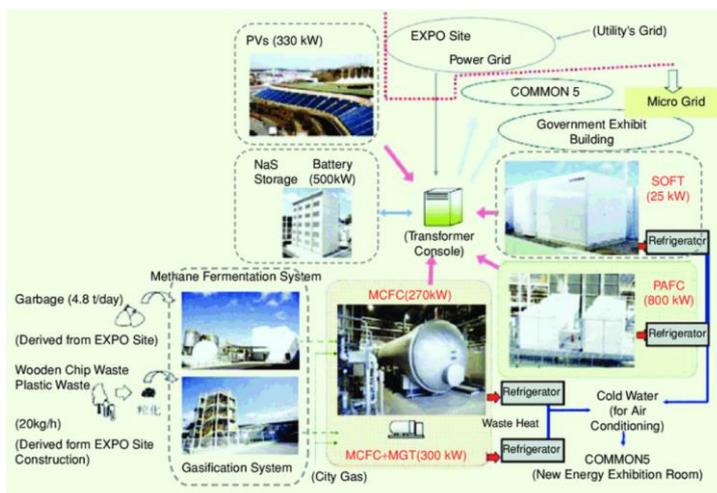


Ilustración 6 Diagrama del Proyecto de Microrred de Aichi, Japón Fuente: *IEEE power & energy magazine* (May/June 2008).[9].

El segundo emplazamiento está en Kyotango, conformado por una planta de biogas conectada a dos sistemas fotovoltaicos y a una pequeña turbina de viento. El tercer proyecto está llevado a cabo por Mitsubishi Research Institute y por Mitsubishi Electric en Hachinohe. Este sistema tiene su distribución privada y consiste en sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, motores de gas y el almacenamiento.

Un proyecto adicional ha sido iniciado por NEDO en la ciudad de Sendai, donde se estudiará la posibilidad de cuatro niveles de suministro a los clientes. Contiene un sistema de respaldo de calidad de energía con el fin de reducir las interrupciones y caídas de tensión. Este sistema ha demostrado mejorar la calidad de la energía desde que se puso en marcha en 2007.

Existen también varios proyectos privados de investigación de microrredes. Por ejemplo, la microrred de Shimizu está siendo desarrollada por Shimizu Corporation con la cooperación de la Universidad de Tokio. Esta microrred persigue el objetivo de desarrollar un sistema óptimo de funcionamiento y control. Tokio Gas por otro lado, de nuevo en asociación con la Universidad de Tokio, está intentando desarrollar un control integrado del sistema de generación distribuida a través de simulaciones y experimentos en sus instalaciones de Yokohama. Cruzando los límites, la corporación de Mitsubishi ha instalado una pequeña red en Hsinchiang, China la cual puede ser abastecida por la red de distribución eléctrica, por sistemas fotovoltaicos, por la energía almacenada en las baterías y por el funcionamiento de un grupo electrógeno. [9].

#### 1.1.4 China

Las reservas de recursos energéticos en China se concentran principalmente en las regiones centrales y occidentales, encontrándose desequilibradas con las zonas de demanda de energía. Por lo tanto, haría falta implementar un sistema de transmisión de electricidad interregional a gran escala para satisfacer tal demanda de energía, con las pérdidas en el transporte que ello supone. Sin embargo, en las microrredes gracias a su distribución directa al usuario, las pérdidas en la transmisión son casi nulas. Por lo tanto, se puede afirmar que, en comparación con la red eléctrica principal, la microrred ahorra pérdidas en la transmisión. Es por ello que China ha puesto en marcha cientos de proyectos de microrredes. La tabla que se muestra a continuación muestra algunas microrredes comunitarias típicas en China.

No.	Microgrid type	Capacity and corresponding storage capacity	Network voltage	Location	Application scenario
1	On-grid	PV 6.08-MW peak; lithium titanate battery 500 MWh	10 kV	Nanjing, Jiangsu Province	Commercial park
2	On-grid	PV 20-kW peak; wind power 15 kW; lithium iron phosphate battery 60 kWh; super capacitor 30 kW	380V	Shenyang, Liaoning Province	Resident community
3	Isolated	PV 2.06-MW peak; lithium iron phosphate battery 1 MWh; lead-acid battery 6 MWh	35kV	Gonghe, Qinghai Province	Town
4	Isolated	PV 3.35-MW peak; lead-acid battery 44.3 MWh	380 V/ 220 V	Yushu, Qinghai Province	Resident community/school
5	Isolated	PV 3.087-MW peak; lithium iron phosphate battery 1.2 MWh; lead-acid battery 4 MWh	10 kV	Qilian, Qinghai Province	Town

Ilustración 7 Algunos microrredes en China. *Fuente: Microgrid in China: A review in the perspective of application.*[5]

Como se puede observar la capacidad de los proyectos va de varios kilovatios a miles de kilovatios. Los escenarios típicos de aplicación en China cubren áreas como comunidad residencial, comercial, edificios, parques comerciales e industriales y universidades. Todos estos proyectos contienen generaciones de energía con unidades fotovoltaicas y eólicas, promoviendo así el consumo de energía renovable. [5],[9].

### 1.1.5 Corea

El primer proyecto piloto de Corea fue desarrollado por el Korean Energy Research Institute (KERI). El sistema de pruebas es muy completo ya que incluye varios tipos de sistemas de generación distribuida tales como el simulador de generación fotovoltaica, pilas de combustible, generadores diésel y simulador de turbinas eólicas con cargas de distinta capacidad. La red está equipada con dispositivos de almacenamiento y dispositivos de control de calidad de la energía. Un sistema de gestión de la energía que incluso tiene en cuenta las condiciones meteorológicas y que se comunica con todos los componentes a través de la puerta de enlace. Al estar equipado con una variada mezcla de componentes la microrred del KERI está destinada a probar y estudiar multitud de aspectos relacionados con las microrredes. Todo el proyecto se ejecutó en dos fases. En la primera fase la microrred se mantuvo como una microrred de clase 100 KW y en la segunda fase se amplió con la finalidad de realizar más estudios.

### KERI

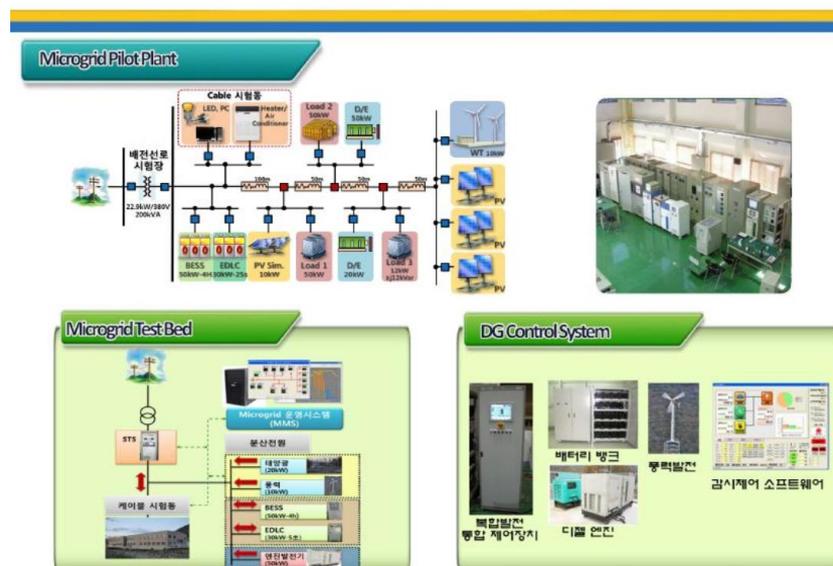


Ilustración 8 Imágenes de la microrred del KERI, Corea. *Fuente: Presentación de Dr. Kim, publicado en Word Press.* [7].

Los estudios realizados por KERI sirvieron de base para futuros proyectos, como el famoso proyecto de la isla de Gasa. La isla de Gasa es una pequeña isla frente a Jindo en la provincia de Jeolla del Sur, en Corea. La isla alberga la primera microrred independiente del mundo que utiliza un sistema de la gestión de la energía (EMS)

construido en Corea. Según una entrevista realizada a Chae Wookyu por The Asia Pacific Journal [7], investigador principal del Instituto de Investigación de KEPCO (Korea Electric Power Corporation) y diseñador del sistema de microrredes de la Isla Gasa, KEPCO se encargó de la compra de todos los dispositivos necesarios, incluyendo aerogeneradores, módulos fotovoltaicos, baterías, sistemas informáticos y otros componentes. También afirma que el EMS fue desarrollado en la propia isla. Esta microrred permite que cualquier exceso de electricidad se almacene en baterías (hasta 24 horas) y se libere para su uso durante periodos de corto suministro de energía. En cuanto a la financiación del proyecto, KEPCO y MOTIE (Ministry Of Trade , Industry and Energy) compartieron los costes del proyecto de desarrollo del sistema y los ensayos realizados en la microrred de la isla de Gasa. Se calcula que KEPCO invirtió un total de 8 millones de dólares. Las fuentes de suministro de la red son las cuatro turbinas eólicas (400 KW), paneles solares (320 KW), tres unidades de energía diésel (450 KW) y un sistema de almacenamiento de energía (batería ión-litio) con una capacidad de 4,17 MW en total. El proyecto lleva en funcionamiento desde octubre de 2015.



Ilustración 9 A la izquierda aerogeneradores y placas solares de la microrred de la isla de Gasa. A la derecha el sistema de control de la microrred de la isla de Gasa.[7]

El proyecto de la isla de Gasa es un prototipo para los otros 86 proyectos insulares planificados por KEPCO. La empresa tiene previsto desplegar la microrred en una isla más grande, la isla de Ulleong, aumentando así la presencia de energías renovables en la isla. [7],[9].

### 1.1.6 Australia

Actualmente existen varios proyectos piloto de microrredes en Australia en fase de desarrollo, gracias al gran potencial de este tipo de aplicaciones para este continente. Esto es debido a que Australia es un país muy vasto con muchas comunidades aisladas.

El gobierno ha comenzado a invertir en algunos proyectos. Un ejemplo de ello, es la reciente subvención del Labor Government's Microgrid Demonstration Initiative de 980 mil dólares al proyecto de microrred que está siendo llevado a cabo por Australian Energy Foundation en colaboración con Ovida, Allume Energy, Jemena y RMIT University. El proyecto de 2 millones de dólares instalará sistemas solares fotovoltaicos y de baterías compartidos en tres edificios de Melbourne, Australia para ayudar a reducir los costos de la energía a sus inquilinos. La iniciativa generará 5000 KWh de energía solar y dará un almacenamiento de energía de 11 KWh. El proyecto tiene planificado su desarrollo para el año 2019. [1].

Otro proyecto muy interesante es el que está siendo ejecutado por Schneider Electric en asociación con la empresa de ingeniería australiana de energías renovables Planet Ark Power, la cual ha recibido una subvención de 1,95 millones de dólares del gobierno estatal para apoyar el suministro de energía segura, sostenible y asequible en la Australia meridional. Esta subvención ayudará a construir un proyecto piloto basado en la energía solar y en el almacenamiento por baterías de 13,9 millones de dólares en un importante centro de distribución en el norte de Adelaide. Este proyecto (el primero de este tipo en Australia) combina la tecnología de la energía solar y de las baterías optimizada por un sistema de gestión de microrredes dirigido por Schneider Electric, el cual está integrado con un sistema de Distribución Avanzada para devolver a la red una energía más segura y fiable. El proyecto incluirá una microrred conectada a la red con 2,9 MWh de almacenamiento de baterías

inteligentes, sistemas de gestión de la demanda y hasta 6 MW de energía solar en los tejados. Un elemento central de este proyecto será la integración de la plataforma EcoStruxure™ de Schneider Electric, líder en el mercado. El Sistema de Gestión de Distribución Avanzada y EcoStruxure™ Microgrid Advisor tienen como función optimizar la energía solar fotovoltaica y el almacenamiento de las baterías. La integración de la generación y el almacenamiento solar con este sistema de control de la microrred mejorará la resistencia de la red y la seguridad energética del emplazamiento. Las obras comenzaron en el año 2018. [2].

## 1.2. España y las microrredes

España lleva años invirtiendo en el desarrollo y la investigación de las microrredes. A continuación, se analizan las razones de este crecimiento y los beneficios que proporcionan las microrredes a la economía española:

- Aumento de la productividad y crecimiento del PIB debido al:
  - Aumento de la eficiencia energética del sistema debido a que se reducen las pérdidas relacionadas con el transporte de la electricidad.
  - Desarrollo de los sectores energético y tecnológico españoles. Además, les permite a estos sectores desempeñar un papel más activo en el proceso de reconfiguración la industria energética a nivel europeo y mundial.
  - Ajuste de la balanza comercial mediante la reducción de las importaciones de energía fósil primaria.
  - Aumento de la productividad del país derivado de la mejora de la calidad del suministro de la energía (reducción de las interrupciones del suministro de energía).
- El desarrollo de las redes inteligentes genera empleos directos e indirectos en actividades de alto valor añadido como son la fabricación de componentes eléctricos y de equipos de comunicaciones, y la instalación in situ y mantenimiento relacionado con las instalaciones eléctricas y de comunicaciones de las microrredes. También esta creación de empleos promueve el desarrollo de empresas especializadas en los negocios de gestión de la energía.
- Reducción de la dependencia energética a las fuentes de energía primaria y aumento de la integración de energías renovables y vehículos eléctricos. Esto conllevará a la disminución de las emisiones contaminantes de dióxido de carbono.

España es un país con gran tradición en investigación en redes eléctricas. Dicha investigación aparece en todos los eslabones de la cadena productiva eléctrica: universidades, centros tecnológicos, fabricantes de equipo y las propias compañías eléctricas.

La industria eléctrica española está a la vanguardia internacional en los desarrollos tecnológicos que se enmarcan en las microrredes. Este hecho se debe al dinamismo del sector empresarial, los centros tecnológicos y universidades que permiten avanzar en desarrollos básicos y aplicados, y a la propia administración pública con su apoyo al sector energético en el área de I+D.

Es por ello que el objetivo de este trabajo es realizar un estado del arte de las microrredes a nivel nacional, haciendo hincapié en sus diseños, dimensiones y características. [12],[65].



# 2 DESCRIPCIÓN DE UNA MICRORRED

A continuación, se hará una revisión del concepto de microrred, describiendo los elementos principales de las mismas.

## 2.1. Concepto de microrred

El actual sistema de energía ha sido diseñado inicialmente para dar cabida a un flujo unidireccional de energía e información, desde el gran sistema de generación centralizada, pasando por los sistemas de transmisión y distribución, hasta los centros de consumo. El sistema eléctrico tradicional se ha basado en la gestionabilidad que permite la energía almacenada por la propia naturaleza durante años en los combustibles fósiles. Esta forma tradicional de funcionamiento ha alcanzado un nivel muy alto de fiabilidad y calidad de servicio, por lo que ha persistido durante los años.

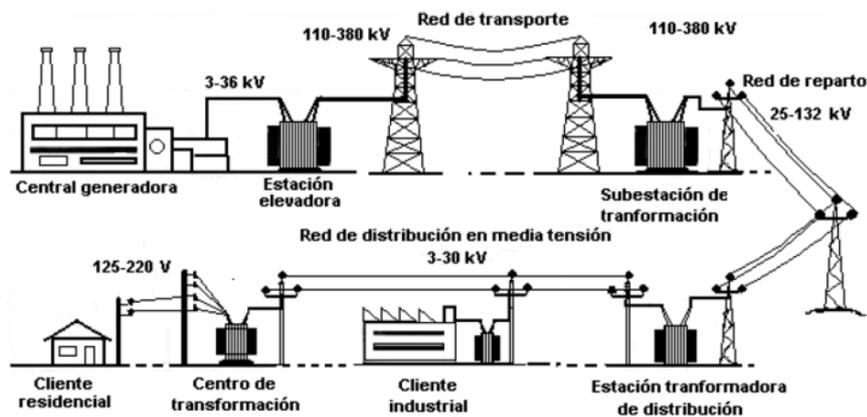


Ilustración 10 Modelo tradicional de generación, distribución y consumo de energía

Sin embargo, tal y como se ha mencionado anteriormente, para garantizar la seguridad del suministro a partir de una producción sostenible (con el mínimo impacto ambiental) y a un precio asequible para todos los consumidores ha sido necesaria la transición a un nuevo modelo energético. Este nuevo modelo energético debe superar ciertas barreras tecnológicas debidas a la aleatoriedad propia de las fuentes de energía renovable. La penetración actual de estos sistemas en la red eléctrica, especialmente con los desarrollos obtenidos para la energía eólica y fotovoltaica, comienza a ocasionar impactos en la red eléctrica, como pueden ser la variación de la magnitud del voltaje de suministro y el incremento del desbalance entre la potencia activa y reactiva entre las fuentes de generación. La falta de gestionabilidad, así como la penalización por desvíos en el mercado de casación, dificulta la competitividad económica de las energías renovables en el mercado energético. Los sistemas de almacenamiento de energía aparecen como solución tecnológica a la controlabilidad de las energías renovables, permitiendo su introducción en el mercado diario de energía. La concepción de la red eléctrica en

unidades más pequeñas de gestión donde el almacenamiento de energía compense tanto las fluctuaciones de generación renovable como la aleatoriedad del comportamiento de los consumidores aparece como una nueva solución estructural. No obstante, esto conlleva a nuevos desafíos desde el punto de vista del control. Para intentar abordar estos problemas, surge el concepto de la microrred.

Una microrred eléctrica es un sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, utilizando tecnología digital y favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, con el objetivo de ahorrar energía, reducir costes e incrementar la fiabilidad. La microrred es un concepto muy versátil que puede adoptar varios tipos de micro generadores (generación eólica, generación fotovoltaica (PV), generador diesel y convertidor de energía de las olas (WEC)), elementos de almacenamiento local (bancos de condensadores, volante de inercia, baterías) y cargas. También disponen de un sistema de control para la gestión de cargas; sistemas de monitorización y control del flujo de potencia; y técnicas y procedimientos de mantenimiento preventivo. [9]

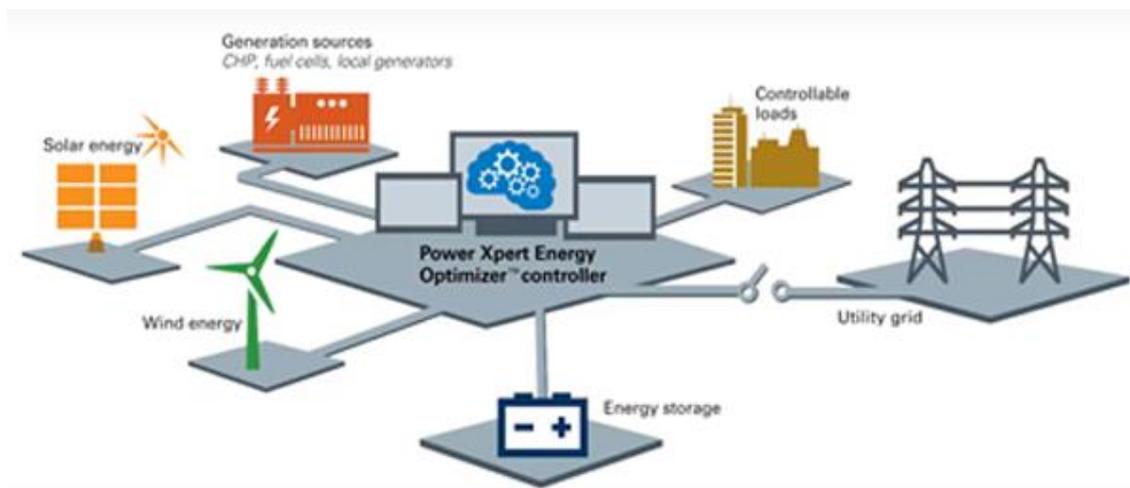


Ilustración 11 Esquema de una microrred

Con anterioridad se ha destacado repetidamente la ventaja de la microrred de mantener la calidad del suministro. Esto es debido a su característica innovadora de tener la capacidad de funcionar "autónomamente" cuando se produce un corte de energía en la red principal. Este modo de funcionamiento se denomina funcionamiento en isla, ya que la microrred se desconecta de la red y se convierte en una isla con generadores y cargas locales. De esta manera, los consumidores pueden recibir un servicio continuo incluso cuando hay un corte de energía en la red debido a una falla (situación anómala que provoca que los sistemas de protección actúen interrumpiendo el fluido eléctrico a los usuarios) o por razones de mantenimiento. Además, si hay caídas de tensión, caídas de frecuencia o fallos en la red principal, la microrred puede ser fácilmente desconectada, es decir, aislada del resto de la red, aislando también a sus usuarios de estos problemas. De esta manera, las microrredes no sólo ayudan a proporcionar un servicio ininterrumpido, sino que también contribuyen al mantenimiento de la calidad del servicio. Se puede concluir, por lo tanto, que una microrred puede operar interconectada con la red de distribución principal, a través del denominado Point of Common Coupling (PCC), o en modo isla. También existe la posibilidad de interconectarse con otras microrredes, dando lugar a sistemas más complejos. [9],[10],[14].

## 2.2. Componentes

Los componentes de las microrredes están incluidos en tres grandes grupos: generación, almacenamiento y cargas (consumo de energía). Se representa en la siguiente imagen un esquema general de una microrred con sus componentes:

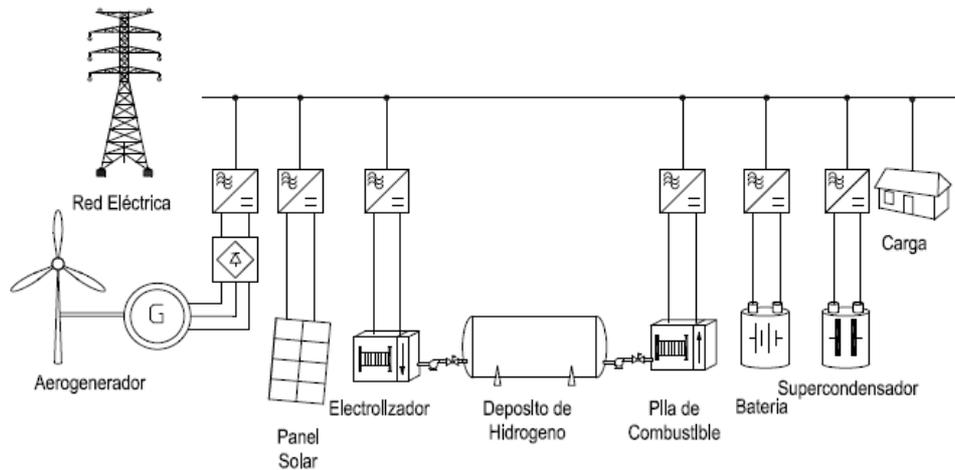


Ilustración 12 Esquema de los componentes típicos de una microrred [14]

## 2.2.1. Equipos de generación de energía

### ➤ Paneles solares

Una célula fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz solar en energía eléctrica. Esto se basa en el efecto fotovoltaico por el cual determinados materiales semiconductores (silicio o germanio, siendo el silicio el más empleado) liberan electrones al ser alcanzados por una radiación electromagnética, como la solar, generándose una diferencia de potencial entre la capa exterior (iluminada) y la interior.

Una celda fotovoltaica se fabrica, por lo general, con dos capas de silicio:

- Dopado P (dopado de boro)
- Dopado N (dopado de fósforo)

Ambas capas conforman así la conocida unión P-N.

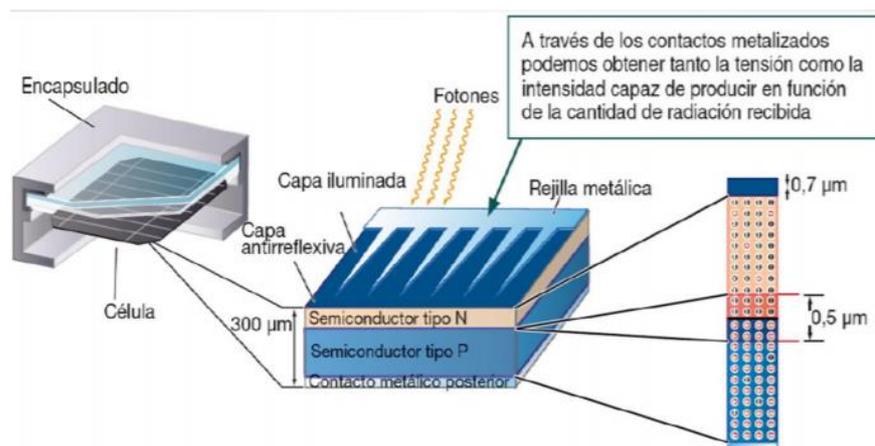


Ilustración 13 Composición de una célula fotovoltaica [16]

Existen distintos tipos de célula fotovoltaica:

- Célula de silicio monocristalino: único cristal de silicio con estructura muy uniforme. Los átomos perfectamente alineados facilitan la conductividad. Sin embargo, requieren de un proceso de fabricación con elevado gasto energético y coste. Actualmente, las mejoras en procesos productivos los han reducido. Se caracterizan por tener un color azul oscuro y de forma ortogonal.

Entre sus ventajas destaca:

- Un alto rendimiento, entre el 12% y el 25%. El record alcanzado en laboratorio es de 26,7 %.
- Mayor vida útil (mayor o igual a 25 años) y poca degradación a largo plazo.
- Funcionan mejor con baja radiación solar.

A parte del inconveniente de su alto coste, poseen un peor coeficiente térmico lo que implica que los incrementos de temperatura empeoran su rendimiento.

- Célula de silicio policristalino: poseen muchos cristales de silicio. El proceso de fabricación es más económico, pero muestran peor rendimiento que las anteriores. Poseen una superficie irregular y células totalmente cuadradas.

Entre sus ventajas destaca:

- Proceso de fabricación más sencillo y económico en comparación con el proceso de fabricación del silicio monocristalino.
- Mejor coeficiente térmico, es decir, mejor comportamiento frente incrementos de temperatura.

En cuanto a las desventajas (en comparación con el anterior):

- Poseen un rendimiento menor, 16-20 %. El record alcanzado en laboratorio es de 22,3%.
- Requieren de más superficie para dar misma potencia, debido a su menor rendimiento.

- Capa delgada (thin film): se obtiene al depositar varias capas de material fotovoltaico sobre una base (cristal o similar). Pueden ser de silicio amorfo (a-Si), telurio de cadmio (CdTe), cobre, indio, galio y selenio (GIS/CIGS) y células fotovoltaicas orgánicas.

Entre sus ventajas destaca:

- Proceso de fabricación más sencillo y económico que en el caso del monocristalino.
- Mejor coeficiente térmico (mejor comportamiento frente incrementos de temperatura).

Entre sus desventajas destaca:

- Rendimiento menor que el monocristalino. El record alcanzado en laboratorio para CIGS es de 23,4% y para CdTe es de 21%.
- Al igual que el policristalino, al poseer menor rendimiento requieren de más superficie para dar la misma potencia.

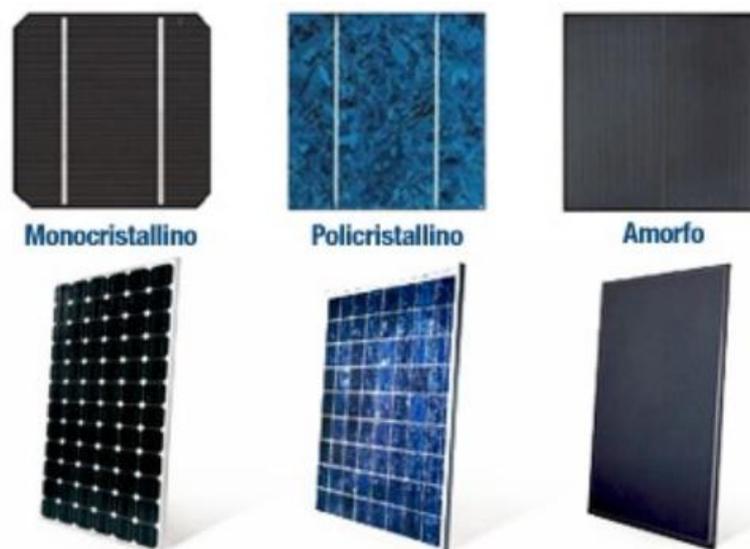


Ilustración 14 Tipos de soluciones de paneles solares fotovoltaicos [16]

Los paneles solares de capa delgada (thin film) se encuentran en fase de comercialización, aunque aún no se encuentran completamente optimizados. El siguiente gráfico muestra como los monocristalinos y policristalinos son las tecnologías que gobiernan el mercado actual: [16]

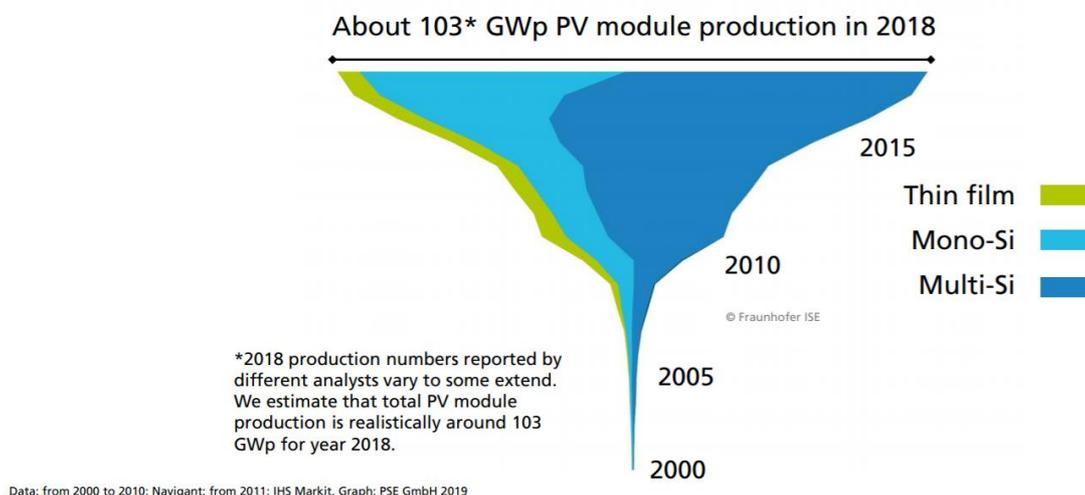


Ilustración 15 Producción mundial anual de fotovoltaica por tecnología (en Gwp). Fuente: Datos desde 2000 hasta 2010: Navigant; desde 2011 hasta actualidad: IHS Markit. Gráfico: PSE GmbH 2019. [15]

El total de instalaciones fotovoltaicas mundial (acumulativo) ascendió a 584 GWp a finales del año 2019. La distribución de estas instalaciones por regiones del mundo, lo muestra el siguiente gráfico: [15]

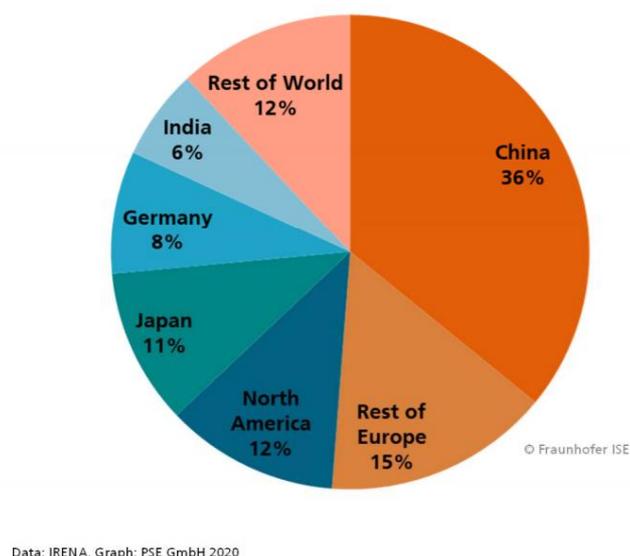


Ilustración 16 Porcentaje de instalaciones solares fotovoltaicas (acumulada) por regiones en el mundo. Fuente: Datos: IRENA (International Renewable Energy Agency). Gráfico: PSE GmbH 2019. [15]

Con respecto a España, la energía solar fotovoltaica se ha visto algunas veces frenada por el marco normativo. El pico de crecimiento se produjo en el año 2004, gracias al cambio legislativo para favorecer la energía fotovoltaica ante la falta de implantación de energías renovables en España. La crisis económica supuso un freno al principio que fue superado con relativa facilidad, sin estancar demasiado su crecimiento. Sin embargo, a partir del año 2013, este crecimiento sufrió varios golpes legislativos. En 2013 se impuso un impuesto del 7% sobre la generación, impuesto que grava la producción de electricidad, que fue suspendido en octubre de 2018 y luego reintroducido nuevamente en marzo de 2019. Además en 2015 se introdujo el popularmente conocido “impuesto al sol” que fue eliminado en octubre de 2018 como parte de un plan de medidas urgentes para abaratar la factura eléctrica. A pesar de estos frenos legales, la fotovoltaica continuó progresando, gracias al

abaratamiento de las placas solares y al progreso tecnológico de eficiencia de las mismas. [19]

Como conclusión, la capacidad instalada de tecnología fotovoltaica en España no ha retrocedido desde su aparición, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

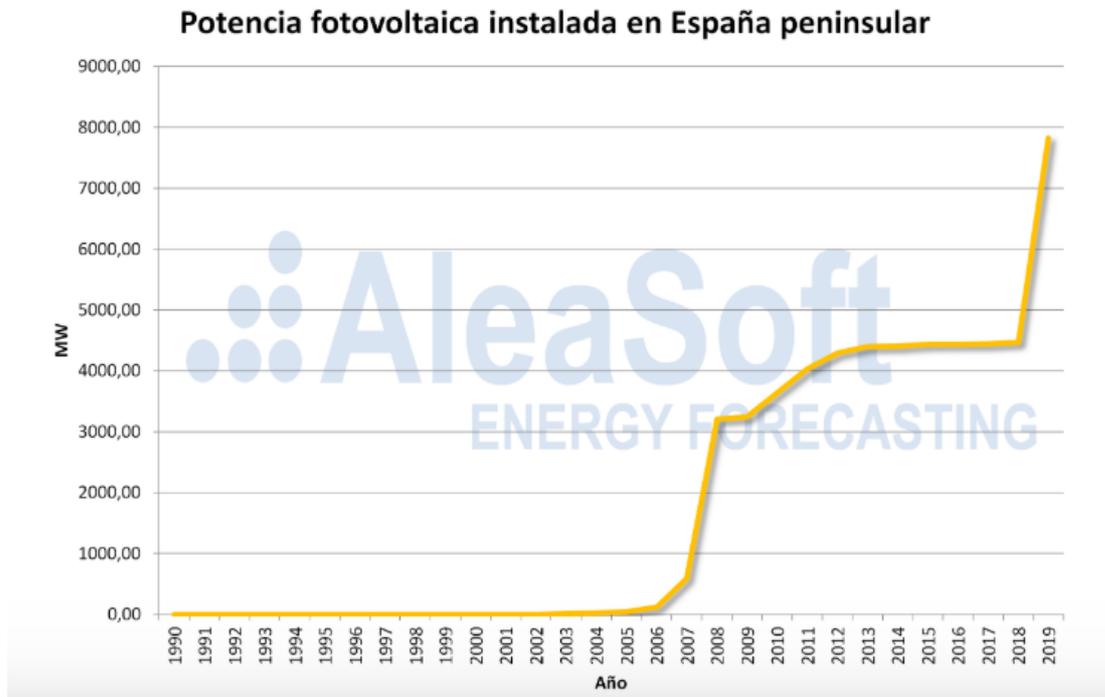


Ilustración 17 Potencia fotovoltaica instalada en España peninsular en MW. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting [19]

### ➤ Energía eólica

En la actualidad, la energía eólica se utiliza para producir energía eléctrica a través de aerogeneradores. Para que la generación eólica sea rentable la velocidad de viento debe ser capaz de hacer generar al menos un 25-30% de la capacidad máxima de un aerogenerador eficiente en un año. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que se obtengan velocidades mínimas de 3 m/s (cut in speed) y que no superen los 25 m/s (cut out speed). La energía eólica tiene una ventaja sobre la energía fotovoltaica ya que requiere menos espacio y puede generar también durante la noche. Además, se puede articular como un complemento para los pequeños consumidores (mini-eólica).

Los aerogeneradores se clasifican en aerogeneradores de eje vertical (VAWT) y de eje horizontal (HAWT).

A su vez los aerogeneradores VAWT (vertical axis wind turbines), que representan el 1% del total, se subdividen en:

- Aerogeneradores del tipo Savonius.
- Aerogeneradores del tipo Darrieus.
- Aerogeneradores híbridos Darrieus-Savonius.

Los aerogeneradores HAWT (horizontal axis wind turbines), que representan el 99% del total, se subdividen en:

- Aerogeneradores a barlovento (upwind).
- Aerogeneradores a sotavento (downwind).

Los aerogeneradores a barlovento tienen una mayor eficiencia que los aerogeneradores a sotavento, ya que no presentan interferencias aerodinámicas con la torre. En cambio, tienen el inconveniente de no alinearse autónomamente con relación al viento, por lo que necesitan una aleta direccional o un sistema de orientación. Los aerogeneradores a sotavento acusan los efectos negativos de la interacción torre-rotor, pero se alinean autónomamente y pueden utilizar un rotor flexible para resistir los vientos fuertes. [16]

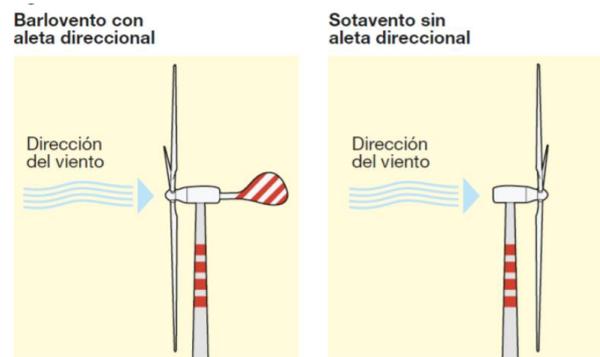


Ilustración 18 Diferencias entre barlovento y sotavento. [16]

De entre los aerogeneradores de eje horizontal, un 99% son de tres palas, mientras que un 1% son de dos palas.

A continuación, se muestra una imagen que incluye los tipos de aerogeneradores: [16]

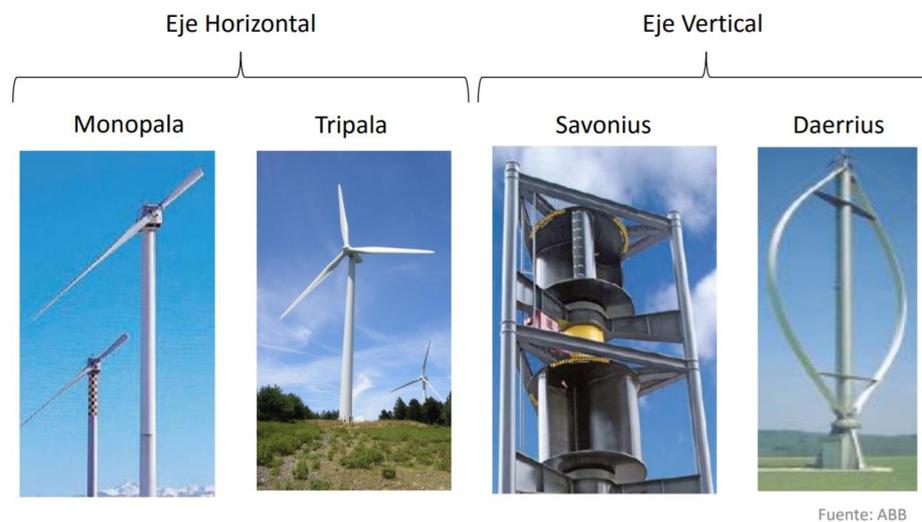


Ilustración 19 Tipos de aerogeneradores [16]

La energía eólica instalada en el mundo creció un 9,6% en 2018, hasta situarse en 591.000 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales. [18]

#### EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN EL MUNDO (EN MW). AÑO 2018

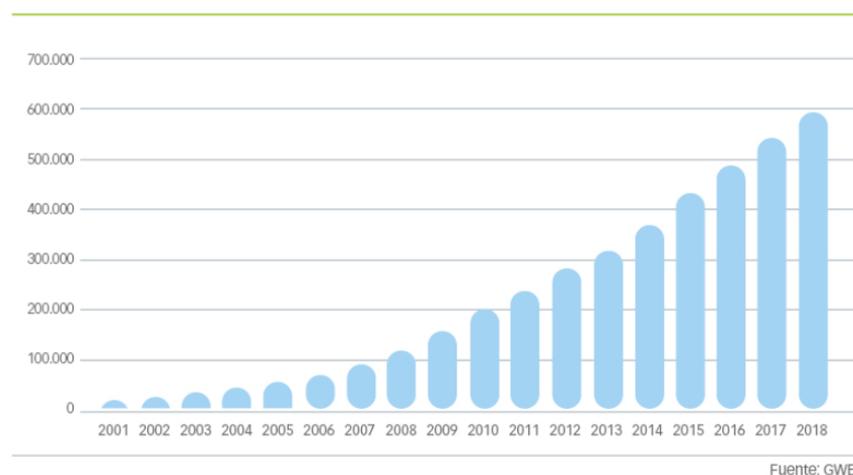


Ilustración 20 Evolución de la potencia instalada en el mundo de energía eólica en MW. Fuente: GWEC (Global Wind Energy Council). [18]

**RÁNKING DE PAÍSES POR POTENCIA INSTALADA ACUMULADA (EN MW)**

	2018
China	211.392
Estados Unidos	96.665
Alemania	59.311
India	35.039
España	23.484
Reino Unido	20.970
Francia	15.309
Canadá	12.805
Brasil	14.702
Italia	9.958
Resto del mundo	90.788

Fuente: GWEC

Ilustración 21 Ranking de países por potencia instalada de energía eólica (acumulada) en MW. Fuente: GWEC (Global Wind Energy Council). [18]

En 2019 España contaba con 25.704 MW de potencia acumulada. La energía eólica ha sido la segunda fuente de generación eléctrica peninsular en España en 2019. España es el quinto país del mundo por potencia eólica instalada, tras China, Estados Unidos, Alemania e India. La eólica en España cubre el 20,8% de la energía consumida, lo que evitó la emisión de 28 millones de toneladas de dióxido de carbono. [18]

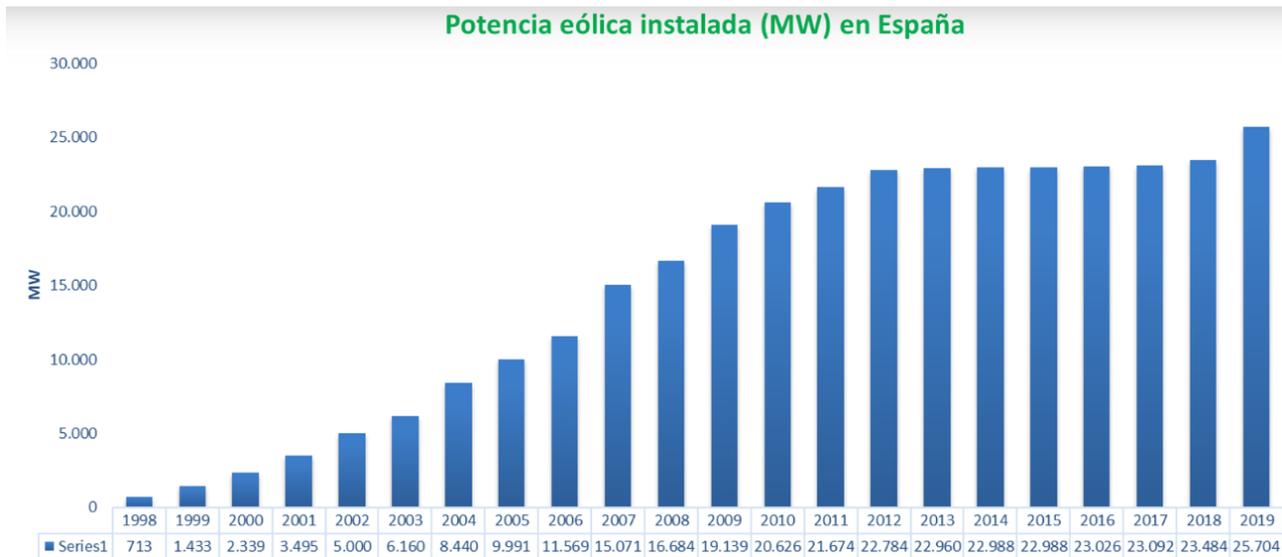


Ilustración 22 Potencia eólica instalada en España. Fuente: AEE (Asociación Empresarial Eólica). [18]

➤ **Solar térmica**

La energía solar térmica es una tecnología que aprovecha la energía solar para producir energía térmica (calor). Para lograr esto, los reflectores cilindro-parabólicos están fabricados con materiales reflectantes que enfocan la luz solar en un vaso central que contiene el fluido de trabajo para producir temperaturas superiores a 1000 °C, mientras que los concentradores parabólicos de enfoque lineal enfocan la energía solar a lo largo de un solo eje para generar temperaturas de alrededor de 350 °C. Además de plantas que concentran la radiación solar a lo largo de una línea, también existe otra forma de concentración de los rayos solares: la concentración en un punto. Hasta la fecha existen dos tecnologías que concentran la radiación solar en un punto: tecnología de discos parabólicos Stirling y la tecnología que utiliza un receptor central o de torre con campos de heliostatos. []

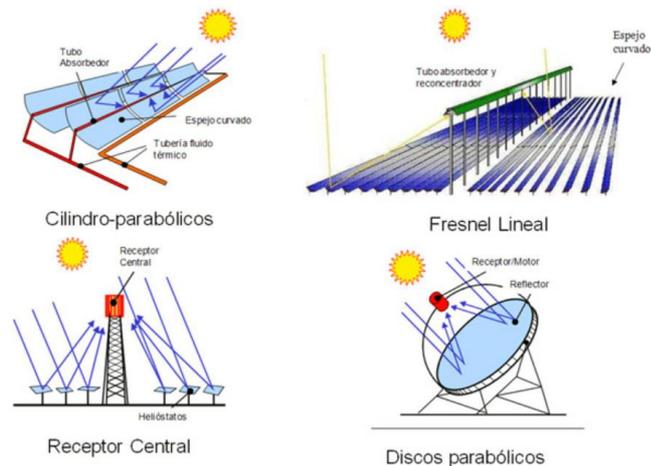


Ilustración 23 Clasificación de la energía solar térmica

Las altas temperaturas resultantes pueden ser utilizadas para crear vapor para impulsar los generadores de turbina eléctrica como se muestra en la siguiente imagen o bien para impulsar procesos químicos como la producción de hidrógeno.

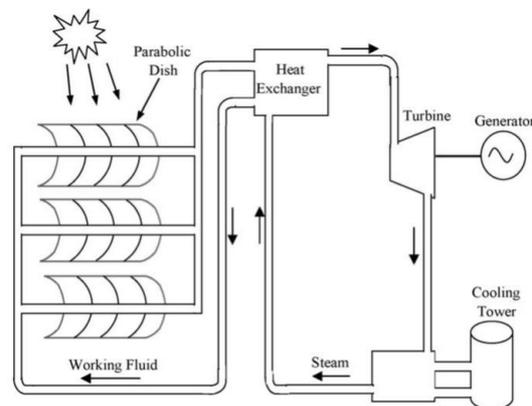


Ilustración 24 Funcionamiento de una planta termo solar [22]

Esta forma de generación eléctrica requiere de instalaciones con una elevada ocupación de terreno por lo que no sería indicada su implantación en núcleos urbanos o microrredes en las cuales haya limitación de espacio para la generación.

A menor escala, la termo solar se puede integrar en edificio o industrias basando en ella la generación de agua caliente sanitaria (ACS). [22]

### ➤ **Biomasa**

En un futuro próximo se estima que la biomasa sea una de las energías más importantes entre las energías renovables. La biomasa es material orgánico procedente de las plantas y los animales. Se considera como una fuente de energía renovable porque siempre existirán árboles y cultivos y en consecuencia, la posibilidad de reciclar sus residuos también estará presente. La energía de la biomasa moderna recicla los residuos orgánicos de la silvicultura y la agricultura, como paja del maíz, cáscaras de arroz, residuos de madera o incluso utiliza "cultivos energéticos" especiales de rápido crecimiento como el sauce y la pasta varilla, como combustible. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía de los EE.UU., el 11% de la energía mundial, ambos calor y energía, se deriva actualmente de la biomasa, donde las naciones más pobres derivan el 90% de su energía de ella. Actualmente representa el 45% de la energía renovable utilizada en los Estados Unidos.

El potencial de la biomasa para ayudar a satisfacer la demanda mundial de energía ha sido ampliamente reconocido. Cuando se quema, la energía química en la biomasa se libera como calor, que se utiliza para producir vapor que puede a su vez utilizarse para accionar una turbina para la producción de electricidad o para proporcionar calor a las industrias y hogares. La combustión de biomasa implica quemar la biomasa en el aire a

una velocidad de flujo de 4-5 kg de aire por kg de biomasa. Este proceso a pequeña escala es siempre utilizado para aplicaciones térmicas, mientras a gran escala necesita una planta con ciclo de vapor para la generación de energía.

Entre las ventajas de esta energía destaca

- Es una fuente de combustible teóricamente inagotable.
- El impacto ambiental es mínimo cuando se usa la fermentación, pirólisis, etc., para generar energía en lugar de la combustión directa de la masa vegetal.
- Los alcoholes y otros combustibles producidos por la biomasa son eficientes, viables, y una combustión relativamente limpia.
- Está disponible en todo el mundo.
- El uso de biocombustibles en nuestros coches contamina menos que cuando se utiliza gasolina.

Desventajas:

- Podría contribuir en gran medida al calentamiento global y a las partículas contaminantes si se queman directamente.
- Sigue siendo una fuente costosa, tanto en términos de producción de la biomasa como para convertirlo en alcoholes.
- La generación de la materia prima necesaria es muy dependiente del clima, el suelo, la densidad de población, y las actividades que se desarrollen sobre el terreno.

Su aprovechamiento puede ser o no posible dependiendo de la ubicación de la microrred ya que la cantidad de producción de materia prima no es estable como se menciona en la última desventaja. [22]

### ➤ Pilas de combustible

Las pilas de combustible convierten la energía química directamente en energía eléctrica y calor. Este proceso podría compararse al de las baterías, ya que ambas utilizan un proceso electroquímico. Las pilas de combustible funcionan como las baterías, pero no se agotan ni necesitan ser recargadas. Producen electricidad y calor siempre que se suministre combustible.

Una pila de combustible consta de dos electrodos -un electrodo negativo (o ánodo) y un electrodo positivo (o cátodo)- que se colocan alrededor de un electrolito. Un combustible, como el hidrógeno, se alimenta al ánodo, y el aire se alimenta al cátodo. En una pila de combustible de hidrógeno, un catalizador en el ánodo separa las moléculas de hidrógeno en protones y electrones, que toman diferentes caminos hacia el cátodo. Los electrones pasan a través de un circuito externo, creando un flujo de electricidad. Los protones migran a través del electrolito al cátodo, donde se unen con el oxígeno y los electrones para producir agua y calor.

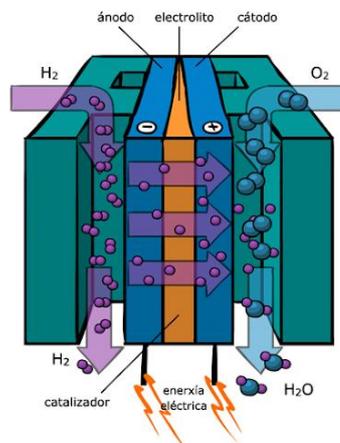


Ilustración 25 Proceso de funcionamiento de una pila de combustible. Fuente: Ecured.

Existen pilas de combustible que pueden llevar a cabo el proceso inverso (pilas de combustible reversibles). Éstas aprovechan la energía excedente en periodos de gran generación de otros sistemas, almacenando dicha energía en forma de hidrógeno para su posterior uso en periodos de mayor demanda.

Las pilas de combustible pueden funcionar con mayor eficiencia que los motores de combustión, convirtiendo la energía química del combustible en energía eléctrica con eficiencias de hasta el 60%. Además, las pilas de combustible tienen menos emisiones que los motores de combustión. Las células de combustible de hidrógeno sólo emiten agua, por lo que no hay emisiones de dióxido de carbono ni de contaminantes atmosféricos, evitando así los problemas de salud relacionados en el punto de operación. También es interesante destacar que las células de combustible son silenciosas durante su funcionamiento, al tener menos piezas móviles que los motores.

Las pilas de combustible se clasifican generalmente por el material del electrolito usado. En la actualidad, existen cinco tipos principales de pilas de combustible que son: la pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), pila de combustible alcalina (AFC), pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC), pila de combustible de óxido sólido (SOFC), y pila de combustible de carbonato fundido (MCFC). La AFC no es adecuada para la aplicación de microrredes, ya que tienen una tolerancia casi nula al CO<sub>2</sub> y constituyentes de CO presentes en el combustible.

Para obtener corriente alterna de la pila de combustible se requiere un equipo de acondicionamiento de energía para invertir la corriente continua generada por la pila de combustible a la corriente alterna que se requiere para ceder energía a la red de distribución.

En las microrredes, las pilas de combustible se suelen presentar en sistemas de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno que se explicará más adelante en el apartado elementos de almacenamiento de la microrred. [22],[10],[20].

### ➤ **Grupos electrógenos**

Los grupos electrógenos son máquinas formadas por motores de combustión interna acoplados a un alternador eléctrico con el fin de producir energía eléctrica. Los combustibles más usados son el diésel y el gasóleo.

La gran ventaja de estos generadores es su madurez. Se tienen amplios conocimientos acerca de su funcionamiento y es una tecnología con un amplio rango de usos y adaptable en función de los requisitos de potencia. Ofrecen además la posibilidad de generación tanto en AC como en DC. Poseen un rango de potencia que va de 1kW hasta los 10MW. Asimismo, su coste de inversión y tiempo de instalación son bajos y alcanzan una eficiencia eléctrica entorno al 39% (que puede alcanzar valores cercanos al 80% si se aprovecha en calor generado en un sistema de co-generación). También cabe destacar que tienen una elevada vida útil y presentan una gran disponibilidad de suministro.

Para las aplicaciones de generación distribuida, los motores alternativos tienen un coste bajo y una buena eficiencia, pero sufren las desventajas de la alta emisión y el alto coste de mantenimiento. Las mezclas inadecuadas de aire y combustible, así como el excesivo enfriamiento de los cilindros produce monóxido de carbono (CO), mientras que el proceso de combustión genera NO<sub>x</sub>. Este hecho ha provocado que la instalación de generadores diésel sea extremadamente difícil con el endurecimiento de la regulación de las emisiones. A pesar de ello, existen motores que funcionan con gas natural. Estos motores ofrecen la combinación de la eficiencia y la fiabilidad de un motor diésel con un mínimo de emisiones de NO<sub>x</sub> que su diésel equivalente. Incluso se han desarrollado motores que funcionan con biocombustibles, reduciendo estas emisiones.[22],[10].

### ➤ **Micro-turbinas de gas**

Una turbina de gas, también conocida como turbina de combustión, es un motor rotativo que extrae energía de un flujo de gas de combustión. Están unidas a una cámara de combustión que se encuentran entre el compresor (aguas arriba) y la turbina (aguas abajo). Las turbinas de gas son generalmente divididas en tres categorías principales: las grandes turbinas de gas, las aeroderivadas y las micro-turbinas.

Las micro-turbinas (MT) que son comercialmente viables están disponibles en el rango de 27-250/300 kW. Las micro-turbinas se están generalizando para la energía distribuida y son una de las más tecnologías prometedoras para la alimentación de vehículos eléctricos híbridos. Parte de su éxito se debe a los avances en el poder de la

electrónica, que permite el funcionamiento autónomo y la interconexión con la red eléctrica comercial. Los rendimientos típicos de las micro-turbinas están entre el 33% y el 37%, si se aprovecha esta tecnología en ciclos de cogeneración.

Gracias a su pequeño y compacto tamaño y a su reducido impacto acústico pueden instalarse en ubicaciones urbanas o con limitación de espacio. Además, el reducido número de partes móviles simplifican y abaratan su mantenimiento. Su baja tasas de emisiones las hace una alternativa interesante a los grupos electrógenos para pequeñas instalaciones, aunque el tiempo de respuesta ante cambios en la potencia de salida es mayor, lo que puede limitar su instalación para aplicaciones que requieren una respuesta ágil ante faltas de suministro. Pueden funcionar con diversos tipos de combustible como el gas natural, diésel, etanol y otros derivados de la biomasa.[22],[10].

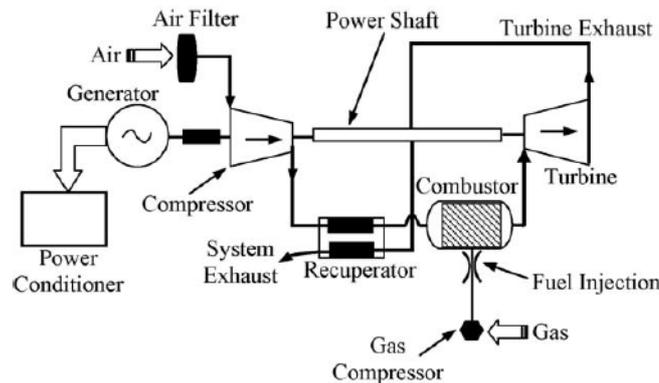


Ilustración 26 Diagrama básico de una micro-turbina[22]

### ➤ Hidroeléctrica a pequeña escala

Los términos "pequeñas hidroeléctricas" definen las instalaciones para la producción de hidroelectricidad a bajos niveles de potencia. Normalmente, la potencia de tales instalaciones puede estar en el rango de 5-100 kW para centrales "microhidroeléctricas", y entre 500 kW y 10MW para minicentrales hidroeléctricas. El salto de tales plantas puede estar en el rango de 1,5-400 m con flujos que van desde varios cientos de litros por segundo hasta varias decenas de metros cúbicos por segundo. En una pequeña central hidroeléctrica, las soluciones técnicas electromecánicas que se adopten deben ser sólidas y lo más simples posibles para reducir los costes y disminuir el mantenimiento, asegurando la rentabilidad de las inversiones. Es por ello que los diversos fabricantes de turbinas han desarrollado unidades estandarizadas para pequeños sistemas hidroeléctricos. Sus diseños se basan en el suministro de un equipo electromecánico compacto listo para instalar y para rápida puesta en marcha; y en el diseño hidráulico simple, utilizando componentes estándar para reducir los costes y los plazos de entrega. Este tipo de estandarización en la fabricación y puesta a punto ya es aplicable a potencias entre 100 y 2000 kW.

En general este tipo de plantas presentan un alto rendimiento, bajo coste de mantenimiento, larga vida útil y pueden dar una rápida respuesta a cualquier hora del día.

Al igual que con la biomasa, la inclusión de la hidroeléctrica en proyectos de microrredes depende en gran medida de la ubicación de esta, de las características del terreno y del recurso hídrico, factores que, además, pueden limitar su expansión en caso de aumentos de la demanda.

El último informe que se tiene al respecto en España, afirma que las minicentrales hidroeléctricas presentaban una potencia acumulada total de 1.749 MW a finales de 2004. La distribución de la mayor parte de ella se encuentra en las siguientes comunidades autónomas: Castilla y León con el mayor número (263 MW), seguida de Cataluña (232 MW), Galicia (215 MW), Andalucía (198 MW) y Aragón (194 MW). En el mapa que se muestra a continuación se puede observar los MW de potencia instalada por comunidades autónomas: [22],[10],[23].

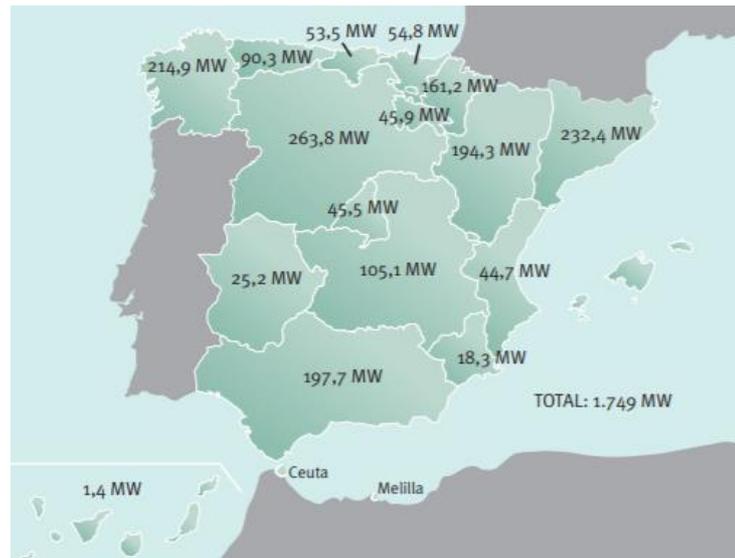


Ilustración 27 Distribución de la minicentrales hidroeléctricas en España. Fuente: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). [23]

## 2.2.2. Equipos de almacenamiento de energía

En la operación de las microrredes es vital el almacenamiento de energía, ya que permite compensar los desbalances entre la generación y el consumo, manteniendo una buena calidad de suministro. Sin embargo, no existe la tecnología de almacenamiento perfecta y todas tienen sus limitaciones en cuanto a densidad de potencia/energía, tiempo de respuesta/tiempo de autonomía, coste económico y ciclo de vida.

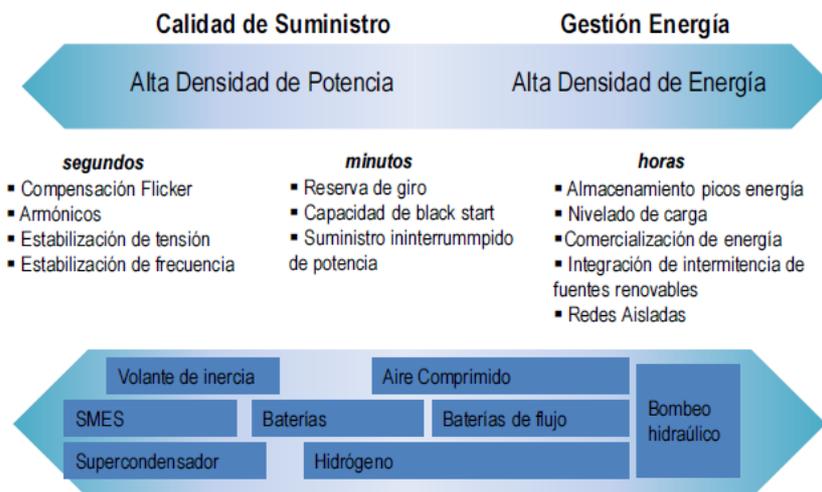


Ilustración 28 Sistemas de almacenamiento de energía según relación de densidad de potencia/densidad de energía. Fuente: Dötsch, C., 2009. *Energy storage. en Technology Guide. Springer, pp. 362–367.* [14]

Los sistemas de almacenamiento híbrido permiten abarcar una gran variedad de aplicaciones. El almacenamiento ofrece la oportunidad de decidir la operación óptima de la microrred en sus dos modos de funcionamiento (modo isla o modo de conexión a red). La posibilidad de disponer de un sistema híbrido con diversas tecnologías resulta de gran interés. Es por ello, que en las microrredes se suele encontrar el almacenamiento en forma de hidrógeno unido a baterías eléctricas y supercondensadores. Estos elementos serán comentados a continuación. [14],[22].

➤ **Sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno**

Actualmente, el sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno es muy habitual. El almacenamiento en forma de hidrógeno está compuesto por un electrolizador, un tanque/botellas almacenadoras de hidrógeno y una pila de combustible. El electrolizador es el dispositivo encargado de la producción de hidrógeno mediante la descomposición del agua en el proceso de electrólisis y la pila de combustible ha sido explicada en el apartado anterior (equipos generación de energía de la microrred).



Ilustración 29 Esquema de sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno [21]

Centrándonos por ejemplo en un parque eólico, en ocasiones es necesario parar alguna de sus turbinas eólicas por falta de capacidad de la red eléctrica para evacuar la energía eléctrica generada. Gracias al almacén de energía mediante el hidrógeno no sería necesario parar la turbina eólica, ya que con el excedente de energía que la red eléctrica no es capaz de absorber se alimentaría a un electrolizador generándose hidrógeno que se almacenaría para ser posteriormente utilizado mediante pila de combustible para generar energía eléctrica cuando la red tenga capacidad de absorberla.

Actualmente se está investigando intensamente en componentes tanto de pilas de combustible como de electrolizadores con el objeto de reducir costos y hacer más competitiva la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible. En este punto es donde la pila de combustible reversible polimérica tiene un gran interés, ya que para el tipo de aplicación comentada (almacén energético en forma de hidrógeno) un único equipo, la pila de combustible reversible polimérica, podría sustituir al electrolizador y a la pila de combustible. [21]

➤ **Almacenamiento en baterías**

La función principal del sistema de almacenamiento de energía de la batería es proporcionar una reserva en caso de que la planta de energía o el equipo de la línea de transmisión fallen. Para estos sistemas, las baterías recargables se utilizan para almacenar electricidad en forma de energía química. Para cumplir con los requisitos de almacenamiento de energía, la batería debe ser de alta densidad de energía, alta potencia, alta eficiencia de carga, buena capacidad de ciclo, larga vida y bajo costo inicial.

Las ventajas de las baterías como medio de almacenamiento son:

- Las baterías proporcionan un tiempo de respuesta rápido (la respuesta a los cambios de carga se produce en unos 20 ms).
- Son silenciosas y no contaminantes, lo que las hace ideales para su instalación en zonas suburbanas, cerca de los centros de carga.
- Pueden ser empleados en gran variedad de aplicaciones ya sea para regulación de frecuencia, mejora de la calidad de suministro o con fines económicos. Esta gran gama de aplicaciones es debido a la existencia de diversos tipos de baterías cuyas características permiten una gran capacidad de adaptación en función de los requisitos de cada instalación, permitiendo desacoplar la generación del consumo.

- Se adaptan a las limitaciones de terreno y espacio, permitiendo su instalación a nivel residencial, industrial y comercial.

El principal inconveniente de las baterías recargables radica en el relativamente bajo número de ciclos de carga y descarga que soporta, lo cual limita en gran medida su vida útil dependiendo del tipo de batería instalado, la tasa de uso y las condiciones ambientales. Otro problema que presentan las baterías es el alto grado de contaminación de sus componentes. Esto es debido a que éstos son extremadamente tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente; dañando el suelo, el agua y poniendo en peligro a la vida silvestre.

En el ámbito de las baterías de estado sólido destacan las baterías Plomo-Ácido (Pb-Acid), las basadas en Nickel (NiCd, NiMH, NiFe, NiZn), Litio (Li-Ion) y Sodio (NaS, NaNiCl) y las de aire- metal (Me-air) y en el de las baterías de flujo caben destacar las baterías Vanadio Redox (Redox flow battery) y las baterías híbridas como las de Zinc-Bromo (ZnBr Battery). [10], [24],[22]

#### ○ **Baterías de estado sólido**

La batería recargable más usada es la batería de Plomo-Ácido, en parte debido a que cuentan con mayor grado de madurez. Su nombre se debe a que el cátodo está constituido por PbO<sub>2</sub>, el ánodo por Pb y el electrolito es ácido sulfúrico. Las baterías de plomo-ácido tienen tiempos de respuesta rápidos, pequeñas tasas diarias de autodescarga (<0,3%), eficiencias de ciclo relativamente altas (63-90%) y buenos precios (50-600 \$/kW h). Sin embargo, su uso no está tan extendido debido a sus bajos números de ciclos (ciclos de carga antes de que su rendimiento empiece a reducirse según lo previsto) que suelen rondar los 2000. Además, suelen tener un rendimiento deficiente a bajas temperaturas, por lo que normalmente requieren un sistema de gestión térmica, lo que aumenta el coste de la batería. A esto se le suma el inconveniente que presenta la alta toxicidad del plomo. Actualmente, la investigación y el desarrollo de las baterías de plomo-ácido se centra en dos puntos:

- La innovación de materiales para mejorar el rendimiento, como la ampliación de los tiempos de ciclo y el aumento de la capacidad de descarga profunda.
- La aplicación de la tecnología de las baterías para aplicaciones en los sectores de la energía eólica, la energía fotovoltaica y la automoción.

Dentro de la familia de las baterías de Plomo-Ácido, se encuentran las baterías de gel. La principal diferencia radica en el estado del electrolito, que se encuentra gelificado. Esto implica que sea menos nocivo y que sea más resistente antes vibraciones y altas temperaturas.

Las baterías cuya base es el Nickel presentan una mejor densidad energética y de potencia; además de un mayor número de ciclos. Entre sus ventajas destaca por ser una opción de almacenamiento sencillo, de fácil gestión y con capacidad de proveer un servicio fiable y de larga duración, al igual que las baterías Plomo-Ácido. Sin embargo, su efecto memoria afecta a su capacidad, por lo que requiere de un mayor coste de mantenimiento. El efecto memoria afecta la capacidad máxima de la batería, la cual puede ser drásticamente disminuida si la batería se recarga repetidamente después de estar sólo parcialmente descargada. La más conocida dentro de este grupo es la batería de Niquel-Cadmio (NiCd). Una batería de NiCd utiliza hidróxido de níquel y cadmio metálico como los dos electrodos y una solución alcalina acuosa como electrolito. Normalmente tiene una fiabilidad robusta relativamente alta y bajos requisitos de mantenimiento. Las debilidades de las baterías de NiCd son que el cadmio y el níquel son metales pesados tóxicos y que padecen el efecto memoria mencionado anteriormente.

Una batería de Na-S utiliza sodio y azufre fundidos como los dos electrodos y emplea alúmina beta como electrolito sólido. Las reacciones normalmente requieren una temperatura de 574-624 K para asegurar que los electrodos estén en estado líquido; por lo que necesitan de equipos que les permitan alcanzar dichas temperaturas, aumentando así los costes de inversión y mantenimiento. Las características deseables de las baterías de NaS incluyen densidades de energía relativamente altas (150-300Wh/L), una autodescarga diaria casi nula y una capacidad nominal más alta comparados con otros tipos de baterías (hasta 244,8MWh). La batería utiliza materiales baratos y no tóxicos que permiten una alta reciclabilidad (99%). Sin embargo, las limitaciones son el alto costo de operación anual (80 \$/kW/año) y un sistema extra requerido para asegurar su temperatura de operación. La investigación y el desarrollo de esta tipología de batería se centran principalmente en mejorar el rendimiento de la célula disminuyendo/eliminando a su vez restricciones relacionadas con la alta temperatura de operación.

En una batería de Litio (Li-Ion), el cátodo está constituido de un óxido de metal de litio, como  $LiCoO_2$  y  $LiMO_2$ , y el ánodo está hecho de carbono grafito. El electrolito es normalmente un líquido orgánico no acuoso que

contiene sales de litio disueltas, como  $LiClO_4$ . Esta tipología de baterías posee una considerable vida útil (en torno a 15 años o 6.000 ciclos), una eficiencia mayor que el 95% y poseen baja tasa de autodescarga. Se considera un buen candidato para aplicaciones en las que el tiempo de respuesta, las pequeñas dimensiones y/o el peso del equipo son importantes (tiempo de respuesta en milisegundos, 1500-10.000 W/L, 75-200Wh/kg, 150-2000W/kg). Los principales inconvenientes son que la profundidad de la descarga (DoD) puede afectar a la vida útil de la batería de Li-Ion y el paquete de baterías suele requerir un ordenador de a bordo para gestionar su funcionamiento, lo que aumenta el coste global de la misma. Gracias a la introducción de mejoras en su operación, especialmente relacionadas con la seguridad debido a la inestabilidad de sus electrodos; se ha extendido su uso a gran escala, y con ello, al campo de las microrredes. [10], [24],[22].

#### ○ **Baterías de flujo (FBES)**

Una batería de flujo almacena energía en dos parejas redox solubles contenidas en tanques externos de electrolito líquido. Estos electrolitos pueden ser bombeados desde los tanques hasta las celdas de la pila, la cual consiste en dos compartimentos de flujo de electrolitos separados por membranas selectivas de iones. La operación se basa en reacciones de reducción-oxidación de las soluciones de electrolitos. Durante la fase de carga, un electrolito se oxida en el ánodo y otro electrolito se reduce en el cátodo, y la energía eléctrica se convierte en energía química. El proceso anterior se invierte durante la fase de descarga. Las baterías de flujo pueden clasificarse en las categorías de flujo redox y baterías de flujo híbrido, siendo las más comúnmente adoptadas las de Vanadio Redox.

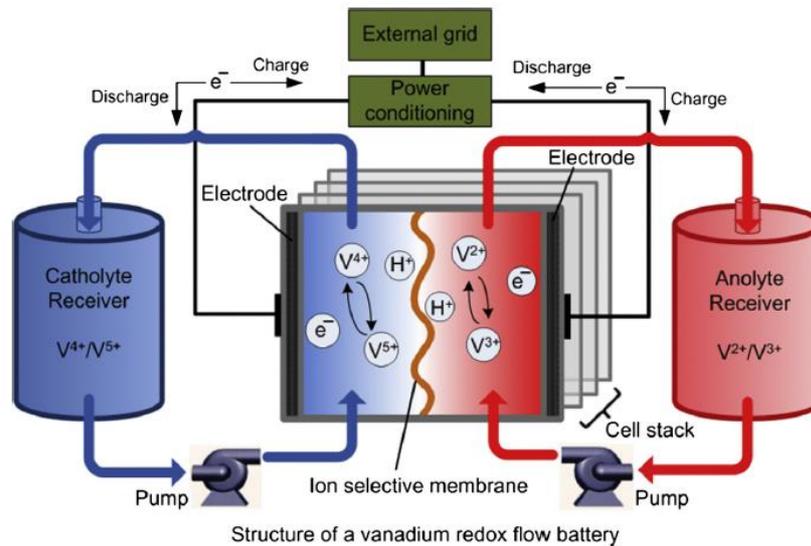


Ilustración 30 Esquema de funcionamiento de baterías de flujo Vanadio Redox [24]

Una ventaja crucial de las baterías de flujo es que la potencia es independiente de su capacidad de almacenamiento. La potencia del sistema FBES está determinado por el tamaño de los electrodos y el número de células en la pila; mientras que la capacidad de almacenamiento se determina por la concentración y la cantidad de electrolito. Esto hace que sean una solución de almacenamiento fácilmente adaptable y polivalente. Además, presentan bajas tasas de autodescarga debido a que los electrolitos se almacenan en un sistema sellado separado en tanques. Sin embargo, tienen mayores requerimientos de espacio que las baterías de estado sólido, elevados costes de inversión y mantenimiento a lo largo de toda su vida útil. Además presentan problemas en la calidad de la densidad energética debido a la inestabilidad de las soluciones electrolíticas, lo que ha frenado su desarrollo en un mayor número de aplicaciones. [10], [24],[22].

#### ➤ **Volante de inercia**

Un sistema FES (Flywheel Energy Storage) es un sistema de almacenamiento electromecánico en el que la energía se almacena en forma de energía cinética de una masa en rotación. El volante de inercia entrega energía rotacional al alimentar un generador eléctrico hasta que la fricción lo disipe. El sistema está compuesto de cinco componentes primarios: un volante, un grupo de cojinetes, un motor/generador eléctrico reversible, una unidad electrónica de potencia y una cámara de vacío. A continuación, se muestra una imagen que muestra la estructura del sistema FES:

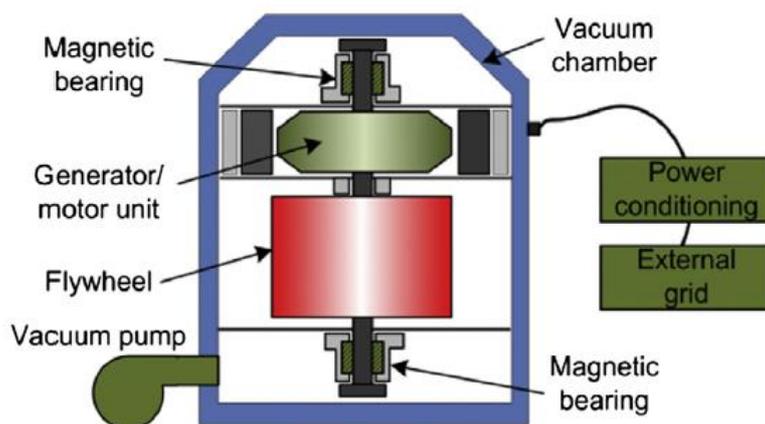


Ilustración 31 Esquema de un sistema FES [24]

Para reducir la cizalladura del viento y la pérdida de energía por la resistencia del aire, el sistema FES se suele colocar en un ambiente de alto vacío. La cantidad de energía almacenada depende de la velocidad de rotación del volante y de su inercia.

El FES puede clasificarse en dos grupos:

- FES de baja velocidad: utiliza acero como material del volante y gira por debajo de 6 103 rpm. Los sistemas de baja velocidad se utilizan normalmente para aplicaciones de corta y media/alta potencia. La energía específica de los volantes de inercia de baja velocidad es de 5Wh/kg.
- FES de alta velocidad: utiliza materiales compuestos avanzados para el volante, como la fibra de carbono, que puede funcionar hasta 105 rpm. Estos sistemas utilizan cojinetes magnéticos sin contacto para mitigar el desgaste de los cojinetes, mejorando así la eficiencia. Las áreas de aplicación de los FES de alta velocidad se expanden continuamente, principalmente en el servicio de alta calidad de potencia, pudiendo alcanzar una energía específica de hasta 100Wh/kg. Sin embargo, el costo de estos sistemas de alta velocidad realizados con materiales compuestos puede ser mucho mayor que el de los sistemas de volantes metálicos convencionales.

El FES tiene algunas ventajas que destacan frente a los sistemas vistos anteriormente:

- Una alta eficiencia de ciclo (hasta el 95% a potencia nominal), una densidad de potencia relativamente alta, sin efectos de profundidad de descarga y fácil mantenimiento.
- Los volantes pueden almacenar y liberar grandes cantidades de energía de forma muy rápida y eficientemente en comparación con las baterías convencionales.
- Las vidas útiles de los volantes de inercia son alrededor de 20-30 años, con un escaso mantenimiento. Algunos incluso han llegado a operar toda su vida útil sin mantenimiento.
- Los volantes de inercia no sufren el efecto memoria, el cual está presente en algunos tipos de baterías.
- Pueden funcionar bajo temperaturas más altas y en un rango más amplio de condiciones ambientales que las baterías. Además, los volantes no se ven afectados por los cambios de temperatura a diferencia de las baterías químicas recargables.
- Son mucho menos dañinas para el medio ambiente que las baterías.
- Mediante una simple medición de la velocidad de rotación, es posible conocer la cantidad exacta de energía almacenada en los volantes.

Por otro lado, presentan las siguientes desventajas frente a otras formas de almacenamiento:

- El uso de los acumuladores en el volante se ve actualmente obstaculizado por el peligro de la rotura explosiva de la rueda debido a la sobrecarga.
- Uno de los principales límites del diseño de los volantes de inercia es la tensión la fuerza del material

utilizado para el rotor. [10], [24],[22].

### ➤ **Bombeo hidráulico**

El bombeo hidráulico es una tecnología con una larga historia, con alta madurez y de gran capacidad energética. El funcionamiento de una planta típica de bombeo hidráulico se basa en el uso de dos reservas de agua, separadas verticalmente. Durante las horas de baja demanda eléctrica, el agua es bombeada al depósito de mayor nivel; durante las horas punta, el agua puede ser liberada de nuevo al nivel inferior desde el depósito de nivel. En el proceso, el agua impulsa las turbinas conectadas a las máquinas eléctricas para generar electricidad. La cantidad de energía almacenada depende de la diferencia de altura entre los dos depósitos y el volumen total de agua almacenada.

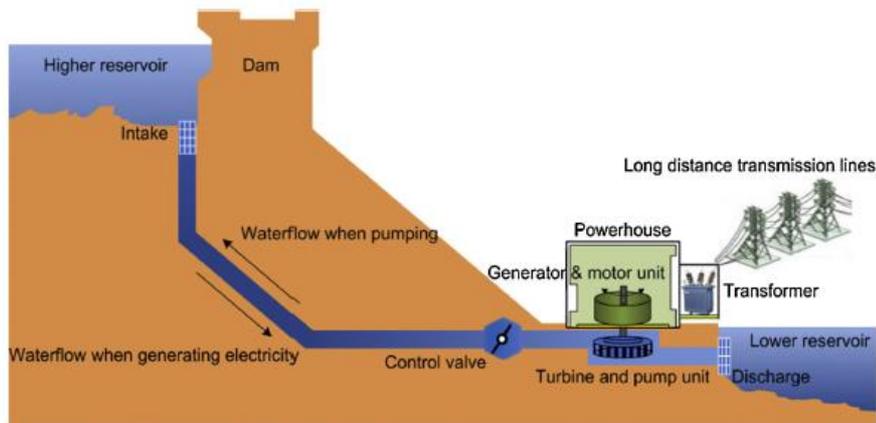


Ilustración 32 Esquema de una instalación de bombeo hidráulico [22]

Existen varias plantas de bombeo con potencias nominales que van desde 1 MW a 3003 MW, con una eficiencia de ciclo de aproximadamente 70-85% y una vida útil de más de 40 años. Las ventajas básicas del almacenamiento por bombeo incluyen energía de bajo coste, regulación de frecuencia de la red y la oportunidad de proporcionar capacidades de reserva cuando el agua que se libera fluye a través de una turbina durante los períodos de máxima demanda. La principal desventaja es que su uso está principalmente enfocado a instalaciones grandes debido a sus altos costes de inversión, así como la dificultad de instalación (la cual depende en gran medida de los recursos del terreno) en comparación con otras tecnologías susceptibles de ser instaladas con más facilidad en conjunto con sistemas de generación distribuida. [10], [24],[22].

### ➤ **Sistemas de aire comprimido (CAES)**

Los sistemas de aire comprimido CAES (compressed-air energy storage) basan su funcionamiento en la compresión de aire en un depósito subterráneo (conocido como caverna) durante el período de menor demanda eléctrica. En el período de máxima actividad, cuando la demanda de electricidad es alta, el aire se retira, se calienta con gas o petróleo, y fluye a través de turbinas de expansión para accionar un generador. Estas plantas queman alrededor de un tercio del combustible de una turbina de combustión convencional, reduciendo así la producción de un tercio de los contaminantes aproximadamente. Una aplicación prominente de CAES es en las plantas de energía eólica debido a la intermitencia de este tipo de energía.

El CAES adiabático posee una eficiencia del 70%-85%, muy superior al 40-50% correspondiente a los sistemas CAES diabáticos. En comparación con otros sistemas de almacenamiento de energía, posee una tasa de descarga muy variable (como en el caso del bombeo hidráulico); una vida útil similar a la de los volantes de inercia pudiendo almacenar energía durante periodos de tiempo mayores que los volantes de inercia. Además, posee una baja tasa de autodescarga y pueden ser diseñados para dar respuesta a sistemas de pequeña o gran escala. Su principal desventaja son los elevados costes de inversión necesarios para construir los depósitos y sistemas de captación, así como el extenso uso del terreno, razones por las cuales no se consideran interesantes para instalaciones de pequeño o mediano tamaño. [10], [24],[22].

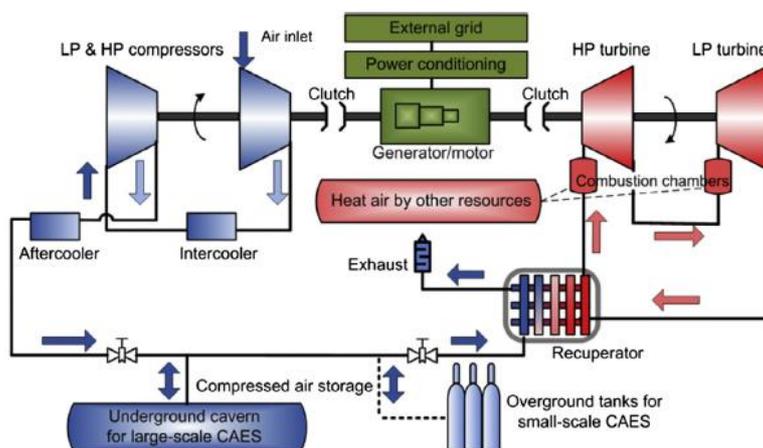


Ilustración 33 Diagrama esquemático del funcionamiento del CAES [24]

### ➤ Ultracondensadores

Un condensador está compuesto de al menos dos conductores eléctricos (normalmente fabricado con láminas metálicas) separado por una fina capa de aislante (normalmente hecha de cerámica, vidrio o una película plástica). Cuando se carga un condensador, la energía se almacena en el material dieléctrico en un campo electrostático. Su máximo voltaje de funcionamiento depende de las características de ruptura del material dieléctrico. Los condensadores son apropiados para almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica y conducir un voltaje variable. Asimismo, poseen una mayor densidad de potencia y un menor tiempo de carga en comparación con las baterías convencionales. No obstante, tienen una capacidad limitada, una densidad de energía relativamente baja y suelen darse altas disipaciones de energía debido a las altas pérdidas de autodescarga. De acuerdo con estas características, los condensadores pueden utilizarse para algunas aplicaciones relacionadas con el mantenimiento de la calidad de la energía, como la corrección de la potencia de alto voltaje, la suavización de la salida de las fuentes de alimentación, el tendido de puentes y la recuperación de energía en sistemas de transporte masivo.

Los supercondensadores, también llamados condensadores eléctricos de doble capa o ultracondensadores; contienen dos electrodos conductores, un electrolito y un separador de membrana porosa. La energía se almacena en forma de carga estática en las superficies entre el electrolito y los dos electrodos conductores. Los supercondensadores de alto rendimiento se basan en nanomateriales con el objetivo de aumentar la superficie de los electrodos para mejorar la capacitancia. Las densidades de potencia y energía de los supercondensadores están entre las de las baterías recargables y las de los condensadores tradicionales. Las características más importantes de los supercondensadores son sus alto número de ciclos (más de 1.105 ciclos) y su alta eficiencia (84-97%). Sin embargo, la tasa de autodescarga diaria de los supercondensadores es bastante alta (5-40%) y el coste capital también es elevado (aproximadamente 6000 \$/kW h). Por estos motivos se está empezando a barajar la posibilidad de desarrollar sistemas híbridos junto a baterías, lo cual permitiría una mejora global de ambas tecnologías a corto plazo. [10], [24],[22].

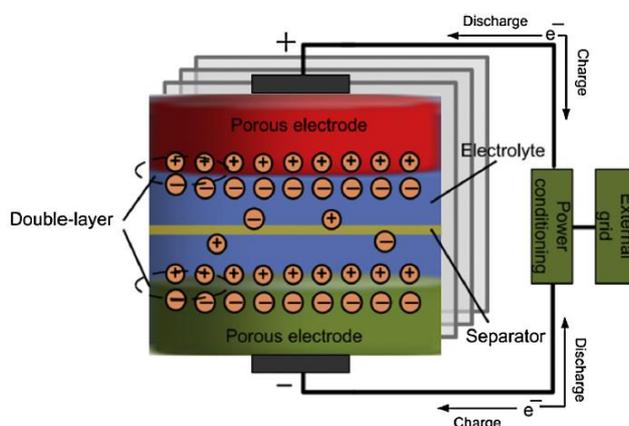


Ilustración 34 Diagrama esquemático de un supercondensador [24]

### ➤ Superconductores (SMES)

Otro tipo de sistema de almacenamiento de energía a considerar es el almacenamiento de energía magnética superconductor (SMES). El SMES es un dispositivo rápido y controlable que puede absorber o suministrar energía activa y reactiva. Este tipo de almacenamiento de energía consiste en convertir la corriente continua de la energía de las horas de baja demanda energética y alimentarla a una bobina de alambre superconductor en forma de toroide. La bobina se instala en una zanja y se mantiene a temperatura superconductor mediante un sistema de refrigeración. Con este proceso, la unidad puede almacenar y descargar energía con una eficiencia superior al 90%, con un tiempo de carga inferior de 25 ms. Sin embargo, este sistema es muy caro debido a que requieren sistemas de refrigeración y elevadas cantidades de material conductor. Además de estos obstáculos, el SMES puede tener efectos perjudiciales desconocidos para la salud por el gran campo magnético que produce. [10], [24],[22].

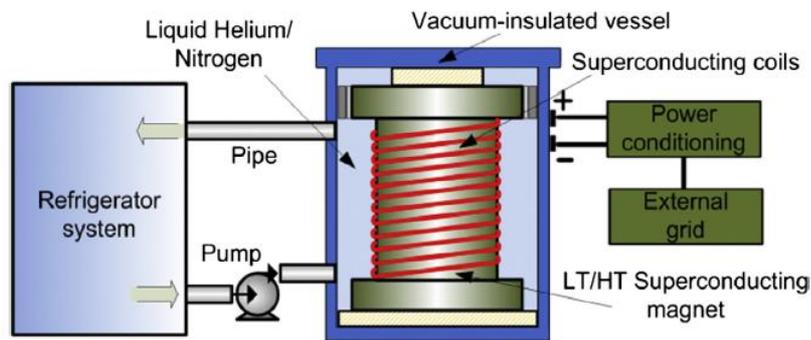


Ilustración 35 Esquema de un superconductor (SMES) [24]

### 2.2.3. Equipos de consumo de energía

Las microrredes deben responder a la demanda de unas determinadas cargas eléctricas o térmicas, de carácter estático (constantes en el tiempo) o dinámico (dependen y cambian con el tiempo, con unidades de frecuencia variable). Con independencia de lo anterior, lo que determina realmente la gestión que se puede hacer de las cargas es si estas son controlables o fijas:[10]

- Cargas controlables: son aquellas cargas que pueden ser conectadas o desconectadas cuando se requiera, permitiendo desplazar su operación en función de los requisitos energéticos, capacidad de generación o como respuesta a incentivos económicos (esto es lo que se conoce como DSI, o Demand Side Integration). [10],
- Las cargas fijas son aquellas que deben satisfacerse en todo momento, por lo que también se conocen como cargas críticas.[10]

# 3 MICRORREDES ENERGÉTICAS EN ESPAÑA

---

En el capítulo anterior, hemos visto que una microrred puede estar conformada por los siguientes equipos:

- Equipos de generación de energía: fotovoltaica, eólica, solar térmica, biomasa, pila de combustible, grupo electrógeno, micro turbina de gas e hidroeléctrica a pequeña escala.
- Equipos de almacenamiento de energía: tecnología del hidrógeno, baterías, volante de inercia, bombeo hidráulico, sistemas de aire comprimido, ultracondensadores y superconductores.
- Equipos de consumo de energía: cualquier equipo que consuma energía y se conecte a la microrred.

Estos equipos están conectados entre ellos por otros equipos que se encargan del control de las microrredes. Además, es interesante recordar que pueden operar tanto en modo aislado como conectadas a la red principal (a través del PCC); lo que hace aún más complejo este control. Es necesario por tanto un control adecuado de la microrred para una operación estable y económicamente eficiente en ambas situaciones. El sistema de control está conformado por ordenadores y equipos basados en la electrónica de potencia, los cuales deben regular frecuencia y tensión en cualquiera de los modos de operación, debe repartir la carga entre los distintos sistemas de generación distribuida y el almacenamiento, gestionar el flujo con la red principal y optimizar los costes de operación. [14]

En este capítulo se presentan las microrredes más importantes presentes actualmente en España:

1. Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2).
2. Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I.
3. Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II.
4. Microrred de la Universidad de Navarra.
5. Microrred de la Universidad de Valencia.
6. Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa.
7. Microrred Atenea de Cener (Navarra).
8. Microrred LIER(Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE).
9. Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE.
10. Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes.
11. Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente.
12. Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón.
13. Microrred del IREC Energy SmartLab.
14. Microrred del INTA.
15. Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER.

16. Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE.
17. Microrred de Tecnalia.
18. Microrred de la Universidad de Oviedo.
19. Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab.

Se describe para cada microrred los equipos que las componen, así como las estrategias de control y comunicación. Este capítulo será introductorio al análisis estadístico posterior, ya que se comprobará que no todos los equipos enumerados con anterioridad aparecen en las microrredes españolas. Es más, se demostrará también que el uso de algunos equipos es más común que el de otros.

## 3.1 Microrredes del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)

### 3.1.1 Microrred del CNH2

El Centro Nacional del hidrógeno dispone de una microrred de corriente alterna trifásica, aislada de la red eléctrica, formada por los siguientes componentes:

- Instalación solar fotovoltaica de 100 kWn: la instalación solar fotovoltaica del CNH2 está compuesta por un total de 432 paneles de 250 W de potencia pico, de la marca EXIOM. Estos paneles están dispuestos en estructuras metálicas fijas, con una inclinación de 25°.
- Pila de combustible polimérica de 30 kWn: el sistema de pila de combustible polimérica es de la marca Heliocentrics, en concreto el modelo HyPM LAB HD30. Esta pila es de alta potencia y está refrigerada por agua que forma parte de la microrred. Su potencia eléctrica nominal es de 30 kW.
- Electrolizador alcalino de 60 kWn: el electrolizador alcalino es de la marca ERREDUE, en concreto el modelo G16D. Incluye un sistema de purificación Deoxo, que se basa en la combustión catalítica de oxígeno residual presente en la corriente gaseosa para conseguir hidrógeno de alta pureza.
- Parque de almacenamiento de hidrogeno a diferentes presiones: el hidrógeno una vez generado por el electrolizador ERREDUE se almacena en 16 botellas de 50 L de capacidad y en un tanque de 7500 L de capacidad a una presión de 10 bar.
- Estación de repostaje de hidrógeno o hidrogenera.
- Parque de baterías de gel: 24 unidades de baterías SONNENSCHNEIN, modelo A-602/3270 SOLAR, con una capacidad C120 (que equivale a 3266 Ah). Cada uno de los vasos da una tensión de 2V, lo que supone 48 V tras su conexión en serie. Si multiplicamos los 48V por los 3266Ah, obtenemos 156,768 kWh de energía almacenada a C120.
- Cargas eléctricas de varios laboratorios.
- Sistema de aprovechamiento de calor residual: el electrolizador y la pila de combustible de la microrred, tienen implementados sistemas de refrigeración, los cuales se activan cuando es necesario refrigerar el equipo. Con el objeto de aprovechar ese calor, se ha instalado un sistema de recuperación de calor, el cual permite usar el calor que anteriormente se disipaba en al ambiente, en el sistema de climatización del Centro Nacional del Hidrógeno.



Ilustración 36 Esquema de la microrred del Centro Nacional de Hidrógeno [24]

El modo de funcionamiento de la microrred descrita en el punto anterior se comenta a continuación.

Siempre que haya generación de energía solar fotovoltaica se van a alimentar los laboratorios. Si una vez alimentados los laboratorios mediante energía solar fotovoltaica siguen existiendo excedentes, se utilizarán para generar hidrógeno mediante el electrolizador. Este hidrógeno será almacenado en el parque de almacenamiento de hidrógeno. Si una vez alimentados los laboratorios y el electrolizador, aún siguen existiendo excedentes de energía solar fotovoltaica, se almacenará en las baterías de gel.

Desde el punto de vista de la satisfacción de la demanda, en los momentos en que la generación fotovoltaica no es suficiente para alimentar los laboratorios, se utilizará la pila de combustible para generar la energía eléctrica necesaria para que los laboratorios puedan funcionar de forma correcta. Asimismo, si entre la energía solar fotovoltaica y la pila de combustible no pueden satisfacer la demanda de los laboratorios, se va a hacer uso de las baterías de gel para poder satisfacer la demanda de los laboratorios.

Es importante destacar que, durante el funcionamiento del electrolizador y la pila de combustible, se va a aprovechar el calor residual de las mismas para su uso en el sistema de climatización del Centro Nacional del Hidrógeno, pasando previamente por un almacenamiento intermedio en materiales de cambio de fase.[24],[25],[26],[65].

### 3.1.2 Laboratorio de microrredes del CNH2

El Laboratorio de Microrredes es una plataforma para el desarrollo y el ensayo de sistemas basados en el hidrógeno aplicados en el campo de las microrredes y las redes inteligentes. El laboratorio está diseñado específicamente para integrar el hidrógeno como portador de energía con otras soluciones de almacenamiento de energía como baterías y ultracondensadores. Es una plataforma abierta para integrar nuevos componentes de microrredes.

Este laboratorio integra la siguiente tecnología:

- La optimización de los recursos de la microrred para desarrollar sistemas avanzados de gestión de la energía (EMS): el solucionador TOMLAB permite el desarrollo de algoritmos dinámicos de lógica mixta que incluyen una programación mixta lineal, cuadrática y no lineal. Otras soluciones de software

soportadas son Matlab, Excel y C/C++. La microrred es una plataforma abierta que acepta otras soluciones de EMS con comunicación Modbus.

En la siguiente imágenes muestra un ejemplo de la plataforma de control disponible.

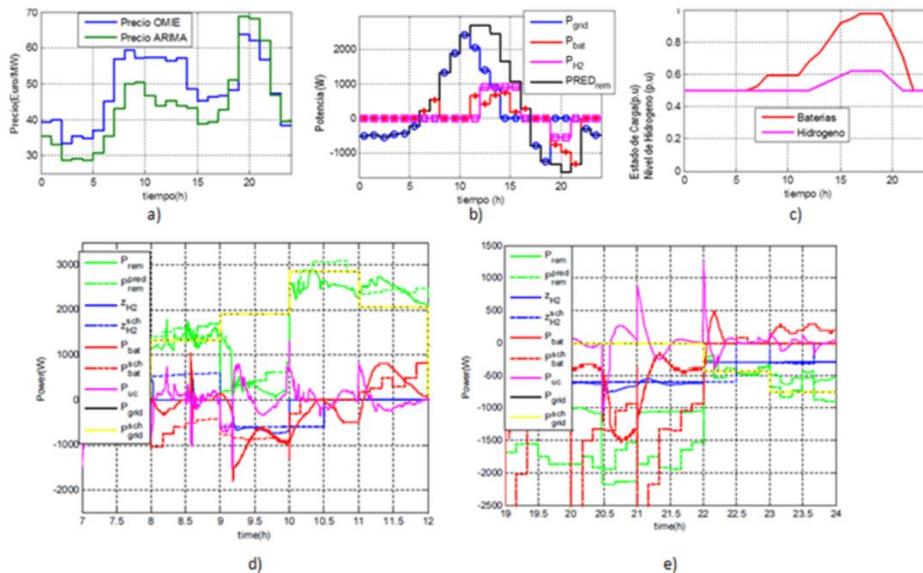


Ilustración 37 Gestión realizada por las herramientas de optimización de los recursos de la microrred [25]

En las imágenes A, B, C se muestra la actuación del controlador en el mercado diario. La función de coste del controlador basado en técnicas de control predictivo basadas en el modelo (MPC, Model Predictive Control) maximiza la rentabilidad económica del intercambio de energía de la microrred con la red eléctrica, en función de un modelo de predicción de precios. Entre sus aplicaciones destaca:

- Con respecto al uso de los sistemas de almacenamiento de alta densidad de energía en baterías e hidrogeno, se realiza atendiendo a criterios de degradación mínima. Además, se planifica la microrred para que se minimicen los ciclos de arranque y parada del electrolizador y de la pila de combustible, así como también se busca minimizar las variaciones de potencia de dichos dispositivos.
- Para la planificación de las baterías se minimizan los ciclos de carga y descarga, así como el nivel de corriente de carga y descarga demandado a esta tecnología. Como se puede ver la imagen C, el controlador tiene en cuenta las restricciones de máxima y mínima carga tanto de las baterías, como del depósito de hidrogeno.
- Se impone que el nivel mínimo sea 50% en ambas tecnologías para preveer posibles faltas en la red eléctrica y una posible transición al sistema aislado.

En las imágenes D y E se muestran un test real de 24 horas, en los que además se incorpora el supercondensador. Como se puede apreciar, esta tecnología absorbe los transitorios rápidos propios de las energías renovables para evitar la degradación del resto de tecnologías, al tiempo que se mantiene en un estado intermedio de carga. Se han desarrollado también los controladores de mercado intradiario y de regulación de servicio.

- Electrónica de potencia: todos los dispositivos de electrónica de potencia están equipados con una plataforma Real Time Target modelo OPAL RT-OP4500 que permite la programación directa de los

controladores de electrónica de potencia a partir de un algoritmo desarrollado en Matlab, Simulink y Simpower, disminuyendo así los tiempos de desarrollo para nuevos sistemas. La potencialidad de los equipos HIL de OPAL unidos a los emuladores de red, permite integrar cualquier casuística, falta o simulación de redes complejas con un alto número de nodos mediante la amplificación de señal de los resultados de la simulación siendo ésta ejecutada en tiempo real.



Ilustración 38 Equipos de electrónica de potencia del CNH2 [25]

- Interoperabilidad de las tres microrredes de 1kW, 30kW y 90 kW. Se ha creado una plataforma para el prototipado rápido de soluciones SCADAs aplicadas a sistemas de energía usando los siguientes softwares: LabVIEW, Visual .Net y Android.

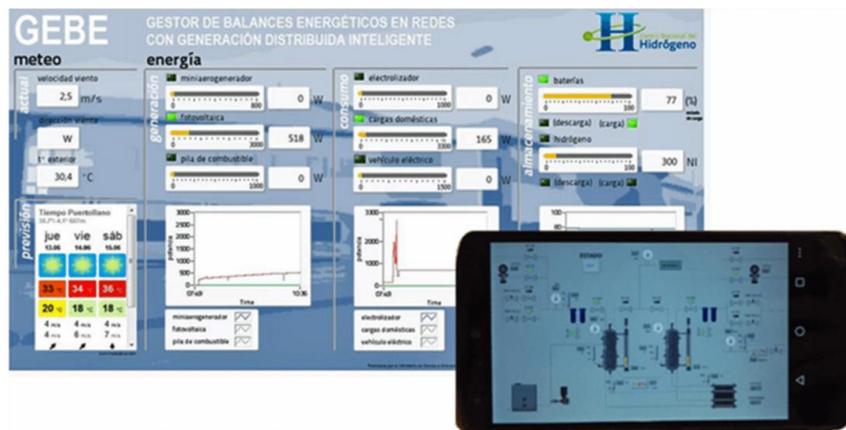


Ilustración 39 Ejemplo del sistema SCADAs del CNH2 [25]

- Power-Hardware in the Loop (HIL): la microrred está equipada con dos emuladores de red (30 y 90 kW) integrados en la plataforma HIL OPAL RT -OP5600 con la posibilidad de emular una red compleja o una red casuística conectada a las microrredes.

La plataforma de experimentación desarrollada está compuesta por tres embarrados distribuidos por potencias 90 kW, 30 kW, 1 kW.

- Microrred experimental I: red integrada en un bus de continua a 24 V, que dispone de una conexión real tanto a sistemas de generación de energías renovables (constituido por un mini aerogenerador de 800 W y 3 kWp de campo fotovoltaico sobre cubierta), como a sistemas de almacenamiento eléctrico formado por baterías de gel (24 V, 1.110 Ah) y a un sistema de ciclo de H<sub>2</sub> constituido por un electrolizador PEM (1 kW), almacenamiento químico de Hidrógeno en hidruros metálicos reversibles (3 Nm<sup>3</sup>) y una pila de combustible tipo PEM (1 kW). Esta microrred puede operar bien de manera aislada o bien conectada a red mediante un inversor bidireccional (2kW).

- Microrred experimental II: red integrada en un bus de alterna 400/230 V que dispone de conexión a estos equipos: emulador de red de 30 kW, conexión tanto a sistemas físicos o bajo emulación de generación fotovoltaica (10 kWp, 30 kWp), emulación eólica (30 kW), supercondensadores (30kW, 714 Wh), baterías de ion-litio (30kW, 38.8 kWh) y un sistema de ciclo de H2. Este sistema está constituido por un electrolizador alcalino (5 kW), un sistema de almacenamiento de H2 a presión (200 bar), una pila de combustible tipo PEM (5 kW). También tiene integrada electrónica de potencia con capacidad de integrar electrolizadores hasta 30 kW (20-230 Vdc, 0-600 Adc) y pilas de combustible hasta 15 kW (20 a 170 Vdc, Adc 0-400). Esta microrred experimental tiene posibilidad de operar bien de manera aislada o bien conectada a red.
- Microrred experimental III: se dispone de un embarrado de 90 kW para la integración de componentes en microrred a esta escala de potencia. En esta microrred, en la actualidad, tan sólo se tiene un emulador de red de potencia nominal de 90kW conectado a un equipo HIL de OPAL RT (modelo 5600) de manera que permite amplificar la señal de resultados de simulaciones en tiempo real realizadas en Matlab, Simulink y Simpower con modelos complejos de casuísticas de redes eléctricas con elevado número de nodos inclusive. [24],[25],[26],[65].

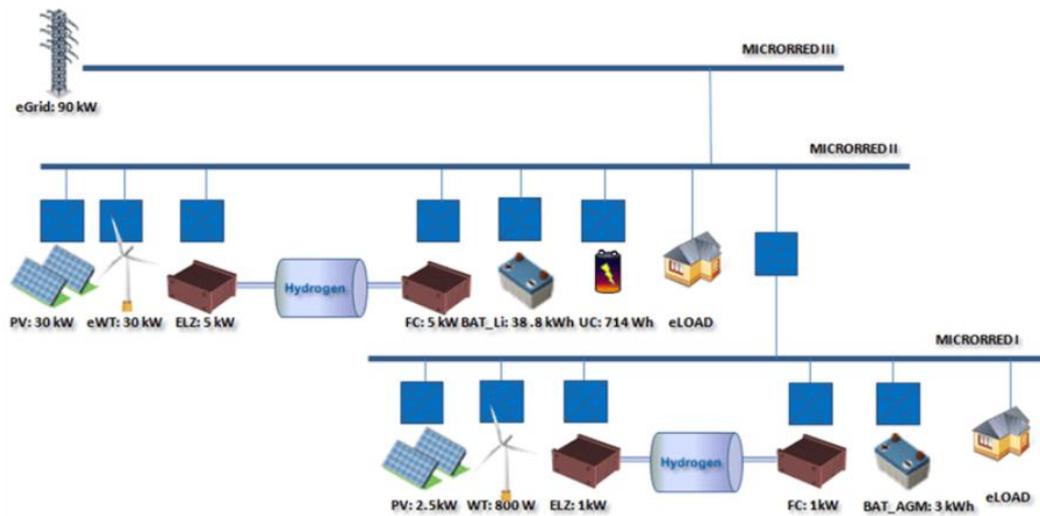


Ilustración 40 Esquema de las microrredes experimentales del CNH2 [25]



Ilustración 41 Vistas de los paneles fotovoltaicos, aerogenerador, baterías y supercondensadores. [25]

### 3.2 Microrred de la Universidad de Navarra (UNA)

El Laboratorio de Microrredes de la Universidad Politécnica de Navarra (UPNA) sirve como plataforma de experimentación y difusión de microrredes, en especial aquéllas destinadas a la integración de las energías renovables mediante estrategias de control y elementos de almacenamiento energético. Esta microrred, financiada por el Gobierno de Navarra y los fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional), ha sido concebida para que pueda servir como banco de ensayos para los distintos elementos generadores, acumuladores, de conversión, de monitorización y de control que se puedan incorporar, así como para el análisis del comportamiento de las microrredes en entornos urbanos y Smart Cities.

Se presentan a continuación los elementos de la microrred instalada en el laboratorio. Como elementos de generación, dispone de un sistema fotovoltaico y un aerogenerador, y como almacenamiento electroquímico dispone de una batería de plomo-ácido. Estos elementos están conectados a la red a través del inversor Ingecon Hybrid MS, de Ingeteam. En el lado de red se dispone de una carga electrónica programable que es capaz de reproducir distintos perfiles de consumo que pueden ser modificados en tiempo real por la estrategia de control.

Para la adquisición de datos se dispone de un conjunto de vatímetros colocados en los distintos nodos de la microrred, además de una estación meteorológica que permite evaluar el funcionamiento de los generadores renovables, así como simular otros generadores renovables no instalados en la microrred. Todos estos datos son recogidos por la estación de monitorización y control y son utilizados por la estrategia de control. En esta estación de monitorización y control se muestran los datos en tiempo real, que a su vez son almacenados en una base de datos para su posterior consulta.

Se describen los equipos que conforman esta microrred:

- Convertidor electrónico de potencia: la potencia del generador fotovoltaico, del aerogenerador y de las baterías, es gestionada, como se ha mencionado anteriormente, por el inversor de Ingeteam, Ingecon Hybrid MS30. Este inversor se compone de un convertidor para cada elemento, es decir, sendos convertidores DC/DC para los paneles y la batería y un convertidor AC/DC para el aerogenerador. Estos convertidores vierten la energía a un bus DC común, que se conecta, a su vez, al bus AC de salida mediante un inversor DC/AC. Las cargas se conectan al bus AC y éste puede estar conectado a red o, en su defecto, funcionar de forma aislada. El inversor, por tanto, debe ser capaz de trabajar en ambos modos de funcionamiento. En caso de estar en modo aislado, el Ingecon Hybrid MS30 es el encargado de gestionar la potencia, haciendo que la batería proporcione o absorba la potencia necesaria para compensar la diferencia de potencia entre generación y consumo.



Ilustración 42 Convertidor Ingecon Hybrid MS30, con sus tres módulos, de arriba abajo: (1) convertidor eólico, (2) cargador de baterías y convertidor fotovoltaico y (3) inversor. (UPNA) [29]

- Campo fotovoltaico: se compone de 48 paneles BP585, instalados en el tejado del edificio que aloja a la microrred, orientados al sur e inclinados  $30^\circ$ . La potencia nominal total es de 4080 W, si bien la potencia actual en condiciones estándar de medida es de 3600 W.



Ilustración 43 Paneles fotovoltaicos en el tejado del laboratorio. (UPNA). [29]

- Aerogenerador: el aerogenerador utilizado en la microrred es el modelo INCLIN6000 de Bornay, con una potencia nominal de 6 kW. Se sitúa junto al edificio de la microrred, sobre una torre de 20 m de altura.



Ilustración 44 Aerogenerador Bornay sobre la torre de 20 m y transformador.(UPNA). [29]

- Batería: la batería, que se sitúa el sótano del edificio de la microrred, está compuesta por 120 vasos FIAMM SMG300 conectados en serie. Estos vasos son células de plomo-ácido estacionarias de 2 V y una capacidad nominal C10 de 300 Ah, sumando una capacidad total de 72 kWh.
- Carga programable: los perfiles de demanda utilizados en las simulaciones son reproducidos por la carga electrónica PLA7.5-600-400 de AMREL de 7,5 kW y 300 Ah. Esta carga va recibiendo la consigna de consumo en tiempo real desde un ordenador externo, reproduciendo la demanda de la vivienda.



Ilustración 45 Carga programable junto a ordenador de simulación de demanda doméstica. (UPNA).[29]

- Almacenamiento con hidrógeno: está conformado por un sistema de pilas de combustible PEM de Heliocentrics con 4 pilas NEXA1200 de 1,2 kW cada una y por un sistema de almacenamiento de hidrógeno de 35,2 Nm<sup>3</sup>.
- Grupo electrógeno de 16,5 kVA: la microrred dispone de un grupo electrógeno que puede generar la red AC en caso de no disponerse de red eléctrica o de no tener suficiente energía renovable para mantener activas ciertas cargas.
- Relés de control de la microrred: tanto la estrategia, de manera automática, como el usuario, de manera manual, tienen que ser capaces de aislar ciertos elementos de la microrred en cualquier momento.

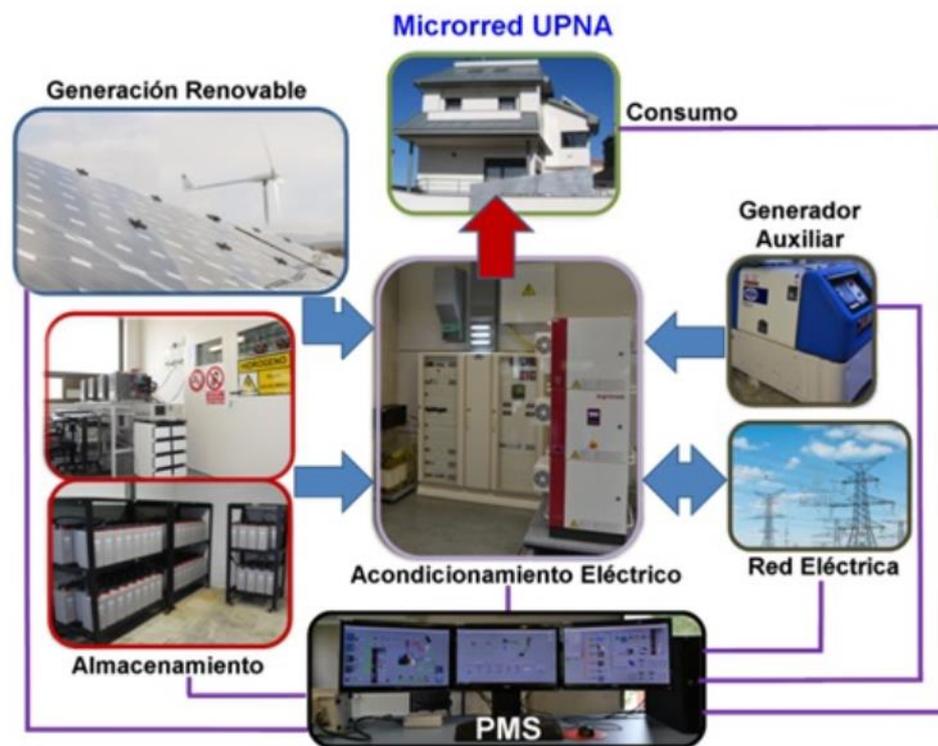


Ilustración 46 Esquema general de la microrred de la UPNA [28]

Para la monitorización y control de la microrred se ha desplegado una red de sensores y elementos de medida que utilizan diversos protocolos de comunicación. En total, se manejan cada segundo 150 variables, ya sea para su uso inmediato en la estrategia de control o para posteriores análisis de los elementos de la microrred.

En la siguiente imagen, se muestra esquemáticamente el sistema de comunicación. Se observa cómo el elemento central es el ordenador PXI de National Instruments, el cual es un ordenador industrial que trabaja en tiempo real y se encarga de la adquisición y acondicionamiento de los datos y de la gestión de la microrred. Otro elemento a destacar de esta red son los vatímetros, que se usan para monitorizar la potencia de los diferentes elementos de potencia de la microrred. Es por ello que cada uno de estos elementos dispone de su propio vatímetro adecuado a su potencia. Además, se han utilizado vatímetros de distintos fabricantes y con distintos protocolos de comunicación con el fin de poder comparar su funcionamiento.

El funcionamiento del sistema de monitorización y control es el siguiente. Al PXI llegan las medidas de los distintos vatímetros, las medidas analógicas de los distintos sensores de la estación meteorológica y toda la información del convertidor Ingecon Hybrid MS30. Utilizando dichas medidas, el PXI ejecuta la estrategia y manda las órdenes pertinentes al híbrido, a los relés y a la carga programable. Además, este PXI está conectado al PC de monitorización y control que, aparte de tener acceso a Internet para la descarga de datos meteorológicos, se utiliza para la monitorización y control remotos. [28],[29],[65]

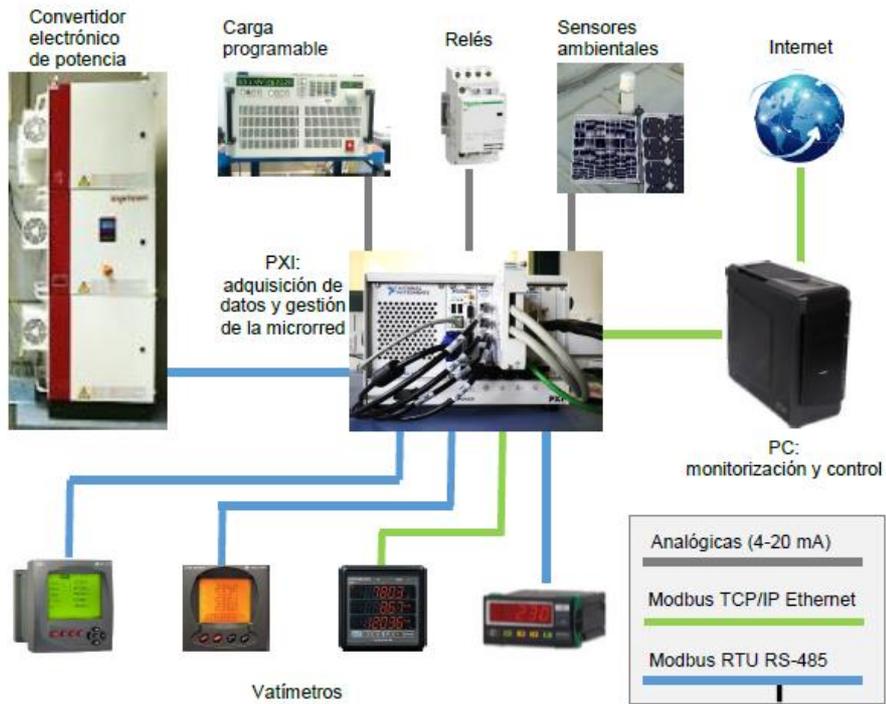


Ilustración 47 Esquema de las comunicaciones de la microrred de la UPNA.[29]

### 3.3 Microrred de la Universidad de Valencia

La siguiente microrred experimental está localizada en el laboratorio del Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

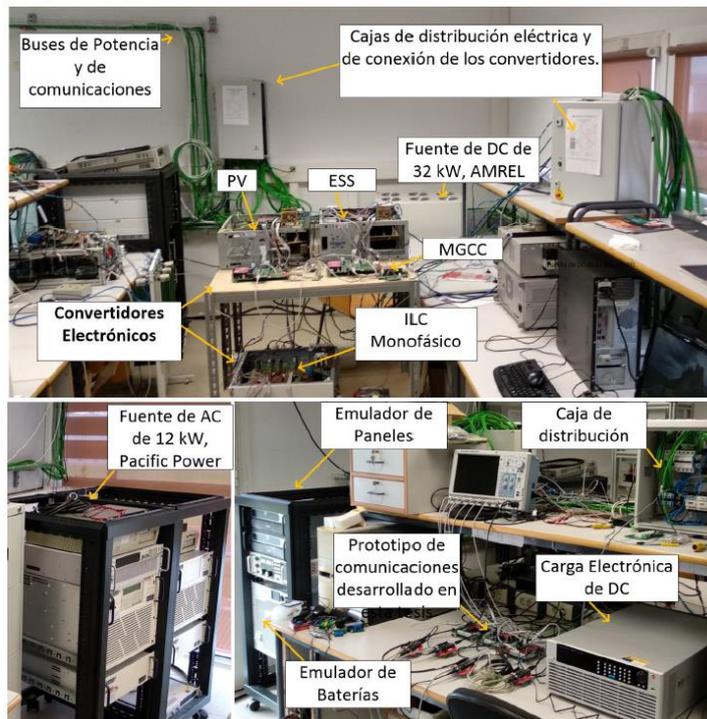


Ilustración 48 Microrred experimental del Grupo de Sistemas [30]  
 Electrónicos Industriales del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPV.

La microrred está compuesta por seis nodos de conexión, cada uno de ellos con un recurso energético distribuido (RED) conectado. A continuación, se describe los componentes de la microrred y el equipo de laboratorio físico que se ha utilizado para emularlo:

- Nodo 1: generador fotovoltaico emulado por una fuente programable de DC de 32 KW (AMREL SPS 800-12 DO13).
- Nodo 2: carga crítica emulado por una carga electrónica de DC de 5KW. (Chroma 63205A-1200-200).
- Nodo 3: almacenamiento de energía emulado por una fuente DC/DC bidireccional de 20 KW (Regatron TC.GSS.20.600.400.S.HMI).
- Nodo 4: ILC, inversor trifásico de 10 KVA
- Nodo 5: punto de conexión común (PPC-Point Common Couple) emulado por una fuente AC de 12 KW de tipo monofásica/trifásica (Pacific, 360 AMX).
- Nodo 6: carga no crítica. Se trata de una carga resistiva 750 W.

A continuación, se muestra una imagen del esquema eléctrico de la microrred AC/DC híbrida implementada, distinguiendo los seis nodos mencionados.

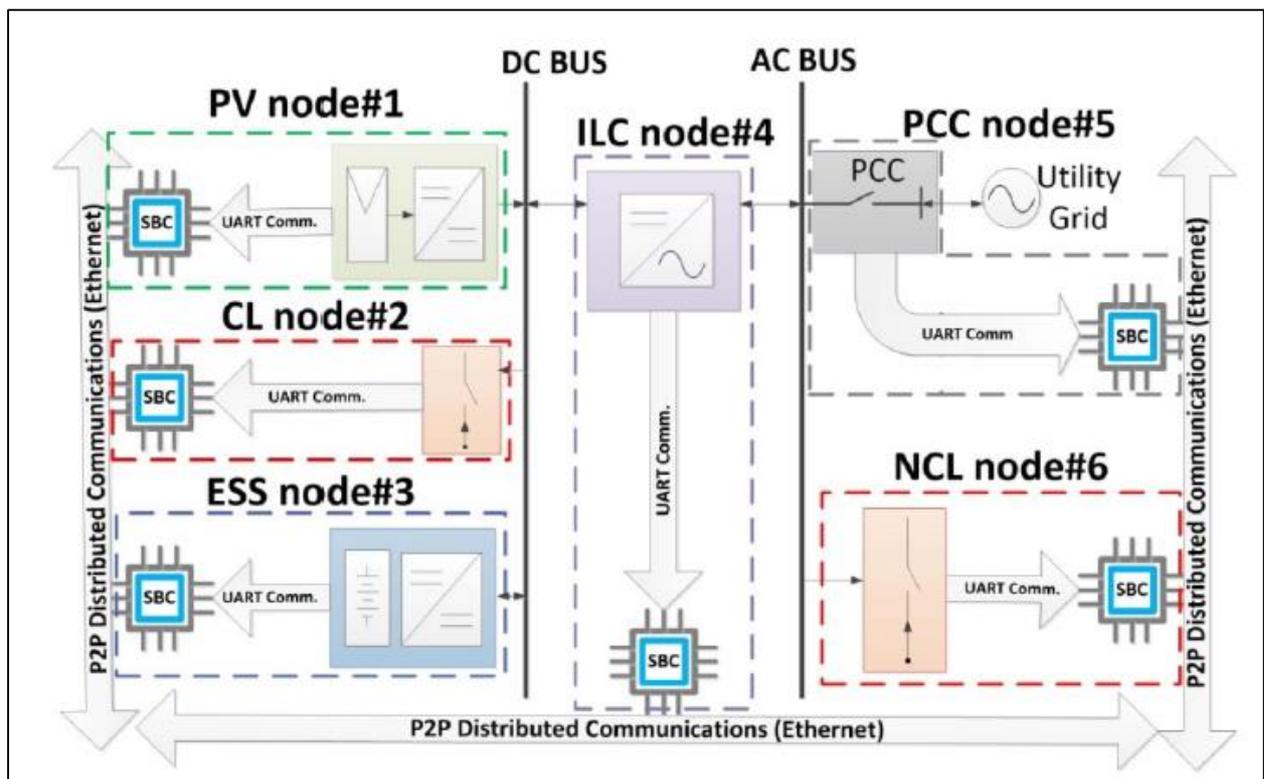


Ilustración 49 Esquemático de la microrred híbrida con seis nodos y sus interfaces de comunicación [30]

La microrred se basa en un bus de DC y un bus de AC, este último conectado al punto de conexión común de la red pública de distribución mediante un interruptor estático. La interconexión entre los buses de DC y AC es realizada por un inversor de interconexión (Interlinked Converter, ILC) monofásico de 10 kW con topología en puente completo, lo que permite un flujo de potencia bidireccional. En el modo conectado a red, el ILC funciona como una fuente de corriente que inyecta potencia al bus de AC de manera sincronizada y regula la tensión en el bus de DC. [30], [65]

### 3.4 Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa

El objetivo principal del proyecto i-Sare consiste en desplegar una microrred experimental a modo de demostrador, que sirva como plataforma de desarrollo de nuevos productos, equipos, sistemas y procedimientos de operación y mantenimiento a las empresas participantes en este proyecto. La microrred i-SARE en una primera fase funcionó en modo isla, y posteriormente en la segunda fase se conectó al edificio para testar las interacciones a todos los niveles. Se utiliza y se puede utilizar en proyectos de investigación propios del consorcio, pero también como plataforma de ensayos y como laboratorio de ensayos para empresas y centros tecnológicos en general.

La microrred i-Sare está ubicada en el edificio pionero Enertic, un edificio diseñado con criterios bioclimáticos de alta eficiencia y de aporte de energías renovables, próximo a 0 emisiones de CO<sub>2</sub> y equipado con un sistema de monitorización y control inteligente. Este edificio es un Centro de Innovación y Empresas desarrollado con el objetivo de dar soporte al Clúster de Energías Renovables, Eficiencia Energética y Smart Energy de San Sebastián, promovido por Fomento de San Sebastián y el Ayuntamiento de San Sebastián.

El Centro está ubicado en el Polígono Industrial 27 de San Sebastián, el mayor polígono industrial de la ciudad. Enertic pretende ser un proyecto tractor y transformador en dicho ámbito y en todo el distrito Urumea Riverside de la ciudad.



Ilustración 50 Edificio Enertic en el Polígono Industrial 27 de San Sebastián [32]

El proyecto i-Sare está liderado por la Diputación Foral de Gipuzkoa, en colaboración con el Cluster de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones del País Vasco (GAIA-Cluster TEIC), IK4 Research Alliance, Jema Energy, Cegasa Internacional, Electro TAZ, Ingesea, Oasa Transformadores, IK4-Cidetec e IK4-Tekniker, y cuenta con Ceit-IK4, Fomento de San Sebastián e Iberdrola, como socios colaboradores. Para su puesta en marcha se han invertido 7 millones de euros cofinanciados por la Diputación Foral de Gipuzkoa, el Programa Operativo FEDER del País Vasco (2007-2013) y las empresas y centros tecnológicos que participan en el proyecto.

La microrred i-Sare tiene una potencia de generación instalada de 400 kW pico está constituida por sistemas de almacenaje, cargas y generadores que pueden operar conectados a la red de distribución eléctrica o de manera aislada (modo isla). El objetivo es emplear de manera integrada diferentes tecnologías de fuentes de producción de energía renovables junto con fuentes de generación convencionales, estableciendo sistemas de gestión inteligentes y almacenamiento de la energía eléctrica del conjunto.

A continuación, se presentan los elementos que componen la microrred:

- Elementos de generación:
  - Energía eólica: dos aerogeneradores, uno de eje horizontal de potencia 10 kW y otro de eje vertical de potencia 10 kW.
  - Energía fotovoltaica: 2 unidades de 20 kW con diferentes tipos de células solares, de forma que permitan realizar una comparación del rendimiento obtenido con cada una de las tecnologías.
  - Grupo de cogeneración: micro turbina de gas de 70 kW.
  - Generador diésel: suministrando electricidad en aquellos lugares donde no hay abastecimiento eléctrico.

- Pila de combustible: produce electricidad por vías electroquímicas a partir de un combustible generalmente gaseoso e hidrogenado.
- Almacenamiento:
  - Baterías.
  - Volantes de inercia: almacenan y gestionan la energía, en forma de energía cinética.
  - Supercondensadores.
- Distribución
  - Transformadores.
  - Protecciones media y baja tensión.
  - Cargas: emuladores de cargas residenciales, industriales y domésticas.
  - Punto de conexión a vehículo eléctrico.

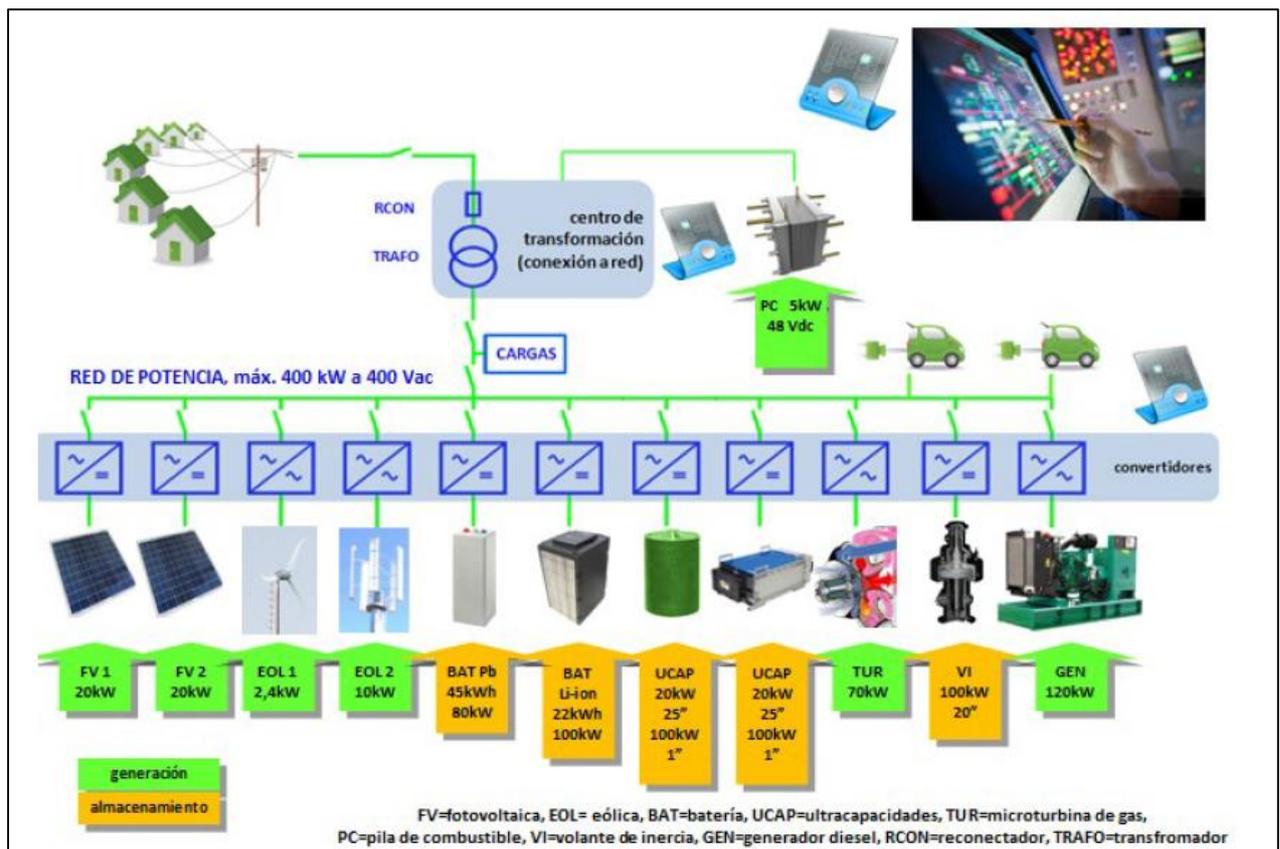


Ilustración 51 Esquema de la microrred i-Sare [31]

La operativa de la microrred es la siguiente:

- La microrred trabaja actualmente en modo isla (aislada del edificio). Al no haber unos consumos reales, se provocan los mismos conectando/desconectando distintos bloques de cargas.
- Se deberá gestionar la potencia generada en cada momento de manera que el suministro de energía a las cargas asignadas esté asegurado en todo momento.
- La potencia consumida por las cargas será en todo lo posible proveniente de fuentes renovables.
- Si en un futuro la microrred se conecta a una línea de media tensión (Iberdrola) será capaz de enviar los excedentes energéticos producidos a la red eléctrica, de forma que la microrred no funcione en modo aislado de la red de distribución sino como parte activa de la misma.

Para una correcta gestión de la microrred, que le permita minimizar sus costes de operación a la vez que respete los rangos de seguridad y las restricciones impuestas por el sistema, se ha desarrollado el Despacho Económico. El Despacho Económico es un sistema encargado de establecer un punto óptimo de operación. Para esto es

preciso conocer el estado de la red, labor que se realiza mediante el Estimador de Estado de la microrred.

En la gestión de la microrred i-Sare se utiliza un control distribuido jerárquico de cuatro niveles: el primario, el secundario, el terciario y el cuaternario.

El control primario se implementa en los controles locales de cada inversor conectado a la micro red y es responsable del reparto de la potencia activa y la reactiva. Los convertidores de potencia tienen que ajustar el flujo de potencia activa y reactiva que puede lograrse a través del control de frecuencia y tensión (droop control), es decir, pueden emular a los generadores síncronos en paralelo de un sistema de generación tradicional y automáticamente compartir la demanda total de carga. Por lo tanto, los consumidores son capaces de gestionar su demanda de forma activa.

Los otros tres controles (control secundario, terciario y cuaternario) se realizan en la unidad de control central. El control secundario re-estabiliza las desviaciones en tensión y frecuencia y se encarga de la sincronización con la red principal. El control terciario realiza la gestión de la energía en toda la micro red y el control cuaternario se encarga de realizar el reparto de la demanda real entre generadores, almacenadores y conexión con el proveedor.

El flujo de la información entre las distintas unidades se realiza mediante una red interna de comunicaciones basada en EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System), y un conjunto subredes que interconectan los equipos de generación y consumos con los equipos de comunicación IOC (Input Output Controller) de la red de comunicaciones interna. Además, se dispone de un sistema de registro y monitorización de variables y alarmas que permitan controlar el sistema en todo momento, así como registrar cualquier incidencia que pueda producirse.

EPICS es un conjunto de herramientas de código abierto, desarrolladas para crear sistemas de control distribuidos con requerimientos de tiempo real basado en un esquema cliente/servidor especialmente pensado para utilizarse en instalaciones como aceleradores de partículas, telescopios e instrumentos similares. Este software ha sido desarrollado para permitir integrar en un mismo sistema multitud de dispositivos, cada uno de ellos responsable de uno o varios elementos de control, y poder acceder a todas las variables presentes en el sistema de manera rápida y precisa, ya sea el estado de un instrumento, la medida de determinado sensor, o la posición de un motor. En la jerga EPICS las variables se denominan Process Variable (PV). Para ello implementa una arquitectura cliente/servidor que posibilita esta comunicación siempre y cuando todos los elementos formen parte de la misma red local construida sobre Ethernet implementando el protocolo TCP/IP para el intercambio de datos y UDT/IP para la administración de la conexión. El elemento esencial de esta colaboración entre componentes es el Channel Access (CA), un protocolo que proporciona transparencia a la comunicación entre clientes que requieren información o exigen acciones a realizar, y servidores que procesan las peticiones, los denominados I/O servers. [31],[32],[33],[34],[65].

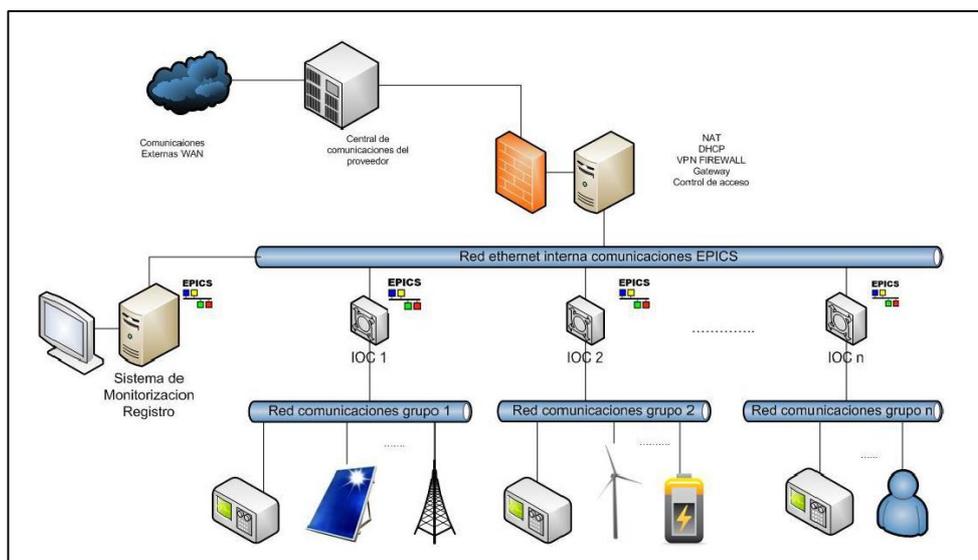


Ilustración 52 Infraestructura de la red de comunicación y de control de la microrred [31]

### 3.5 Microrred Atenea (CENER)

La instalación está ubicada en el recinto del Laboratorio de Ensayos de Aerogeneradores (LEA) de CENER (Centro Nacional de Energías Renovables), en el polígono industrial Rocafort de Sangüesa (Navarra) y ha sido desarrollada por el Departamento de Integración en Red de Energías Renovables.

Se trata de una microrred orientada a la aplicación industrial concebida en principio para dar servicio a parte de las cargas eléctricas de las propias instalaciones del LEA así como a parte del alumbrado público del polígono industrial. Su arquitectura es tipo AC; es decir, todos los elementos se conectan a un mismo bus AC para llevar a cabo el intercambio de energía entre ellos. Este bus AC se conecta en un único punto con la red eléctrica, lo que permite la interacción con la misma. Dentro de la microrred se realiza una distribución de energía eléctrica en AC.

Seguidamente se muestra un esquema de la microrred:

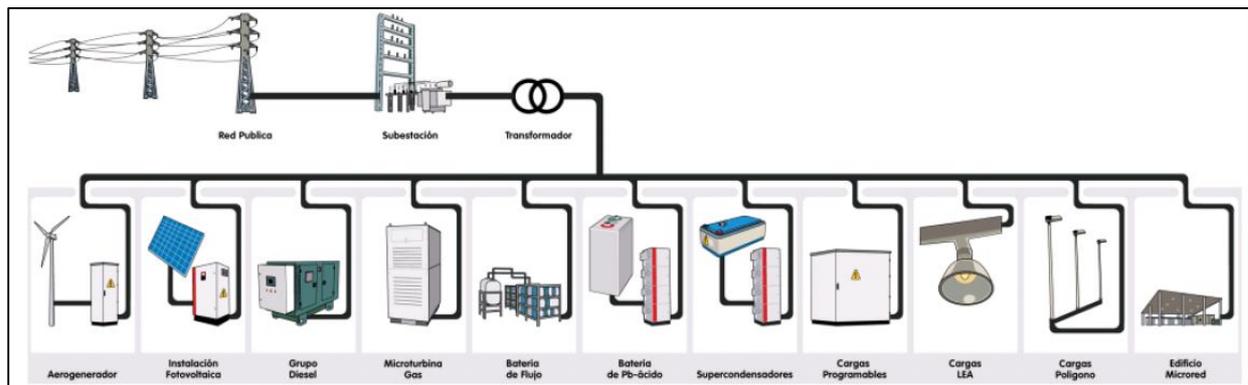


Ilustración 53 Esquema de la microrred Atenea del CENER [35]

Los equipos por los que está conformado la microrred son:

- Equipos de generación:
  - Instalación fotovoltaica de 25 kWp.
  - Aerogenerador de potencia nominal de 20 kW tipo full-converter.
  - Grupo electrógeno diesel de potencia nominal 55 kVA.
  - Microturbina de gas de 30 kW.



G- Turbina eólica 20 kW full-converter



G- Instalación Fotovoltaica 25 kWp



G- Generador Diesel 55 kVA y Microturbina de Gas 30 kW (además del aprovechamiento térmico)

Ilustración 54 Equipos de generación de la Microrred Atenea Del CENER [35]

- Equipos de almacenamiento:
  - Banco de baterías tecnología plomo ácido de gel, capaces de suministrar 50 KW de forma ininterrumpida durante 2 horas.
  - Batería de Flujo de Vanadio con capacidad para proporcionar 50 KW durante aproximadamente 4 horas.
  - Baterías de Ión-Litio, capaces de suministrar 50 KW durante media hora.

- Supercondensadores de 30 KW.



S- Baterías de Plomo-Ácido, 50 kW x 2 horas



S- Batería de flujo, 50 kW x 4 horas



S- Baterías de Ion-Litio, 50 kW x 1/2 hora



S- Supercondensadores 30 kW, 45 sg

Ilustración 55 Equipos del almacenamiento de la microrred Atenea del CENER [35]

- Equipos de consumo:
  - Banco de cargas trifásica 120 KVA.
  - Luminaria del polígono industrial y oficinas (LEA).
  - Punto de suministro para vehículo eléctrico.



L- Cargas trifásicas 120 kVA



L- Luminaria del polígono industrial y oficinas - LEA -



L/S- Vehículo eléctrico

Ilustración 56 Equipos de consumo de la microrred Atenea del CENER [35]

La microrred de CENER dispone de un control supervisor íntegramente diseñado en CENER, además de que es controlada a través de un Sistema SCADA también diseñado íntegramente en CENER. El sistema de control de los equipos y el control supervisor se encuentran programados en un PLC industrial, con el objetivo de disponer de un sistema robusto y ampliamente utilizado en el entorno industrial.

Para el control de la microrred también se dispone de los siguientes equipos:

- Interruptor de control on/off para cada equipo.
- Control de la referencia P/Q por fase a suministrar o absorber por los sistemas de almacenamiento.
- Control de la referencia P/Q por fase a suministrar por el generador diésel.
- Control para la restricción de la potencia máxima generada por los sistemas renovables.

[35],[36],[65].

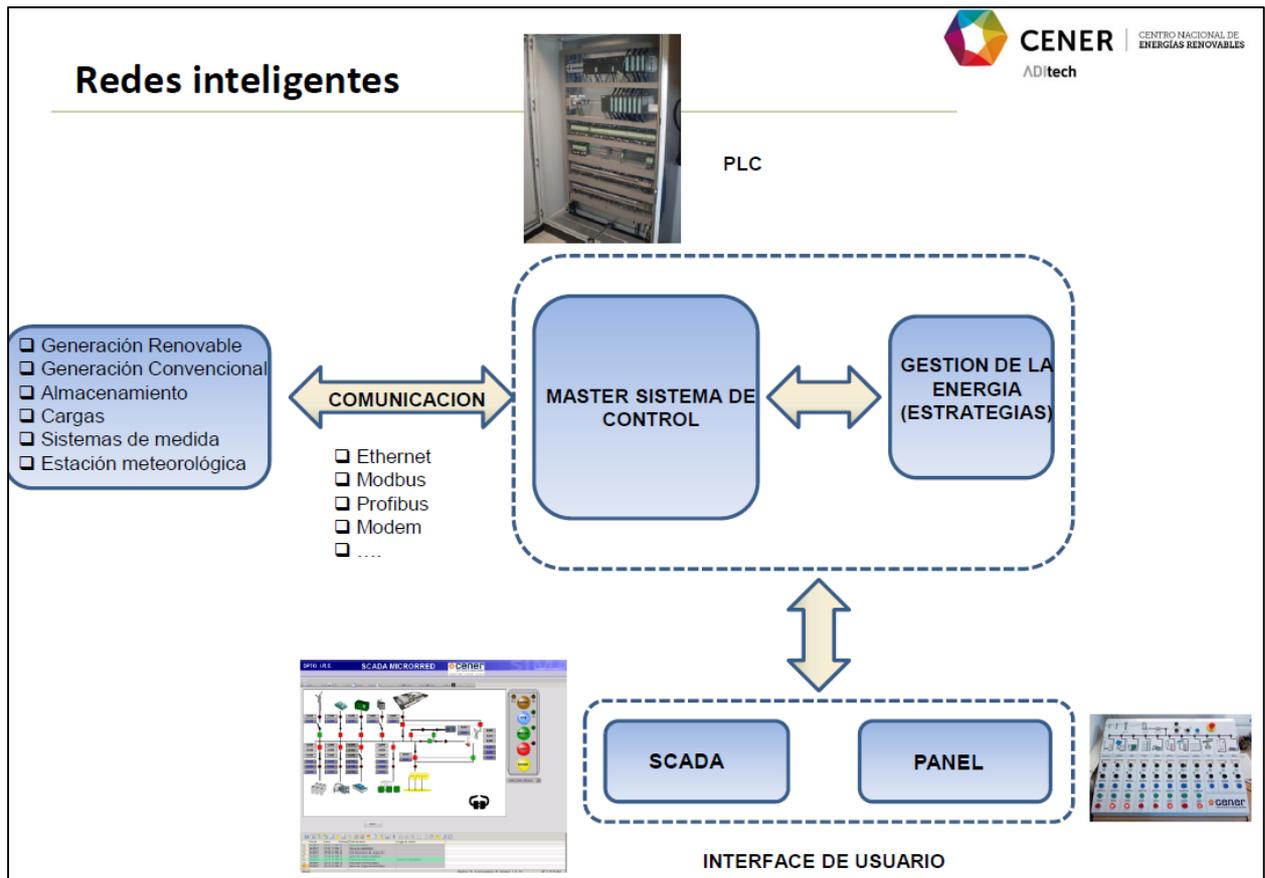


Ilustración 57 Esquema del control de la microrred Atenea del CENER [35]

### 3.6 Microrred del LIER (Laboratorio de Integración de Energías Renovables)

El Laboratorio de Integración de Energías Renovables (LIER) del CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) en Zaragoza tiene los principales componentes que forman una microrred, desde la generación hasta el consumo de la misma pasando por sistemas de almacenamiento de energía eléctrica y otros elementos que simulan la microrred. Esta instalación combina equipos comerciales (generadores, baterías electroquímicas, módulos fotovoltaicos...), con bancos de emulación (motor-generador de banco) y sistemas de electrónica de potencia para el hardware de simulación. Estos equipos son:

- Equipos de generación:
  - Generación asíncrona (jaula de ardilla).
  - Generación síncrona de imanes permanentes.
  - Generador eólico de 4 KW.
  - Placas fotovoltaicas de 10 KW.

- Equipos de almacenamiento:
  - Baterías de ión-litio.
  - Supercondensadores.
- Equipos de control de potencia.
- Equipos de consumo: conformado por carga resistivas, cargadores de vehículos eléctricos, motores asíncronos y síncronos y generador de huecos de tensión.

El laboratorio es modular y flexible. Esto permite realizar de forma sencilla cambios en la configuración de la microrred del laboratorio para ensayar diferentes topologías, evaluar la escalabilidad de las soluciones o plantear distintos escenarios. Además, la microrred puede funcionar tanto conectada a la red como en aislado, abriendo la puerta a un gran abanico de estudios.

Los objetivos del LIER sobre esta microrred son:

- Realizar pruebas y desarrollar políticas de control inteligente para microrredes.
- Estudio sobre la aplicación de las microrredes en distintos escenarios.
- Estudio y análisis de los sistemas que componen una microrred.
- Experimentación con las nuevas tecnologías (fotovoltaica, eólica, almacenamiento).
- Carga de vehículos eléctricos y gestión de cargas.
- Desarrollo de sistemas que ayuden a mejorar la estabilidad de la red y la calidad del suministro.

[37],[38],[65].

A continuación, se muestra un esquema de la microrred:

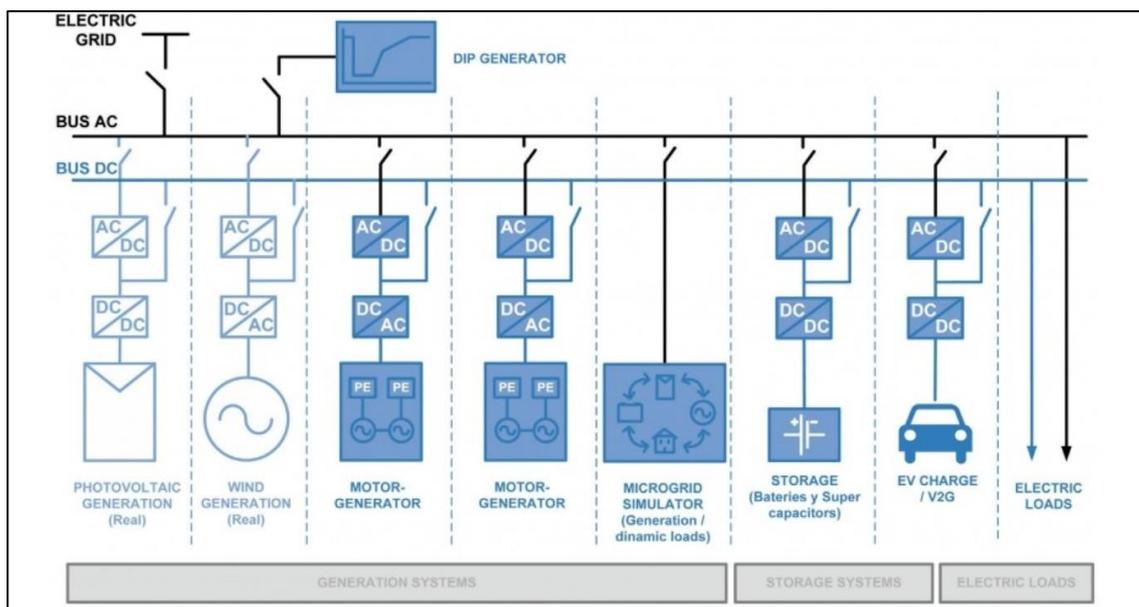


Ilustración 58 Esquema de la microrred del LIER [65]

### 3.7 Microrred del GIPSE (Laboratorio de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia) del CIRCE

Esta microrred se localiza en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia (GIPSE) en Zaragoza e integra generación tanto eólica (10 kW) como solar (5 kW). Esta generación suministra potencia a la microrred a través de equipos convertidores de potencia (full converter en el caso del aerogenerador e inversor en el caso de las placas solares).

La energía solar se obtiene a través de paneles solares mientras la energía eólica, al tratarse de una microrred de laboratorio, se simula a través de un motor acoplado mecánicamente al eje del generador. Este motor se alimenta

a través de un variador de frecuencia lo que permite simular los diferentes regímenes de viento.

El consumo de la microrred es variable y simulado a través de un motor que se alimenta a través de un variador de frecuencia. Este motor posee un freno acoplado al eje que permite variar el par de carga del mismo, variando de esta forma su potencia consumida (hasta 3 kW). Por temas de seguridad, se incluyen unas resistencias (hasta 2 KW) donde se pueda disipar parte de la potencia.

En cuanto a los equipos de almacenamiento, se dispone de una batería (1 KW) conectada a red a través de inversor. Con ella se trabaja en el balance de potencia (generación-consumo). Así por ejemplo en el caso de exceso de energía se puede proceder de dos maneras:

- Si el precio de venta de energía es suficientemente alto, se vende la energía.
- Si no lo es, esta potencia sobrante se emplea en la carga de la batería.

Con respecto al control de la microrred, se cuenta con un RTDS (Real Time Digital Simulator) capaz de simular cualquier red, con entradas/salidas digitales y analógicas que permiten interactuar con la simulación en tiempo real. La ventaja frente a cualquier microrred de laboratorio es que permite simular cualquier condición de red (nivel de armónicos, potencia de cortocircuito, caída de frecuencia en la red, etc.). Por todo, ello es el sistema ideal para el desarrollo de algoritmos de control o sistemas de protección de la microrred.



Ilustración 59 Fotografía de los equipos que conforman el RTDS de la microrred del GIPSE. [65]

Entre los planes futuros de la microrred se incluyen la instalación de otros sistemas de almacenamiento tales como el volante de inercia o los supercondensadores e incluir un centro de recarga de vehículos eléctricos (el cual aparece en el siguiente esquema ya incluido): [65]

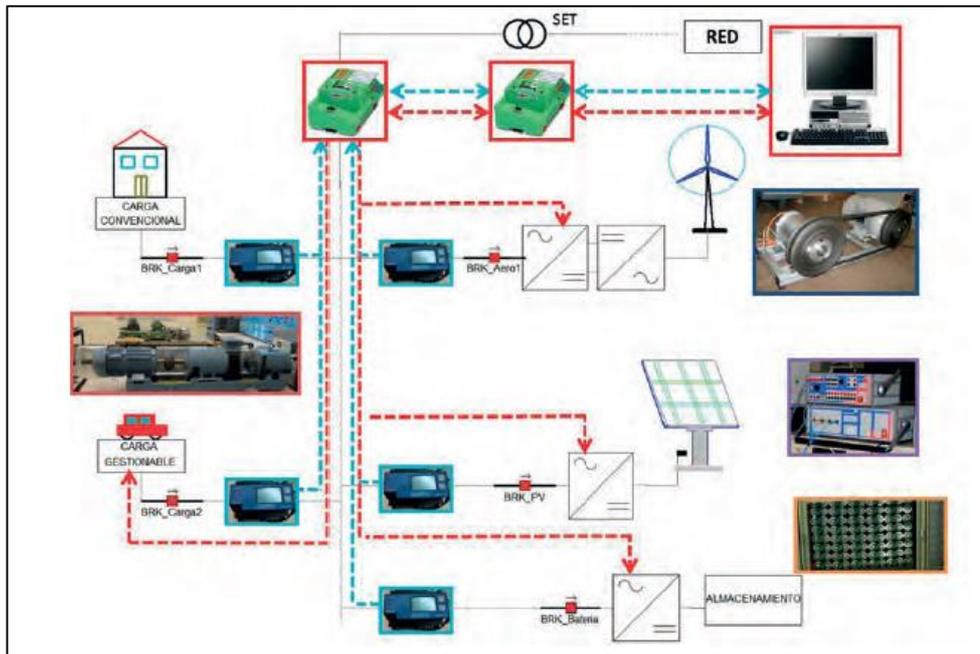


Ilustración 60 Esquema de la microrred del GIPSE, CIRCE [65]

### 3.8 Microrred del LINTER (Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes) de la Fundación Gas Natural Fenosa

LINTER o Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes se inauguró en Madrid en mayo de 2012 en uno de los centros neurálgicos de la red de Unión Fenosa Distribución y cercano al Centro de Operación de Red de la compañía. Desde su puesta en marcha, tecnólogos de todo el mundo han trabajado en este laboratorio, abierto a todos los agentes implicados en el progreso de las microrredes inteligentes.

El objetivo de esta microrred es facilitar un entorno donde se puedan desarrollar proyectos que permitan validar las tecnologías que se usan en las microrredes. En concreto su soporte está focalizado en:

- Interoperabilidad de contadores: pruebas de nuevos equipos, de actualizaciones de firmware, homologaciones, etc.
- Automatización de la red de media y baja tensión: simulación de varias topologías de red, creación de escenarios para investigar anomalías detectadas, seguimiento de rendimientos de equipos, etc.
- Integración de generación renovable y otros elementos en la red: gestión de la conexión de paneles solares y aerogeneradores, vehículos eléctricos, baterías, inversores...

El equipamiento del laboratorio, en constante evolución, comprende:

- Dos centros de transformación dedicados al laboratorio.
- Cuadros de conmutación y protección de la instalación eléctrica que permiten implementar la topología que se vaya a utilizar en cada ensayo.
- Cableado apantallado eléctrico y de datos.
- Armarios de contadores de diferentes fabricantes y concentradores de datos.
- Generación distribuida. Esta generación está conformada por los siguientes equipos:
  - Fotovoltaica de paneles monocristalinos de 20 kW.
  - Fotovoltaica de paneles policristalinos de 20 kW.

- Fotovoltaica de paneles amorfo de 11 kW.
- Microaerogenerador de eje horizontal de 3,5 KW.
- Motor de combustión interna alimentado por gas natural (5,5 Kw).
- Entornos de pruebas de sistemas de información.
- Las tecnologías y servicios de comunicaciones de los que se puede disponer en la red de baja tensión.
- Postes de recarga del vehículo eléctrico y otros equipos de consumo (bombas de calor de las oficinas, alumbrado del aparcamiento, cargas domésticas, ect).

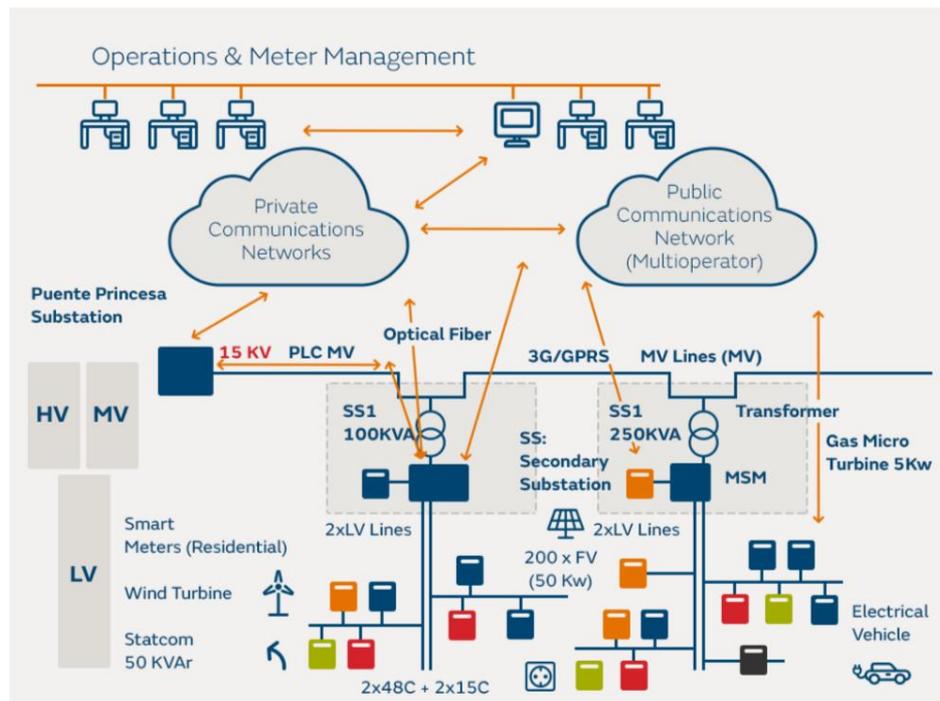


Ilustración 61 Esquema de la microrred del LINTER [39]

Las instalaciones se utilizan fundamentalmente para:

- Ensayar los desarrollos o prototipos derivados de los proyectos colaborativos en los que GNF-UFD (Gas Natural Fenosa-Unión Fenosa Distribución) participa.
- Ensayar productos antes de su aprobación para la instalación en la red (productos de distribución eléctrica) y/o para conocer los efectos sobre la red (productos instalados en el lado de cliente)
- En particular se realiza la prueba y certificación de las funcionalidades PRIME en equipos de fabricantes antes de su implantación en red.



Ilustración 62 Armario de contadores inteligentes de la microrred del LINTER [39]

Los planes futuros son la instalación de una planta de almacenamiento de energía en baterías y la implementación de un gestor único de control de toda la microrred agrupando las aplicaciones individuales de cada equipo. [39],[65].

### 3.9 Microrred del SEIL (Laboratorio de Integración de Energía Inteligente) del Instituto IMDEA Energía

El Laboratorio de Integración de Energía Inteligente (SEIL), donde se llevaron a cabo algunos experimentos de demostración, fue concebido por la Unidad de Sistemas Eléctricos del IMDEA. El laboratorio está diseñado para estudiar las redes eléctricas, incluyendo el control, las estrategias de gestión y la emulación de escenarios para la integración de las microrredes.

El SEIL está formado por un conjunto de convertidores electrónicos de potencia, bancos de carga resistivos, un sistema de baterías, paneles de distribución y monitoreo y sistemas de control. Esta plataforma permite el análisis, el desarrollo y la prueba de escenarios realistas para la integración de la energía en ambas redes de corriente continua y alterna. También permite testear el funcionamiento de la distribución de redes de energía, redes insulares y microrredes.

Los resultados obtenidos de este entorno de prueba son más fiables y más precisos que cualquier resultado que provenga de un modelo basado en una computadora simulación. Lo que distingue a este laboratorio es su flexibilidad en la aplicación de los algoritmos de control y el acceso simple a todos los datos de prueba y gestión de cualquier parte de la red. El SEIL es capaz de recrear un gran número de eventos diferentes que se producen en las redes de energía real y, por lo tanto, representa una herramienta útil cuando se trata de investigación, desarrollo e implementación de algoritmos de gestión de energía.

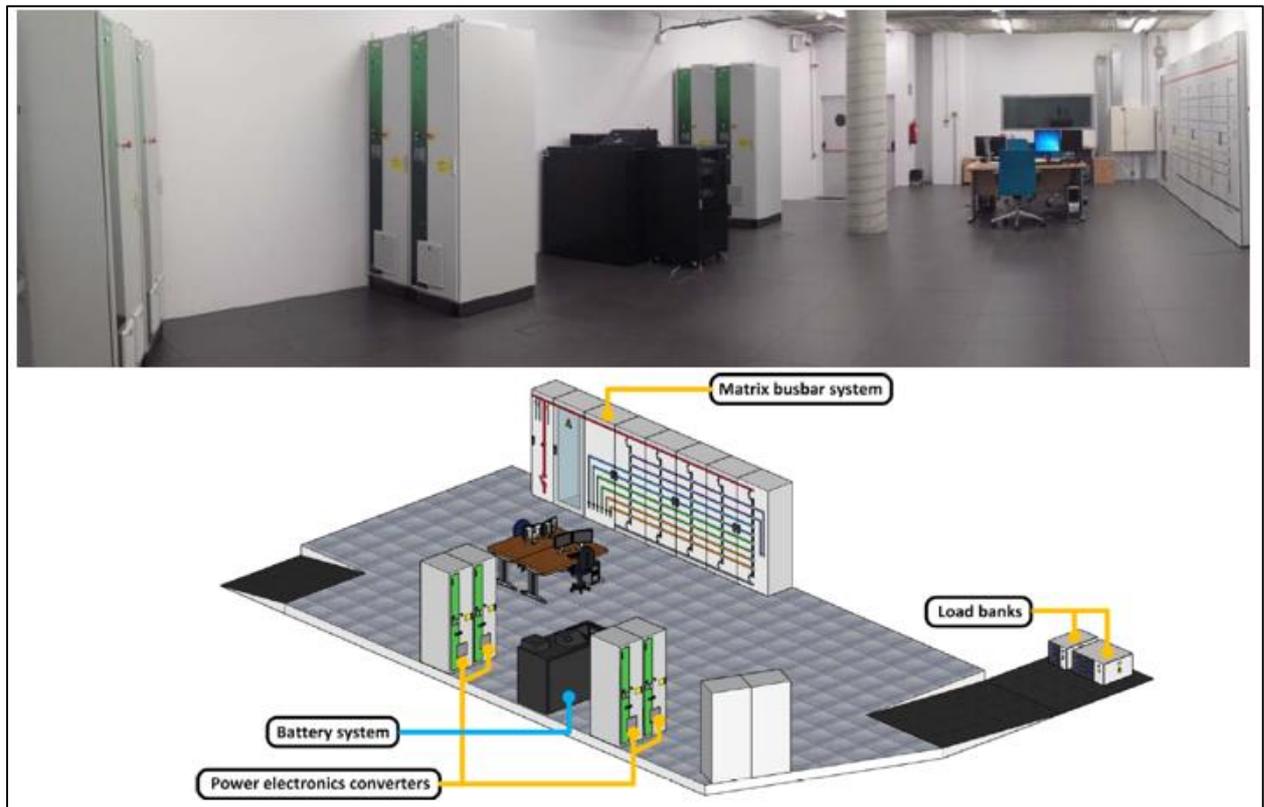


Ilustración 63 Lay Out del laboratorio del SEIL [41]

El laboratorio está compuesto por los siguientes equipos:

- Convertidores de potencia trifásicos (4 x 15 kVA).
- Convertidores de potencia trifásicos (2 x 75 kVA).
- Ordenadores industriales con sistemas operativos RT (4 unidades).
- Bancos de carga resistiva programable balanceados y desequilibrados (2 x 30 kW).
- Sistema de batería de Li-Ion con BMS (47,5 kWh).
- Cargador de batería bidireccional de 90 kW.
- Sistema de barras de matriz de CA trifásica configurable.
- Sistema de vigilancia y control independiente basado en tecnología cRIO de National Instruments.

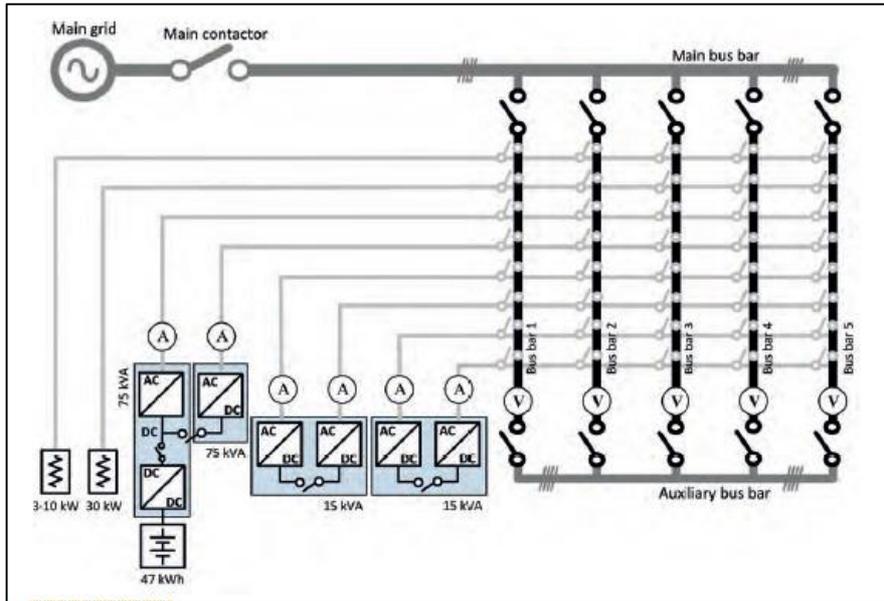


Ilustración 64 Esquema unifilar del laboratorio del SEIL [40]

Los algoritmos de control para los convertidores de energía se programan a través de Matlab-Simulink y herramientas de generación de código y luego son ejecutados en tiempo real en los ordenadores industriales. El intercambio de datos en tiempo real permite el acceso a todas las variables y parámetros de control durante la prueba. De esta manera se logra la flexibilidad deseada en la reproducción de las características dinámicas reales de cualquier fuente de energía, generador o carga.

Con respecto a el control de la microrred, existen dos niveles:

- El control de bajo nivel se centra en el control de cada convertidor de potencia y la emulación del modelo dinámico de recursos energéticos distribuidos, utilizando Matlab/Simulink y Triphase Toolbox para diseñar los algoritmos de control y emulación.
- El control de alto nivel cubre el control y la supervisión de las microrredes y realiza estrategias de envío de energía. Las tareas se implementan utilizando el sistema SCADA. NI LabVIEW se utiliza para la interfaz de usuario, la configuración del sistema y para los algoritmos de vigilancia y control.

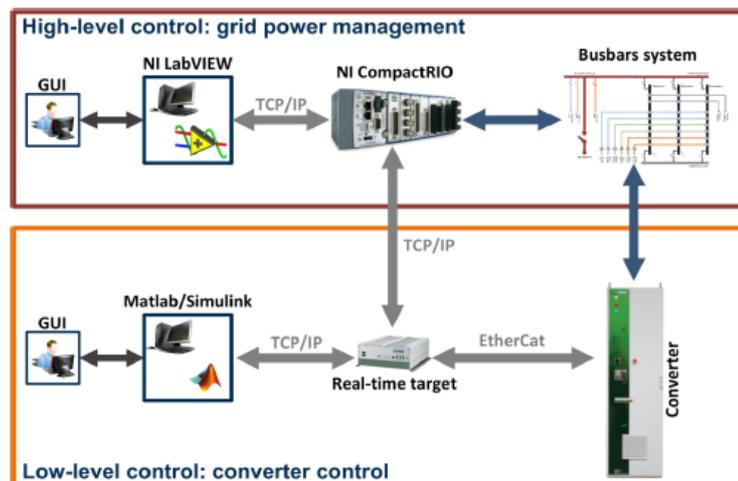


Ilustración 65 Esquema de los niveles de control del simulador de microrredes del SEIL [41]

Tal y como se ha comentado con anterioridad, este laboratorio se dedica a diseñar microrredes. Es por ello que se ha elegido un caso experimental realizado en el laboratorio como microrred representativa del mismo.

Este caso experimental consiste en una microrred conectada a la red eléctrica que tiene sus principales recursos,

cargas de energía y generadores, clasificados como elementos controlables y no controlables o fijas. Los generadores y las cargas controlables se emulan mediante el uso de los convertidores de electrónica de potencia. Los modelos se implementan en Simulink.

Los elementos conectados a la microrred son:

- Carga controlable de 12 kW implementada como carga activa en un convertidor back-to-back de 15 kVA.
- Generador diesel de 30 kW controlable implementado en un VSC (Voltage Source Converter) de 75 kVA.
- Generador diesel de 10 kW controlable implementado en un VSC de 15 kVA.
- Sistema de batería de 7,6 kWh controlable implementado en una batería de 47,5 kWh.
- Generador fotovoltaico de 15 kW no controlable implementado en un VSC de 15 kVA.
- Carga de 30 kW no controlable implementada con la carga balanceada de 30 kW.

Se supone que la potencia máxima suministrada por la red es de 30 kW. Las cargas no controlables o fijas corresponden a elementos típicos del hogar como la iluminación de la casa o los electrodomésticos de la cocina. Las cargas controlables representan aparatos como el aire acondicionado o la lavandería. [40],[41],[65].

A continuación, se muestra el esquema de la microrred experimental:

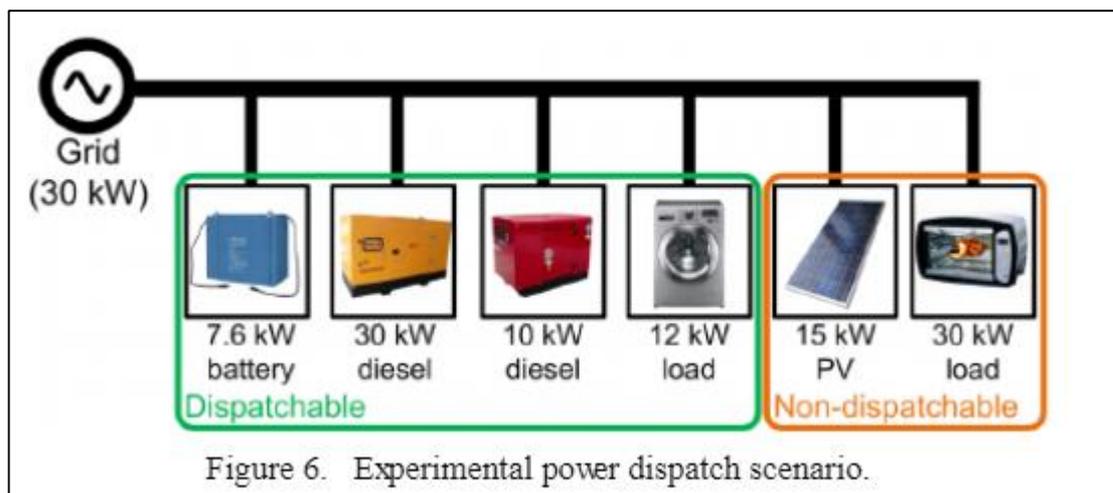


Ilustración 66 Esquema de la microrred experimental del SEIL [41]

### 3.10 Microrred Walqa de la Fundación Hidrógeno Aragón

El Parque Tecnológico Walqa es una iniciativa española dirigida por el Gobierno General de Aragón a través del Instituto de Desarrollo de Aragón y el Ayuntamiento de Huesca.

La microrred Walqa está formada por la infraestructura eléctrica ubicada en la Fundación Aragón del Hidrógeno y otras instalaciones en el Parque Tecnológico Walqa. Además de los consumos eléctricos de los edificios, dedicados a los servicios terciarios, hay una cierta generación de energías renovables (735 kW en total) mediante 3 aerogeneradores y 5 seguidores solares (FV). También hay algo de almacenamiento de energía mediante baterías y producción de hidrógeno (un electrolizador de 250 kW). Seguidamente, se hará una descripción más detallada de estos equipos.

El pequeño parque eólico perteneciente a la Fundación del hidrógeno está compuesto de tres turbinas eólicas con una potencia combinada de 635 kW. Se trata de máquinas de “repowering” ya que cuando se realizó la instalación (2007) en el mercado de primer uso era muy difícil encontrar aerogeneradores de tan pequeña potencia. Las máquinas de “repowering” consisten en aerogeneradores que ya han estado instaladas y en operación en otros parques eólicos con unas condiciones de viento muy buenas, esas máquinas ya han sido

amortizadas con creces y se decide sustituirlas por aerogeneradores de última tecnología para repotenciar su instalación. Los aerogeneradores reemplazados entran en un mercado de máquinas denominado de “repowering” y representan una opción económica para ubicaciones con un recurso de viento no muy elevado como puede ser un parque tecnológico. En concreto los molinos instalados son:

- Turbina Vestas V29 (225 kW).
- Turbina Enercon 33 (330 kW).
- Turbina Lagerway L80 (80 kW).



Ilustración 67 Turbinas eólicas de la microrred Walqa de la FHA[42]

Se eligieron tres turbinas de muy diferentes características técnicas, como se puede observar en la imagen anterior. Esto es debido a que el hecho disponer de diferentes tipos de generadores y sistemas permite una mayor flexibilidad en los ensayos.

Por otro lado, la instalación fotovoltaica es de 100 kW y comprende a su vez diferentes tecnologías de panel fotovoltaico (monocristalinos, policristalinos y unión heterogénea), diferentes tecnologías de captación solar con instalación fija y por seguimiento a dos ejes. El seguimiento a dos ejes se realiza con tecnología por calendario o astronómica, que implica que un sistema de control sitúa el seguidor solar en la posición adecuada para aprovechar la máxima radiación solar según la fecha del año y hora del día, o bien mediante un seguimiento por punto de máxima luminosidad, donde unos sensores detectan la radiación solar y sitúan el seguidor en cada momento en la posición donde hay mayor radiación solar. Este último sistema aporta ventajas en días nublados pues optimiza la generación eléctrica a partir de radiación difusa al posicionarse en el punto con mayor recepción de radiación. Las características técnicas de la instalación son:

- Instalación de placa fija instalada en las marquesinas del parking (60 kW).
- Seguidor solar ADES (20 kW).
- Seguidores solares Deguer (5 kW).
- Seguidor solar MECASOLAR (10 kW).



Ilustración 68 A la izquierda, instalación de placa fija instalada en las marquesinas del parking. A la derecha, Seguidores solares en el parking de FHA.[42]

Con respecto a al sistema de generación de hidrógeno de FHA, está basado en un electrolizador alcalino de 10 Nm<sup>3</sup>/h, trabajando a 33 bar y 85°C, con una tensión de entrada de 16V y una intensidad de entrada de 3.300 A. Este dispositivo funciona gracias al aporte de electricidad en corriente continua procedente de las energías renovables eólica y fotovoltaica del parque. Esta electricidad se utiliza para la electrolisis, que permite la separación del agua en hidrógeno y oxígeno. Para el uso final del hidrógeno producido, la Fundación Hidrógeno Aragón ha desarrollado una infraestructura de dispensación de hidrógeno para flotas de vehículos en sus instalaciones en el Parque Tecnológico Walqa. Una vez generado el hidrógeno, éste se comprime para ser dispensado a presiones de 200 bar y 350 bar a vehículos propulsados por hidrógeno.

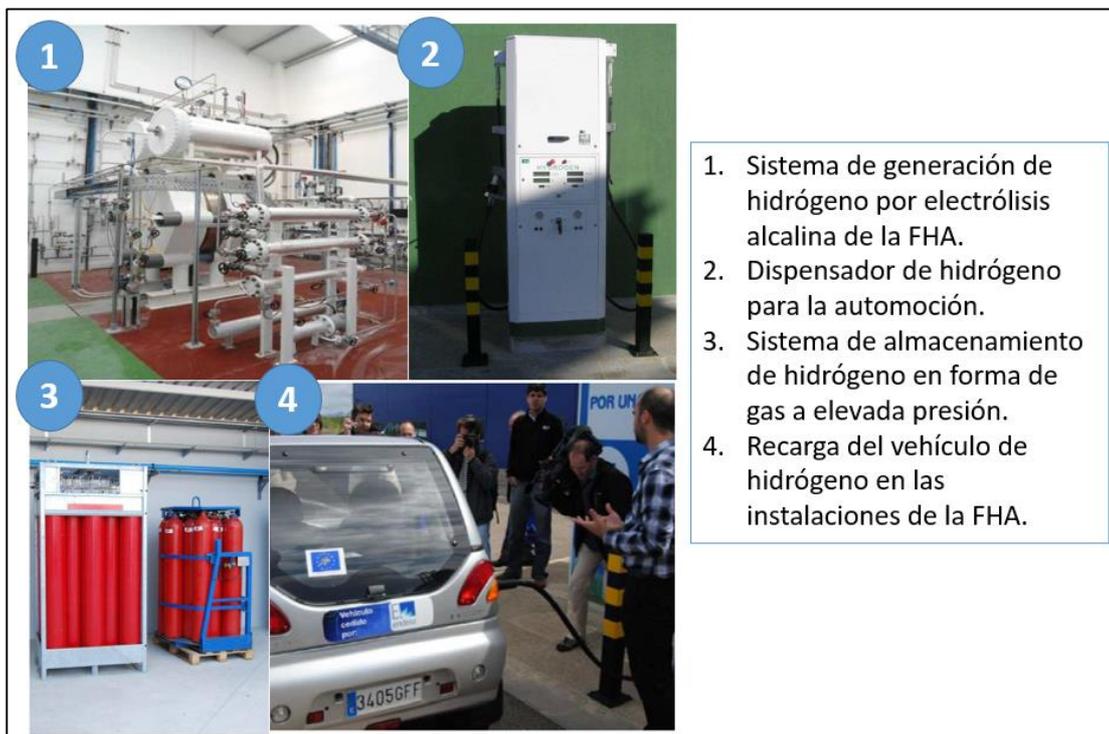


Ilustración 69 Instalaciones para la producción y consumo del hidrógeno producido de la FHA [42]

Por último, el proyecto dispone de un centro de interconexión con celdas motorizadas en media tensión automatizadas, en el cual por medio de un autómata y SCADA, se puede elegir en todo momento si vender la energía eléctrica generada como un generador más adscrito al régimen especial o si por el contrario se envía la energía a los talleres de la Fundación para generar hidrógeno por medio de electrolisis, ubicado en el laboratorio del edificio. A continuación, se muestra un diagrama general de la instalación: [42],[43],[44],[45],[65].

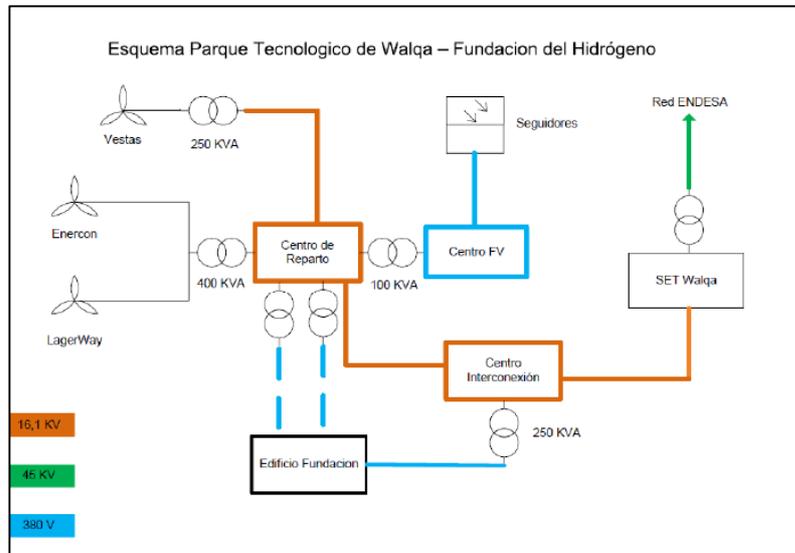


Ilustración 70 Esquema general de la microrred Walqa [45]

El siguiente esquema muestra lo mismo que el anterior de forma más detallada:

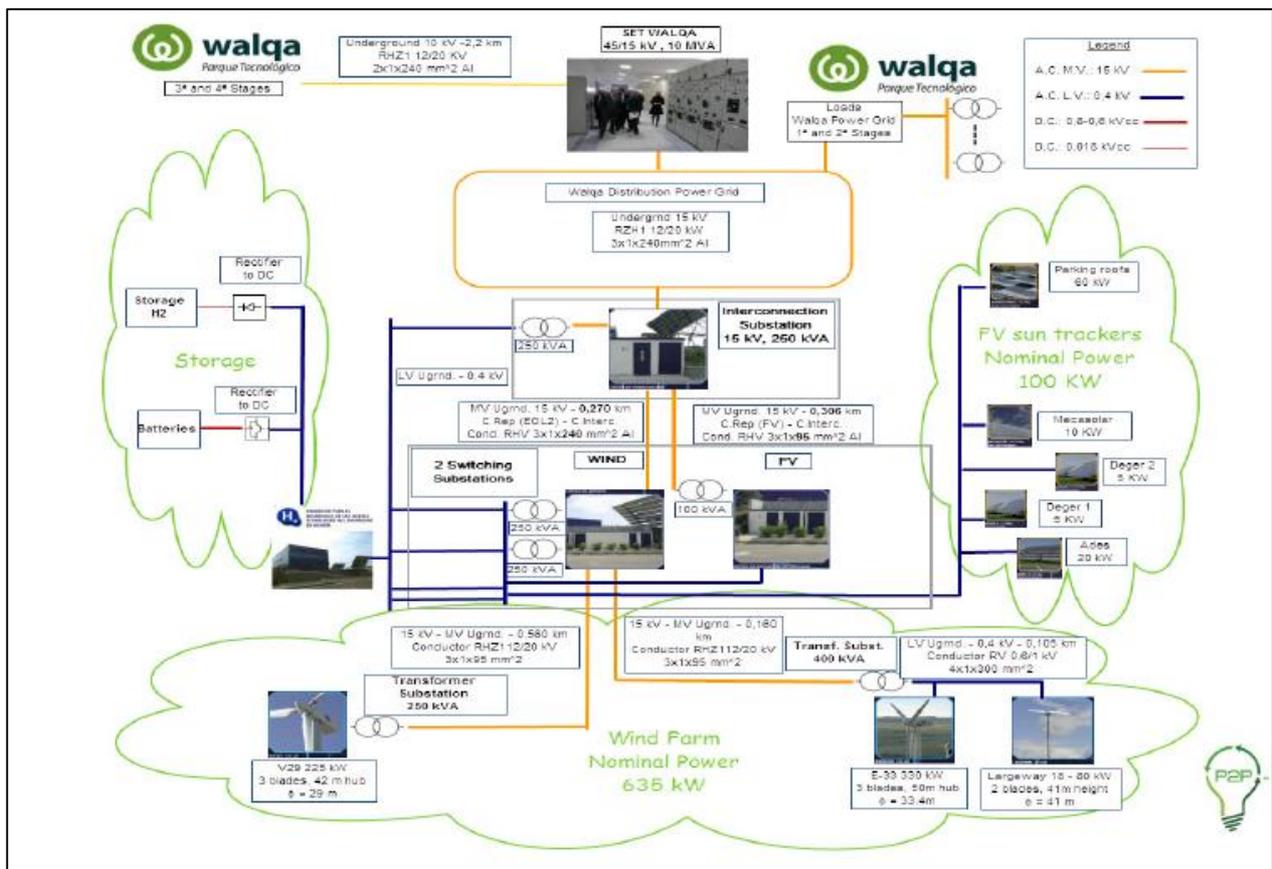


Ilustración 71 Esquema detallado de la microrred Walqa [45]

### 3.11 Microrred IREC (Instituto de Investigación en Energía de Cataluña)

El Departamento de Ingeniería Eléctrica del IREC (Instituto de Investigación en Energía de Cataluña) dispone de un laboratorio llamado IREC Energy SmartLab. Éste dispone de unas infraestructuras y equipos de testeo y emulación únicas; puesto que ofrece una microrred con una gran flexibilidad, modularidad y configurabilidad, para adaptarse a cualquier necesidad.

La microrred de IREC Energy SmartLab es una instalación de 200kVA en baja tensión compuesta por varias unidades configurables que incluye generación, almacenaje y consumo de distinta índole. Se trata de una plataforma a nivel de laboratorio, cuya finalidad es investigar los retos y desarrollar todas las tecnologías y herramientas relacionadas con las redes de distribución, integración de renovables, vehículo eléctrico, gestión y control tales como:

- Algoritmos de gestión de la demanda.
- Protocolos de comunicación avanzados (IEC 61850).
- Electrónica de potencia para la conexión de fuentes renovables.
- Tecnologías de baterías y supercondensadores.
- Soporte a la estabilidad de red ante ciertas perturbaciones y variaciones.
- Operación en isla.
- Gestión de la carga (y descarga) del vehículo eléctrico.
- Protecciones inteligentes y bidireccionales.
- Contadores inteligentes.
- Tecnologías de medida avanzadas: (PMUs o sincrofasores).
- Medios y tecnologías de comunicación ( IoT (Internet Of Things-agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red); PLC (Power Line Communications-dispositivos que permiten la conexión a internet mediante cables); radiofrecuencia...).

La microrred del IREC se compone, principalmente, de:

- Emulador de redes (200 kVA).
- Sistemas de almacenaje reales:
  - Batería de ión-litio ( 5 kVA).
  - Stack de supercondensadores (5 kVA).
  - Volante de inercia (4000 rpm, 5 kVA).
  - Batería de Segunda vida de un Vehículo Eléctrico (10kVA).
- Equipos emuladores (5 x 5kVA). Los equipos emuladores son convertidores estáticos que pueden ser configurados para reproducir el comportamiento eléctrico de distintos sistemas incluyendo generación renovable (como turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, etc.), consumos (viviendas u otras cargas) o sistemas de almacenaje, sin necesidad de disponer de formas de energía distintas a la eléctrica.
- Bancadas de generación motor-generator (3 x 5 kVA, 1 x 30 kVA); incluyen las principales tecnologías tales como SCIG, DFIG y PMSG, además de un generador de 9 fases; que pueden comportarse como emuladores de generación eólica o marina.

A continuación, se muestra el esquema de la microrred en cuestión:

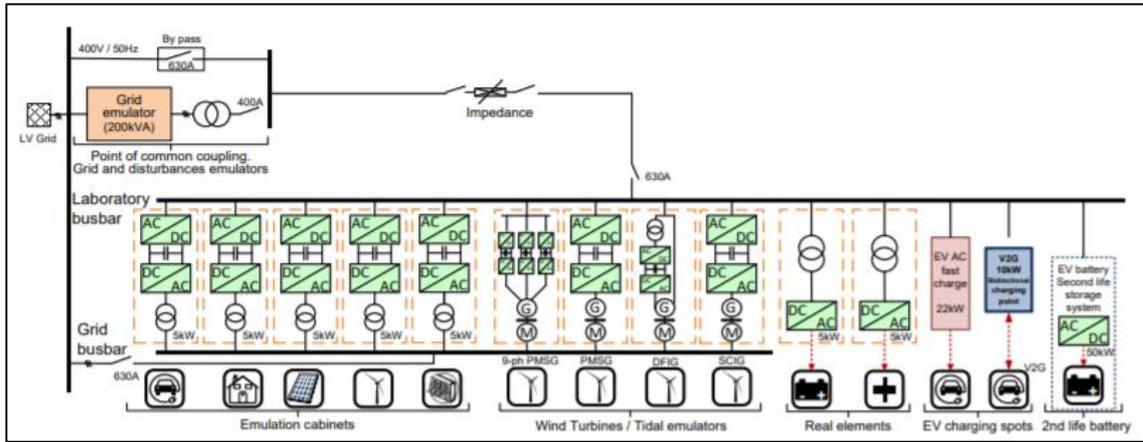


Ilustración 72 Esquema general de la microrred IREC Energy SmartLab [46]

La microrred del IREC Energy SmartLab dispone de un SCADA para facilitar su uso para gente externa, y éste se integra con MQTT (MQ Telemetry Transport o protocolo de comunicación machine to machine) para sistemas basados en IoT. Además, el laboratorio dispone de diversas funcionalidades para testeo tales como la validación de sistemas de Gestión Óptima (EMS), Agregadores y está preparado para admitir CiberAtaques de manera controlada.

A nivel de detalle, la microrred ha sido diseñada para permitir la aplicación de diversos sistemas de gestión incluyendo lecturas externas y estrategias de control (tales como centralizado/distribuido, control primario/secundario). Con ese fin se ha desarrollado una arquitectura basada en Local Controllers y Central Concentrator. Estos componentes son tarjetas de control con capacidad de comunicación. Cada equipo es gestionado por un Local Controller. Los Local Controllers reciben consignas a través del Central Concentrator el cual, a su vez, recibe consignas de otro agente responsable de la gestión de la microrred (e.g. EMS). La comunicación entre los sistemas locales y el concentrador es según el protocolo IEC 61850, como en las subestaciones reales, además los elementos se comunican entre ellos a través de CAN y/o MODBUS. [46]

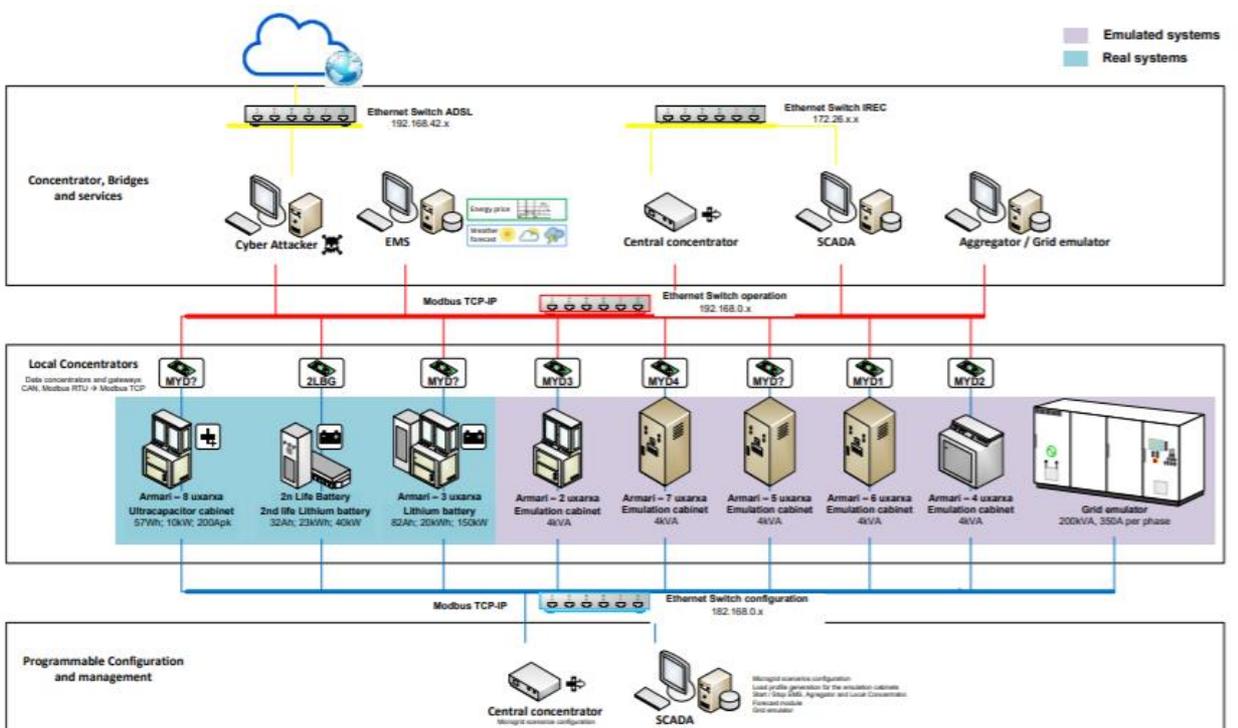


Ilustración 73 Arquitectura general de la gestión y de la comunicación de la microrred del IREC. [46]

### 3.12 Microrred del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial)

La microrred del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial se encuentra en Mazagón (Huelva) y forma parte del trabajo experimental del proyecto AGERAR.

El proyecto AGERAR (Almacenamiento y gestión de energías renovables en aplicaciones comerciales y residenciales) llegó a su fin en el año 2019, tras más de dos años de trabajo e investigación. El proyecto estaba enmarcado en el Programa de Cooperación Transfronteriza España-Portugal (POCTEP) de Interreg 2014-2020 y su principal objetivo se basó en promover la eficiencia energética y los criterios de sostenibilidad en microrredes comerciales y residenciales, incrementando el uso y mejorando la gestión de energías renovables gracias a los sistemas de almacenamiento de energía y a la utilización de tecnologías de información y comunicación. AGERAR fue liderado por la Universidad de Sevilla y participaron, además de la Agencia Andaluza de la Energía; los siguientes organismos: AREAL – Agencia Regional de Energía y medioambiente del Algarve; Fundación Instituto Tecnológico de Galicia; Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial; Universidad del Algarve; Universidad de Évora; INEGI – Instituto de Ciencia e Innovación en Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial.

La microrred piloto del INTA fue utilizada en el proyecto AGERAR como plataforma de demostración para sensores, sistemas de comunicación, sistemas de monitorización y de control. En esta microrred diferentes socios del proyecto (el Instituto Tecnológico de Galicia (ITG), el INTA y la Universidade do Algarve (UAIG)) han trabajado en la implantación de las soluciones de monitorización y comunicaciones. Se ha diseñado, desarrollado e implementado una red inalámbrica de sensores para monitorizar la instalación, adaptada a sus características y requisitos.

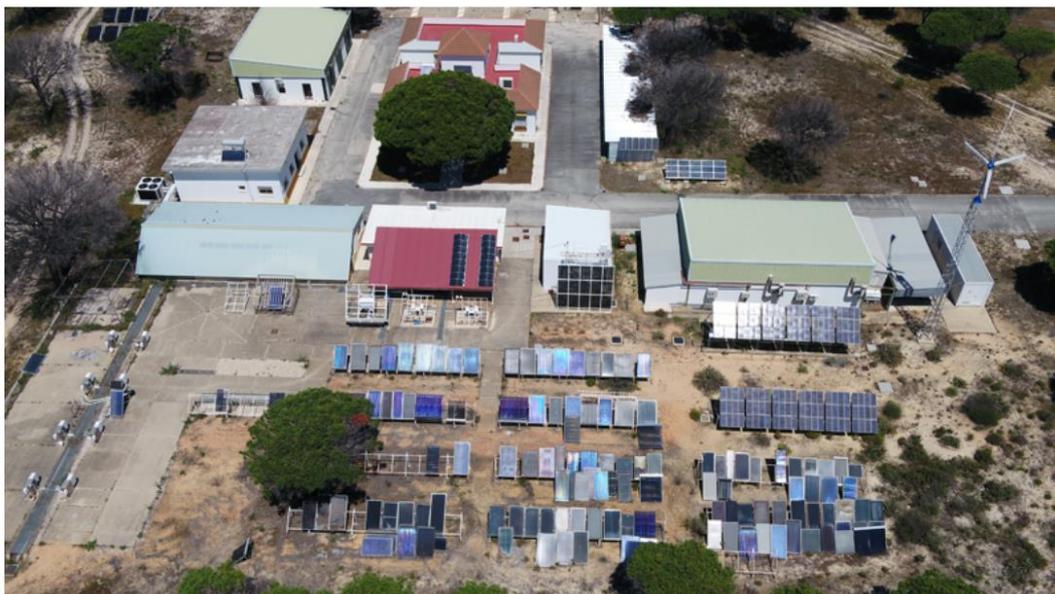


Ilustración 74 Instalaciones de la microrred implantada en las instalaciones del INTA, en Mazagón (Huelva) [49]

Esta microrred contiene los siguientes elementos:

- Tecnologías electroquímicas para el almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable (baterías Ión-Litio (43 kWh) y baterías de Plomo-Ácido (36 kWh)).
- Sistema híbrido que integra sistemas de generación eléctrica, sistemas de almacenamiento y diferentes cargas, en AC y DC, conectados mediante un bus interno de 408 VDC, así como conexión a red de 230 VAC.
- Los generadores en DC corresponden a varios campos fotovoltaicos (total 12,5 kW), a un aerogenerador (5 kW), y pilas de combustible (4,2 kW).
- El uso de hidrógeno como vector energético, incluyendo su producción mediante electrólisis alcalina (5 kW), almacenamiento en baja presión, hidruros metálicos y alta presión, y consumo a través de pilas de combustible.

- En cuanto a la demanda, se contempla la interconexión e inyección desde el bus de DC a red mediante inversores monofásicos, así como una carga programable en corriente continua.

Como se ha comentado anteriormente, todo el sistema está monitorizado con sensores de tensión y corriente, con el objetivo de plantear distintas estrategias de gestión de la energía en base a valores empíricos medidos en tiempo real.

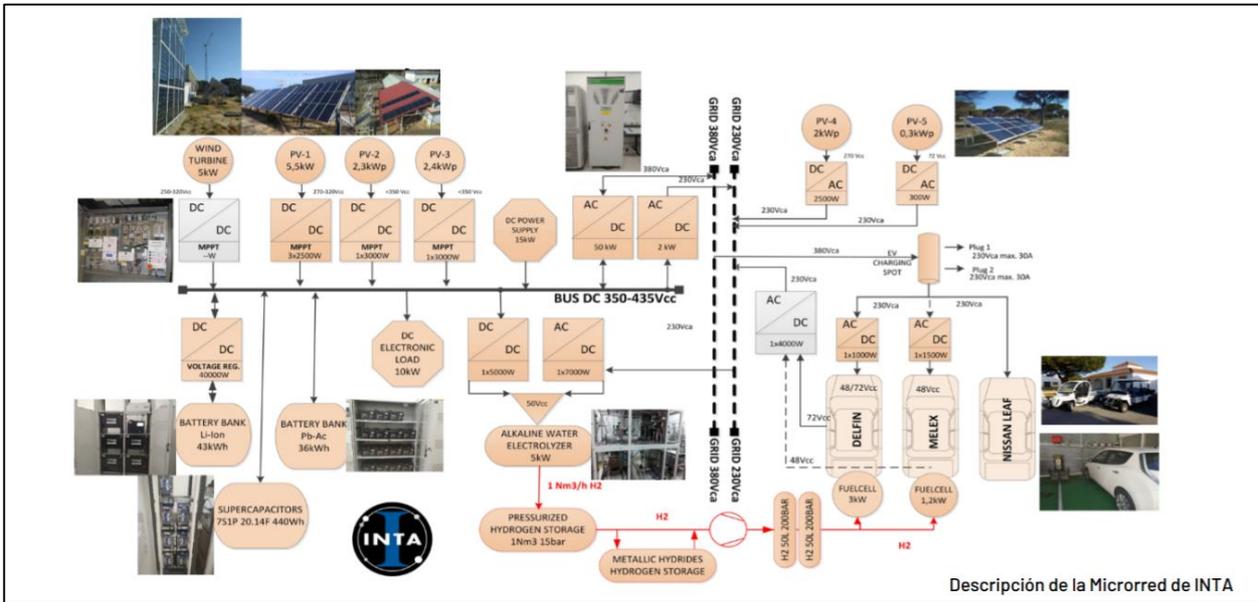


Ilustración 75 Esquema de la microrred del INTA [51]

En el marco del proyecto AGERAR se ha diseñado, desarrollado e implementado una red inalámbrica de sensores para monitorizar la instalación, adaptada a sus características y requisitos. La red de sensores inalámbricos comprende varios sensores LoRa que miden y recopilan información de los circuitos de CC y CA de la micro red INTA. Estos dispositivos luego comunican los datos recuperados a través de una arquitectura LoRaWAN compuesta por un Gateway, un Servidor de red y un Servidor de aplicaciones. Los datos de estos sensores también se recopilan en un concentrador (Gateway) con diferentes interfaces de comunicación (inalámbricas y cableadas) y con la posibilidad de integrar diferentes fabricantes y parámetros. El dispositivo de comunicaciones gestiona de manera efectiva los datos de diferentes nodos sensores pudiendo enviar información en tiempo real a las plataformas IoT, además de tener capacidades de almacenamiento en el sitio. El trabajo realizado demuestra cómo se puede optimizar la gestión de las microrredes de energías renovables a través del despliegue y la implementación de redes de monitorización inalámbricas de baja potencia y coste reducido, basadas en tecnología LoRaWAN, integradas en una plataforma IoT con una alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos.

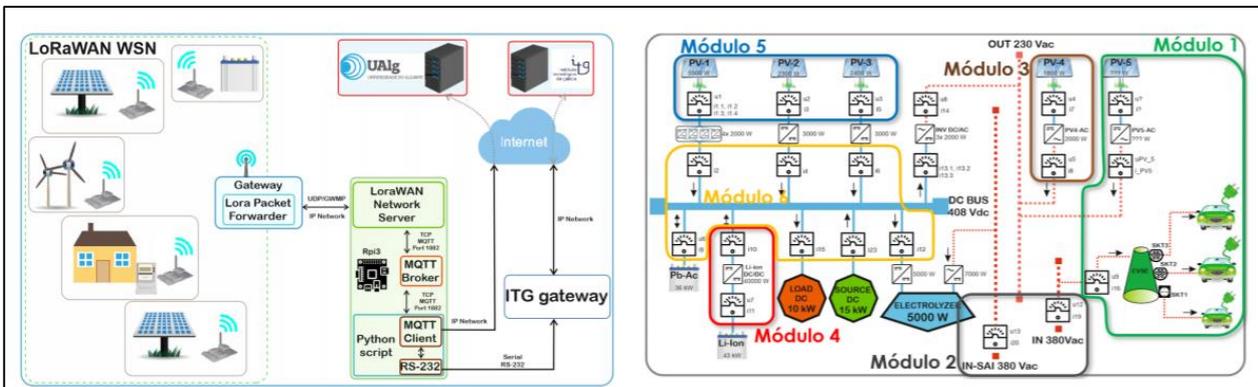


Ilustración 76 Esquema de implantación de la red de sensores LoRAWAN desplegada por UAIG en la microrred del INTA [50]

El Instituto Tecnológico de Galicia (ITG) ha desarrollado una herramienta tecnológica, basada en el Internet of Things (IoT) y el Big Data, y la ha desplegado en la microrred experimental del INTA. El objetivo era demostrar cómo el uso de sistemas de información basados en IoT, con alta capacidad de procesamiento y capaces de realizar análisis avanzados de datos, contribuye a mejorar la toma de decisiones en la gestión de esta tipología de microrredes. [47],[48],[49],[50],[51],[65].

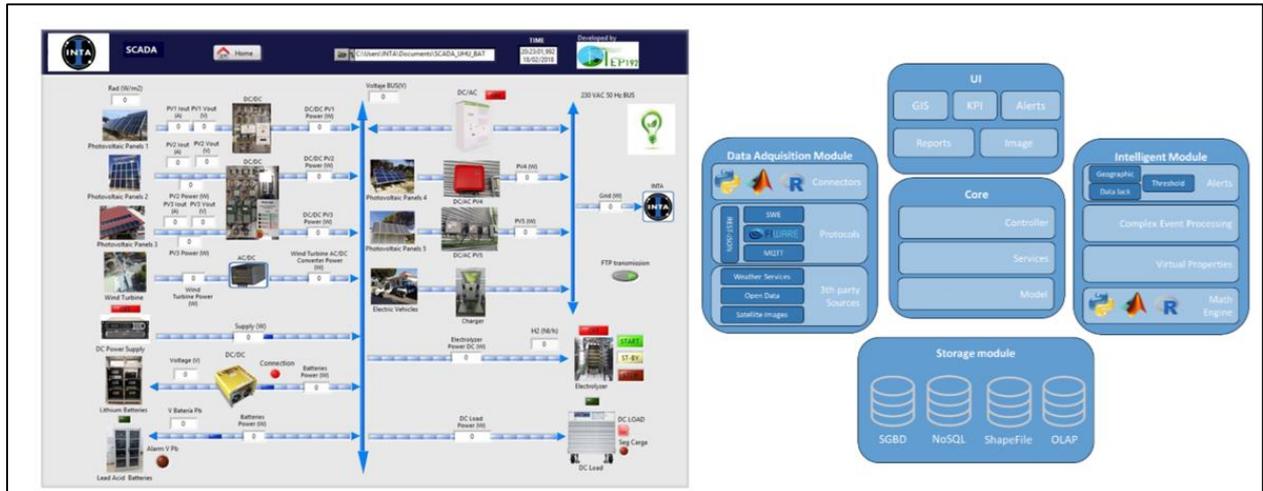


Ilustración 77 A la izquierda, SCADA de la microrred experimental del INTA. A la derecha, arquitectura de la plataforma IoT desarrollada por ITG en la microrred del INTA [51]

### 3.13 Microrred del IIE (Instituto De Ingeniería Energética)

La Universidad Politécnica de Valencia es consciente de la importancia de los sistemas híbridos renovables (HRES) los cuales, como se ha mencionado anteriormente, tienen el potencial para resolver este problema de fiabilidad de las fuentes renovables debido a los avances realizados en la tecnología de las mismas y en su asociada electrónica de potencia y control. No obstante, antes de abordar la construcción de sistemas de este tipo es preciso una verificación experimental de sus capacidades al mínimo nivel significativo de potencia. Este es el objetivo definido por el laboratorio de recursos energéticos distribuidos (LabDER) del Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia: estudiar sistemas híbridos renovables en el rango del kW y diseñar y participar en experiencias de campo de mayor potencia. Dicho laboratorio incluye diferentes fuentes renovables: fotovoltaica, eólica, biomasa y pila de combustible, todas ellas interconectadas mediante una microrred controlada, para alimentar una carga con una curva de demanda preprogramada, permitiendo así verificar el potencial de distintos sistemas híbridos renovables (HRES) para satisfacer con fiabilidad una demanda determinada. Adicionalmente, el laboratorio incluye sistemas de almacenamiento, basados en baterías e hidrógeno, para así cubrir prácticamente todas las posibles configuraciones de sistemas híbridos renovables (HRES) que puedan plantearse.

La microrred que une todos los sistemas renovables de generación es una red mixta que incluye una etapa inicial trabajando en DC, a la que pueden unirse aquellos sistemas como la fotovoltaica, que generan electricidad en este modo, y otra red en AC a la que se unen aquellos sistemas que proporcionan o consumen electricidad en ese modo, como el generador de la planta de gasificación.

Todos los sistemas de producción eléctrica mediante renovables y los sistemas de almacenamiento se unirán a una microrred eléctrica trifásica, bien directamente, como es el grupo motor de gas y alternador de la central de biomasa, o a través de convertidores estáticos rectificador-inversor o directamente inversor como es el caso de los paneles solares fotovoltaicos. La microrred se une a un conjunto de receptores trifásicos, cuya demanda eléctrica puede programarse a fin de obtener diferentes curvas de carga y estudiar el comportamiento y la estabilidad del sistema híbrido de generación frente a diversas demandas de energía.

Los equipos por los cuales está conformado la microrred son:

- Generación por energías renovables: fotovoltaica (2,1 kW), eólica (2,5 kW), biomasa (10 kW) e pila de combustible (1,2 kW).

- Equipos de almacenamiento mediante hidrógeno (electrolizador de 7 kW) y electroquímico (baterías plomo-ácido de 12 kWh).
- Equipos de consumo: carga resistiva de 9 KW.

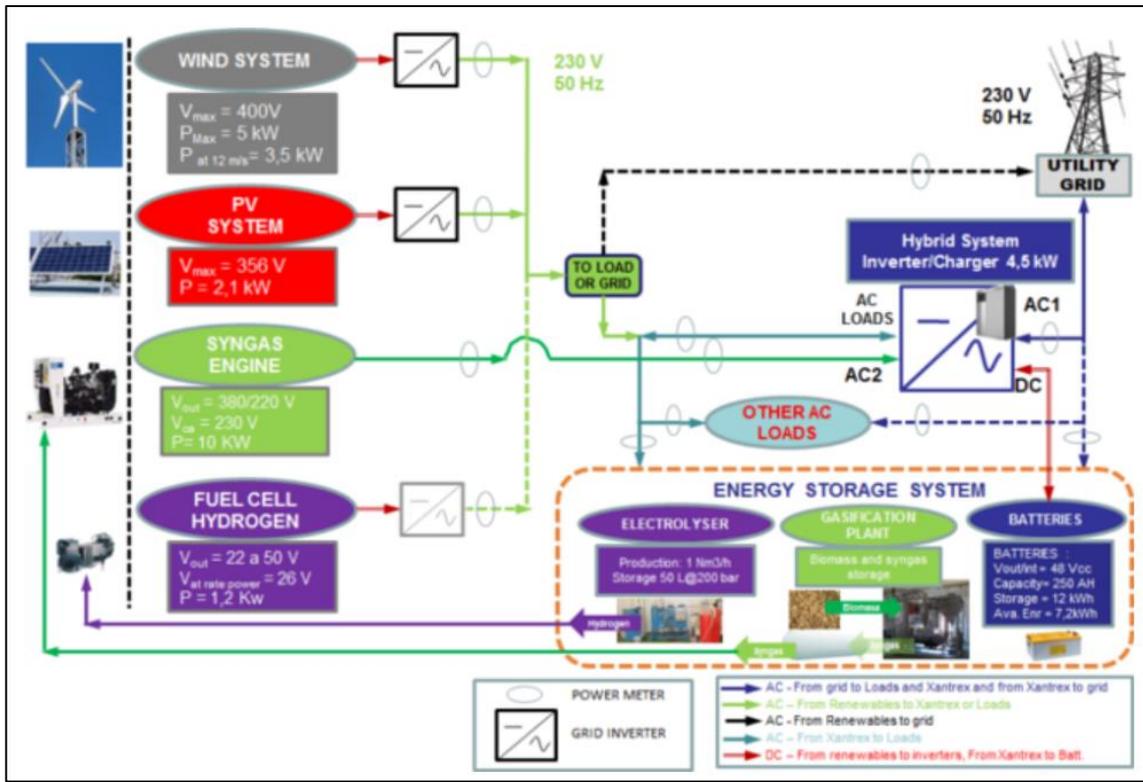


Ilustración 78 Esquema de la microrred del IIE de la Universidad Politécnica de Valencia [52]

Todas las partes de la microrred pasan a través de un cuadro general de protección y maniobra, desde el que se pueden realizar maniobras de conexión o desconexión de cualquier parte, además de proveer la protección básica contra sobrecargas y cortocircuitos. El cuadro va provisto de dispositivos de medida en cada circuito, que permiten monitorizar el funcionamiento de cada parte.

El núcleo actual para la gestión de la energía se basa en un equipo Xantrex XW4548-230-50 de Schneider Electric, que regula los distintos flujos entre los elementos conectados (incluidas las baterías de almacenamiento energético) y que podrá ser ampliado en el futuro con equipos propios que permitan dotarlo de nuevas utilidades.

El diseño actual permite estudiar el comportamiento de sistemas híbridos bajo diferentes escenarios de producción y consumo, analizar el comportamiento dinámico de los elementos del sistema, simular la ubicación remota de cualquier elemento, intercalando impedancias adecuadas para modelar las líneas eléctricas de conexión, etc. [52],[53],[54],[55].

### 3.14 Microrred Del ITE (Instituto Tecnológico De La Energía)

En los últimos años, las instalaciones que el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE) dispone en Paterna (Valencia) han evolucionado de forma progresiva para adoptar de forma conjunta el significado de microrred, a través de diferentes sistemas de generación, almacenamiento y consumo. La microrred empleada está constituida por una red implementada en el Laboratorio de Interoperabilidad de ITE, incluyendo además recursos distribuidos de generación, almacenamiento y consumo autogestionados, representados por el edificio de ITE en la Planta Piloto de Energías Renovables y el Laboratorio de Gestión Activa de la demanda de ITE. En conjunto, todo el sistema está diseñado e implementado para la realización de proyectos de investigación y desarrollo propios y con empresas interesadas en esta tecnología.



Ilustración 79 Instalaciones de la microrred del ITE en el Parque Tecnológico de Paterna, Valencia.[58]

Como parte de las instalaciones, se cuenta con elementos generadores de energía renovable, tales como una planta de generación fotovoltaica (7,5 kW), un aerogenerador de eje horizontal (6 kW), un mini-aerogenerador de eje vertical (1 kW) y dos pilas de hidrógeno tipo PEM (1,2 kW y 4,5 kW). Estos sistemas se utilizan como un punto de generación distribuida (DER), permitiendo la realización de ensayos y validación de los sistemas desarrollados, entre ellos el despacho de generación distribuida. Todo ello se combina con un sistema de almacenamiento energético en forma de baterías de distintas tecnologías, de supercondensadores y de hidrógeno (a presión y en hidruros metálicos). Además, se dispone de un simulador de red de frecuencia industrial, y otro simulador de redes de continua. En cuanto a los elementos consumidores de potencia, por un lado, se dispone de una línea dedicada de simulación de consumos domésticos, equipada con electrodomésticos gestionables, enchufes inteligentes y equipos de monitorización de consumos. El objetivo principal es la aplicación y validación de técnicas y algoritmos para gestión activa de la demanda en el hogar, mediante comunicación y envío de señales de limitación o corte de potencia a los distintos electrodomésticos, aunque también está preparado para otros estudios que tengan que ver con la caracterización eléctrica del uso de equipamiento doméstico en el hogar.

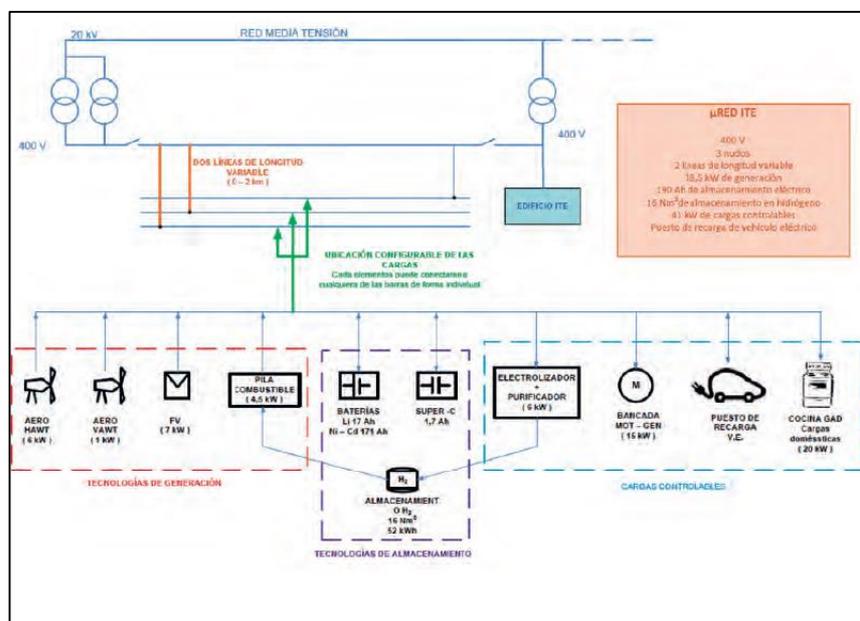


Ilustración 80 Esquema de la microrred del Instituto Tecnológico de la Energía[65]

Por otro lado, el propio edificio del Instituto Tecnológico de la Energía (ITE) se contempla como un nodo activo autogestionado con el propósito de monitorizar y gestionar a nivel local su consumo y su generación. Así, se tienen monitorizados los consumos, recursos y sistemas de gestión, con el fin de obtener:

- La mejora de eficiencia energética y disminución de consumos.
- Fomento de uso e integración viable de energías renovables y sistemas de almacenamiento.
- Óptima gestión automatizada de recursos y funcionalidades mediante el diseño de nuevos sistemas de control locales que sean dirigidos por un único gestor artificial centralizado inteligente que permite

optimizar el funcionamiento de las instalaciones de consumo y generación para equilibrar el balance energético de los edificios terciarios.

Como parte de esta microrred en las instalaciones del ITE se cuenta con un Laboratorio de Interoperabilidad y Comunicaciones para Smart Devices, ITP y Smartgrids. En este laboratorio se dispone de un conjunto de cargas pasivas, resistivas e inductivas para simular diversos escenarios de consumo. Adicionalmente se cuenta también con dos instalaciones singulares que permiten obtener situaciones de carga más próximas a la realidad, debido a que la red de Baja Tensión (BT) puede ser configurada en diversas topologías y longitudes de línea, permitiendo analizar el comportamiento en la gestión de las cargas y comunicaciones por la red, especialmente en el ámbito del Smart-metering.

El laboratorio de Interoperabilidad realiza proyectos de investigación y desarrollo propios y con empresas interesadas en:

- Realización de proyectos de investigación y desarrollo propios y con empresas interesadas en:
- Gestionabilidad de cargas domésticas.
- Caracterización de cargas (“electric signature”) de electrodomésticos.
- Validación de algoritmos de gestión de la demanda.
- Desarrollos de comunicación con contador y Operadora de Distribución basados en estándar PRIME sobre PLC.
- Integración de sistemas de producción energética renovables.
- Modelización de sistemas de generación distribuida.
- Desarrollo de productos de electrónica de potencia.
- Plataforma de desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento energético.
- Estudio y caracterización de pilas y generadores de hidrógeno.
- Difusión de las tecnologías de EE.RR. existentes.
- Validación y pruebas de integración en microrredes de dispositivos desarrollados.



Ilustración 81 Placas solares de la microrred del ITE colocadas en la fachada del edificio.[58]

Como novedad, el laboratorio mencionado proporciona una plataforma que permite verificar la correcta funcionalidad de una Smart Grid mediante sus diversas aplicaciones:

- Interoperabilidad basada en PLC (PRIME, DLMS/COSEM).
- Supervisión y mantenimiento para Centros de Transformación inteligentes.
- Certificación de contadores.
- Monitorización de microrredes.

En este sentido, la red de comunicaciones implementada cuenta una arquitectura paralela a la comunicación PRIME con monitorización y registro de consumos energéticos individualizados, dispositivos de actuación y corte de líneas, visualización y control remoto de señales del equipo de aire acondicionado, y sensorización adicional para detección de personas mediante fotocélulas, consumo de agua del grifo, y una webcam con comunicación mediante IP. Como instalación complementaria se cuenta con un Laboratorio de Descargas Parciales, en el cual se realizan medidas en aparataje de alta tensión (hasta 300 kV), localización de defectos en cables, análisis de la forma de onda de las DP, medidas en cables hasta 36 kV (sistema resonante para cargas capacitivas), ensayos de rigidez dieléctrica en cables de alta tensión (AC, DC y Tipo rayo), medidas de resistencia de aislamiento, resistividad de las semiconductoras, envejecimiento de los cables, peritajes y análisis de fallos/averías. [56],[57],[58],[65].

### 3.15 Microrred de Tecnia

Tecnia, una de las primeras empresas de I+D de España, ha desarrollado un laboratorio de microrredes en su sede. Las instalaciones del laboratorio son flexibles y modulares, lo que resulta perfecto para probar una microrred, donde la correcta combinación de opciones (elección de la generación in situ, elección del almacenamiento...) es clave para su éxito.



Ilustración 82 Imagen de las instalaciones del laboratorio Labein, Tecnia [60]

Las fuentes de energía del Laboratorio de Microrredes de Tecnia incluyen generación in situ no renovable y renovable, que incluyen un generador diesel (2x55 kW), una microturbina (50 kW), un sistema fotovoltaico (3,6 kW trifásico), un aerogenerador (6 kW) y una pila de combustible (1 kVA). El almacenamiento, disponible en el Laboratorio de Tecnia, incluye un volante de inercia, bancos de baterías y supercondensadores. La carga controlable también forma parte del amplio abanico de opciones del laboratorio de microrredes con bancos de carga resistiva y reactiva.

En el Laboratorio de Tecnia se han llevado a cabo diversas experiencias, desde el diseño de la arquitectura para el control secundario de las microrredes hasta la realización de pruebas de interconexión de inversores para determinar los estándares europeos de microrredes.

La microrred está compuesta por:

- Paneles fotovoltaicos:
  - Conjunto fotovoltaico de silicio amorfo de 0,6 kW conectado a la red.
  - Conjunto fotovoltaico monocristalino de 1,6 kW con sistema de almacenamiento de baterías de plomo-ácido de 1080 Ah.
  - Conjunto fotovoltaico policristalino de 3,6 kW conectado a la red.
- Generación eólica: un molino de viento de 6 kW con un generador de imanes permanentes. Incluye estación meteorológica con anemómetro, pluviómetro, piranómetro, barómetro, sensor de humedad y termómetro.
- Generador diésel: dos generadores diésel basados en motores primarios de 55 kW y un generador

síncrono de 63 kVA.

- 50 kW de microturbina de gasóleo. La microturbina tiene una velocidad de rotación de 56000 rpm con un generador que proporciona 380 Vac a 400 Hz. La salida del generador está conectada a un rectificador/inversor 400 Vac a 50 Hz.
- Simulador de red: sistema de generación basado en electrónica de potencia capaz de simular la red eléctrica de BT (transitorios, armónicos...). Está compuesto por dos fuentes de 55 kW que proporcionan una salida trifásica de 228/132 Vca 500 Hz, un transformador de potencia de 456/264 Vca y un controlador programable.
- Volante de inercia: 250 kV, proporciona energía a una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS system), es capaz de responder a caídas de tensión de hasta 15 segundos a plena carga.
- Sistema de baterías de 1925 Ah conectado mediante tres inversores a la red.
- Sistema de almacenamiento basado en ultracondensadores capaz de proporcionar electricidad a una carga de 5 kW durante 6,5 minutos.
- Banco de cargas:
  - Banco de carga resistiva de 150 kW.
  - Banco de carga resistiva de 50 kW.
  - Dos bancos de carga reactiva de 36 kVA.
- Configurador de red. Todos los dispositivos pueden ser conectados de acuerdo a diferentes topologías de red.

[59],[60],[61],[65]

En la siguiente imagen se muestra el esquema de la microrred:

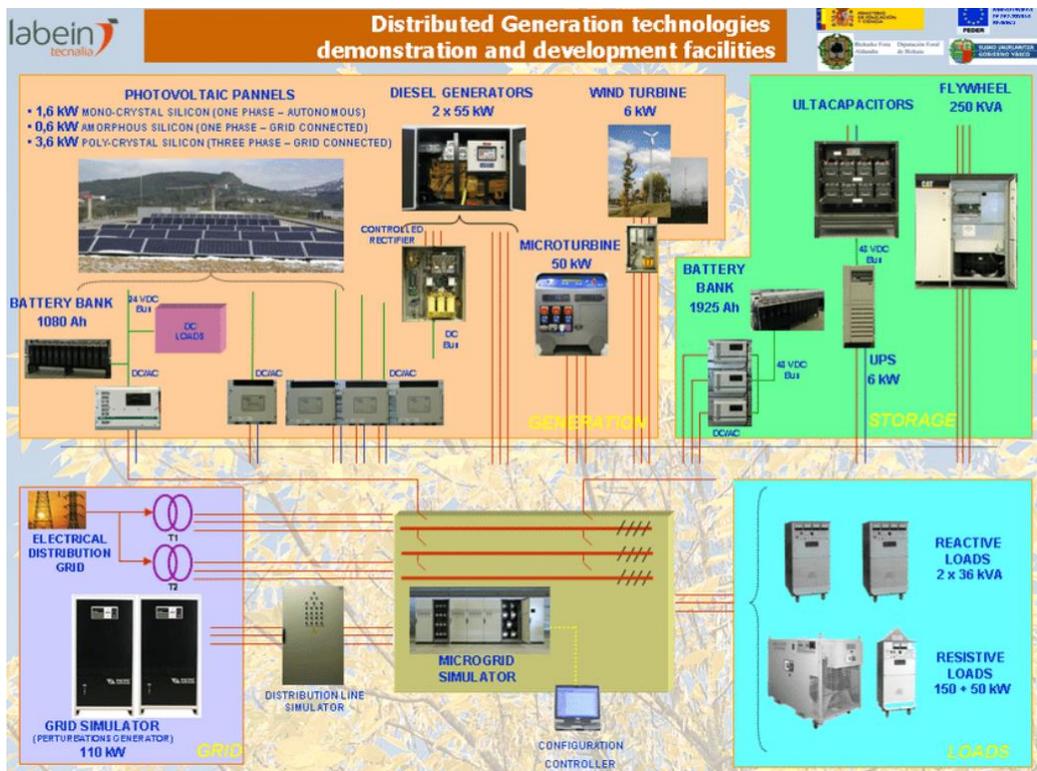


Ilustración 83 Esquema de la microrred del laboratorio Labein en Tecnalia [60]

### 3.16 Microrred de la Universidad de Oviedo

El grupo de trabajo encargado de esta microrred se denomina Laboratory for Enhanced Microgrids Unbalance Research (LEMUR) y sus integrantes están adscritos al Departamento de Ingeniería Electrónica, de Computadores y Sistemas de la Universidad de Oviedo. LEMUR es un grupo multidisciplinar que une investigadores de las áreas de conocimiento de la Ingeniería Eléctrica (IE), de la Tecnología Electrónica (ATE) y de la Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA), buscando las sinergias en colaboración entre sus miembros, así como la integración de los conocimientos para abordar proyectos complejos con mayor probabilidad de éxito.

El ámbito de la investigación de LEMUR es el estudio de la implementación y desarrollo de soluciones en redes de distribución eléctrica, en particular en microrredes. Su objetivo principal es la comprobación del funcionamiento de los sistemas de micro-generación tanto en zonas residenciales (cargas con factor de potencia cercano a la unidad y con un contenido de armónicos relativamente bajo) como en zonas industriales (talleres, polígonos) donde la maquinaria puede afectar al comportamiento de los sistemas de generación. Los resultados esperados de los estudios planteados se esperan en las siguientes direcciones:

- Evaluación del impacto de la generación distribuida en la red de distribución.
- Mejora de los sistemas de micro-generación en términos de eficiencia y fiabilidad.
- Determinación del sistema de expansión de las microrredes atendiendo a criterios técnico-económicos.

Para ello, el laboratorio tiene las siguientes líneas de investigación:

- Desarrollo de sistemas de generación y convertidores de potencia eficientes y fiables para permitir la inyección de energía a red de la forma más adecuada.
- Desarrollo de los sistemas de almacenamiento que permitan compensar la naturaleza pulsante y estocástica de las fuentes de energía renovables utilizadas en micro-generación (fotovoltaica, eólica).
- Desarrollo de estrategias de control coordinado del conjunto de generadores de la microrred de forma que contribuyan colaborativamente a la inyección de energía en la red.
- Estudio de nuevos modelos de negocio e infraestructuras basados en la generación distribuida, que permitan maximizar beneficios con la nueva normativa de generación distribuida basada en el proyecto del real decreto sobre las condiciones técnicas económicas y administrativas de la modalidad de suministro de energía eléctrica con balance neto.

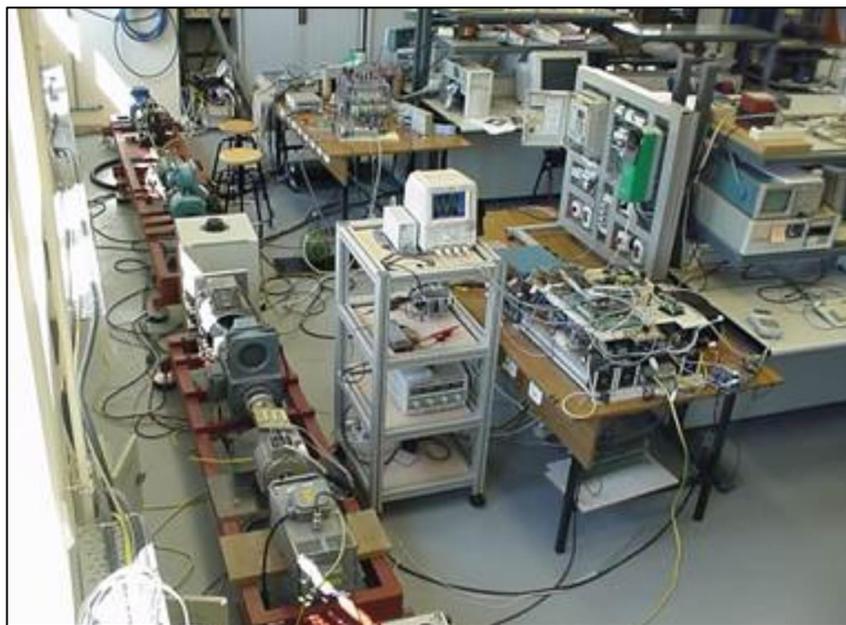


Ilustración 84 Microrred LEMUR de la Universidad de Oviedo [62]

La microrred se compone de:

- Un grupo electrógeno de 100 kVA.
- Tres convertidores trifásicos de 50 kVA cada uno, con capacidad de funcionamiento maestro/esclavo.
- Un filtro activo de potencia para compensación de armónicos con una capacidad de 75 A.
- Un generador doblemente alimentado con una potencia nominal de 15 kW arrastrado por un motor asíncrono gobernado desde un convertidor en el que se programan las curvas características del generador eólico deseado.
- Tres cargas de tipo resistivo con una potencia de 30 kW cada una.
- Cargas de tipo no lineal (inversores para alimentación de motores asíncronos) con una potencia de 100 kW.
- Bancos de compensación de energía reactiva con una potencia de 20 kVAr.
- Sistema de almacenamiento de energía cinética basado en volante de inercia de 30 krpm.
- Dos convertidores monofásicos de 40 kW cada uno.
- Una fuente de alimentación de 150 kW 4 kV.



Ilustración 85 Convertidor medio de energía de tensión : 4 kV junto a la fuente de corriente continua de 150 kW de la microrred de la Universidad de Oviedo [62]

Los convertidores de potencia son totalmente abiertos en cuanto a la electrónica y al control se refiere. La electrónica se diseña integralmente por el grupo de investigación. El control de convertidores se realiza mediante DSP's de Texas Instruments y su programación se realiza íntegramente por el grupo de investigación.

Las seis capacidades del laboratorio descrito con anterioridad son:

1. Diseño de convertidores de potencia y sistemas de control (hardware/software) para aplicaciones de inyección a red (microgeneración, calidad de suministro), accionamientos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía.
2. Operación de microrredes en condiciones de desequilibrio.
3. Estudio de flujos de carga en redes eléctricas, optimización de las estrategias de generación y de la demanda.
4. Impacto en la Red Eléctrica de la Generación Distribuida (microgeneración solar/eólica) y del Vehículo Eléctrico.
5. Estudio de fiabilidad, diseño térmico, diseño y optimización de circuitos electrónicos de potencia.
6. Aplicaciones de almacenamiento de energía eléctrica en microrredes y en el vehículo eléctrico.

[62],[63],[65].

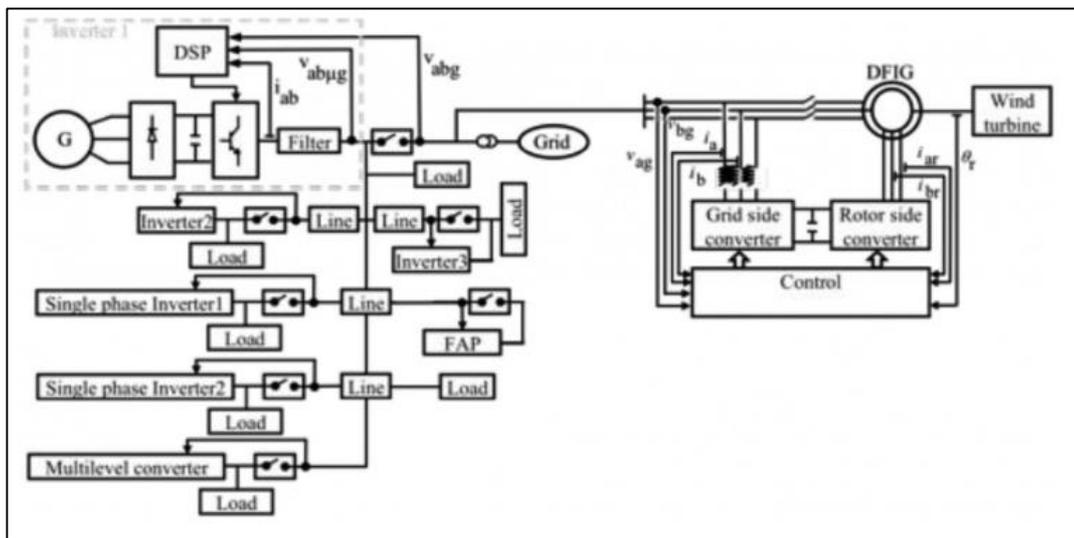


Ilustración 86 Esquema de la microrred LEMUR de la Universidad de Oviedo [65]

### 3.17 Microrred de la Universidad de Sevilla-Laboratorio De Automática Hylab

La microrred experimental del laboratorio HyLab es una instalación desarrollada por el Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. El objetivo de la creación de esta microrred es la investigación de la integración de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento convencionales basados en baterías en microrredes que empleen el vector hidrógeno como principal sistema de almacenamiento. Tanto su diseño como su construcción fueron realizados en el marco del Proyecto "Aplicación de técnicas novedosas de control al almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable utilizando hidrógeno", financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, y con principal responsable el Catedrático Manuel Felipe Rosa Iglesias.

La Microrred del Hylab es una instalación experimental concebida con una estructura modular que le confiere un alto grado de flexibilidad, permitiendo implementar y estudiar diferentes modos de operación y estrategias de control. Esta microrred también es utilizada para desarrollar y validar experimentalmente modelos matemáticos tanto de los equipos individuales como de determinadas configuraciones.

A lo largo de estos últimos años, sobre la microrred del HyLab se han efectuado diversas ampliaciones y actualizaciones, con la finalidad de poder llevar a cabo nuevos proyectos de investigación. La Microrred original, la cual aparece en la siguiente imagen, fue puesta en operación en el año 2010. La microrred original estaba conformada por los siguientes equipos:

- Una pila de un electrolizador.
- Un tanque de hidruros metálicos para el almacenamiento del hidrógeno.
- Dos convertidores DC/DC para adaptar las tensiones e intensidades de la pila y del electrolizador.
- Un banco de baterías de plomo ácido.
- Una fuente y una carga electrónica programables para simular perfiles de generación o de demanda.

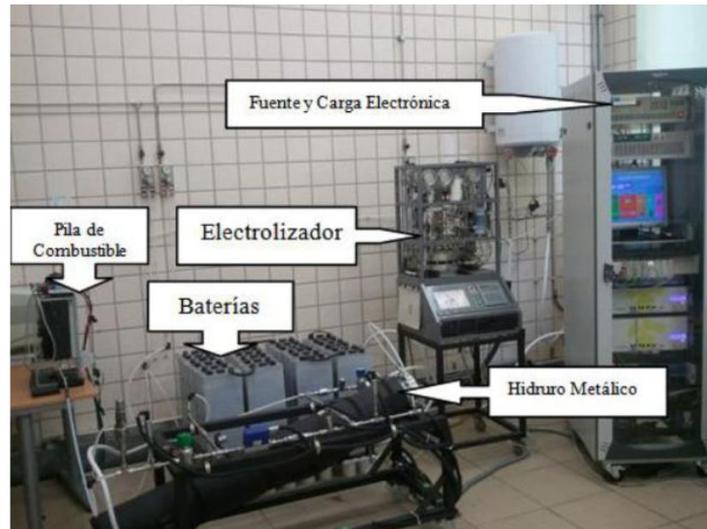


Ilustración 87 Microrred original del HyLab de la Universidad de Sevilla [64]

La microrred ha sufrido cambios desde que se instaló. Estos cambios han sido la instalación de un campo de paneles fotovoltaicos, la instalación de un banco de baterías de litio con un convertidor DC/DC asociado y la sustitución de la pila y el electrolizador por una nueva pila y un nuevo electrolizador del fabricante Heliocentris.



Ilustración 88 Microrred del HyLab de la Universidad de Sevilla en la actualidad [64]

En la actualidad la composición de la microrred es la siguiente:

- Un stack de baterías de plomo-ácido con capacidad para almacenar 18.048 kWh. Constituye una unidad de almacenamiento secundaria, destinada fundamentalmente a estabilizar el bus principal de la microrred, atenuando los regímenes transitorios del balance de potencias que se producen ante cambios en la generación o en la demanda. También se encarga de establecer la tensión en el bus principal, ya que está conectado al mismo directamente, sin ninguna etapa de conversión intermedia. El conjunto está integrado por 24 celdas o monobloques modelo Classic Solar Enersol T-370 del fabricante Exide Technologies, diseñados específicamente para instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo.
- Un electrolizador con capacidad para producir hasta 500 NI/h de hidrógeno para un consumo de potencia de 2.9 kW. Este equipo dispone de dos stacks AES500, que emplean membranas de intercambio aniónico.
- Una pila de hidrógeno con capacidad para generar 1200 W con un consumo de hidrógeno de 15 NI/minuto.

- Dos tanques de hidruros metálicos con capacidad para almacenar hasta 14 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno. Para el almacenamiento del hidrógeno se emplean dos tanques de hidruros metálicos modelo HBond-7000H del fabricante LabTech Int LTD.
- Un circuito hidráulico provisto de un termo eléctrico y de conexión a la red local de suministro, configurable tanto para refrigerar como para calentar los tanques de hidruros metálicos. Para el aprovisionamiento de agua caliente se dispone de un calentador de agua doméstico, y de una bomba hidráulica que bombea el agua que sale de los tanques de hidruros hacia el calentador nuevamente. El agua fría se toma directamente de la red de suministro de la ETSI de Sevilla.
- Un circuito de hidrógeno, para el almacenamiento del hidrógeno producido por el electrolizador en los tanques de hidruros, y para la alimentación de la pila de hidrógeno tanto desde los tanques de hidruros como de una fuente externa.
- Un convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno. Para adaptar la tensión de salida de la pila de hidrógeno a la tensión del bus principal de la microrred se emplea un convertidor DC/DC de 3 kW, desarrollado por Wind Inertia Technologies S.L.
- Una fuente de alimentación programable DC, para emular perfiles de generación fotovoltaica y eólica, y también la compra de energía eléctrica a la red externa. Es el modelo LBS 60-100 del fabricante Powerbox y 100 puede proporcionar una potencia de hasta 6 kW, y con tensiones e intensidades de hasta 60 V y 100 A respectivamente.
- Una carga electrónica programable DC, para emular la demanda de potencia y la inyección del exceso de potencia a la red externa eléctrica para cubrir la demanda no satisfecha. Es el modelo AMETEK PLA 2.5K-60-1000 del fabricante Amrel, con capacidad de 1000 puede absorber una potencia de hasta 2.5kW, y trabajar a tensiones e intensidades de hasta 60 V y 1000 A respectivamente.
- Un campo de paneles fotovoltaicos con capacidad para generar 5 kWp. Los paneles fotovoltaicos instalados en la azotea del Edificio T2 de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Este campo fotovoltaico está compuesto por dos arrays paralelos cada uno con 10 módulos fotovoltaicos A-250M de silicio monocristalino manufacturados por la compañía Atersa del Grupo Elecnor.
- Un convertidor DC/DC monodireccional asociado al campo de paneles fotovoltaicos. Para adaptar la tensión y la intensidad del campo de paneles fotovoltaicos al bus principal de la microrred se dispone de un cargador solar Studer Innotec VarioString VS 70 configurado para ser utilizado como convertidor DC/DC, con el bus de entrada cableado al campo de paneles fotovoltaicos y el bus de salida al bus principal de la microrred.
- Un stack de baterías de litio con capacidad para almacenar 19.2 kWh. El stack de baterías de litio constituye, junto con el tanque de hidruros metálicos, uno de los sistemas de almacenamiento de energía de la microrred. Está integrado por 16 celdas LFP de 100 Ah del fabricante Global Battery Solutions diseñadas específicamente para instalaciones fotovoltaicas.
- Un convertidor DC/DC bidireccional asociado al stack de baterías de litio. Para adaptar la tensión del stack de baterías de litio a la tensión del bus principal de la microrred se emplea un convertidor DC/DC bidireccional elevador-reductor de 3 kW, diseñado y construido por el Grupo de Electrónica de Potencia de AICIA específicamente para esta aplicación, dentro del contexto del proyecto CONFIGURA. El equipo se ha denominado ESS3-DCDC.
- Conexión a vehículo eléctrico (30 KW).

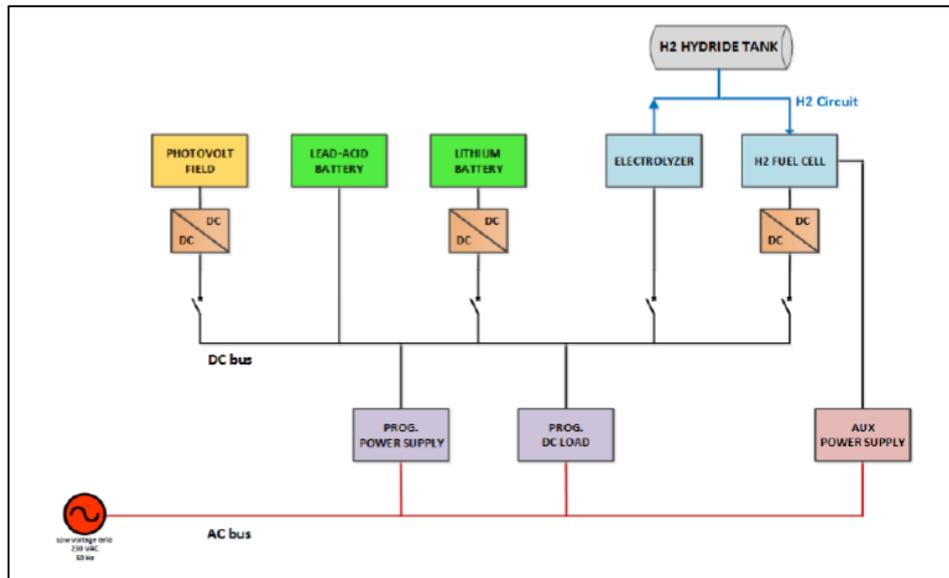


Ilustración 89 Esquema de la microrred del Hylab de la Universidad de Sevilla [64]

La arquitectura de control de la Microrred del Hylab está estructurada en tres niveles:

- Nivel de Control Cero. Es el nivel más bajo, compuesto por el conjunto de controladores finales (FCEs referido a Front End Controller) de todos los equipos y sistemas de la microrred.
- Nivel de Control 1 o Control Intermedio, que contiene único dispositivo físico, el FLC (First Level Controller), cuya función es manejar los diferentes modos de operación de la microrred. También sirve de conexión entre el Nivel de Control 0 y el tercer nivel de control.
- Nivel de Control 2 es el tercer nivel de control, compuesto por un único dispositivo físico, el SLC (Second Level Controller), que se encarga principalmente de ejecutar algoritmos y estrategias de control para gestionar la generación y almacenamiento de energía de la Microrred.

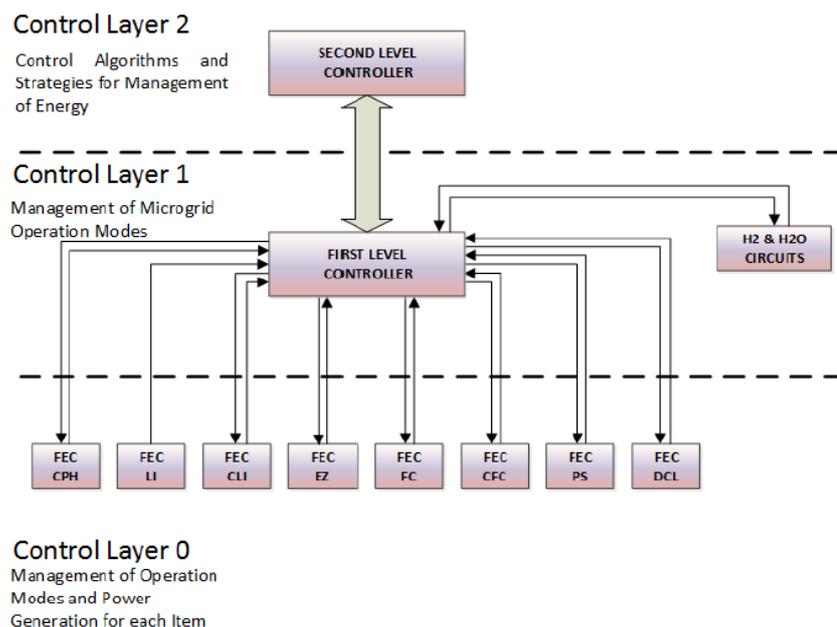


Ilustración 90 Arquitectura de control de la microrred en el HyLab de la Universidad de Sevilla [64]

Se muestra a continuación el esquema de la arquitectura de comunicaciones de la Microrred del Hylab. El FLC se comunica con los equipos de la microrred a través de diversos protocolos de comunicaciones. Se utiliza una red Modbus TCP/IP para la comunicación entre el FLC y los FECs del Electrolizador y del convertidor DC/DC para el stack de baterías de litio. [64],[65].

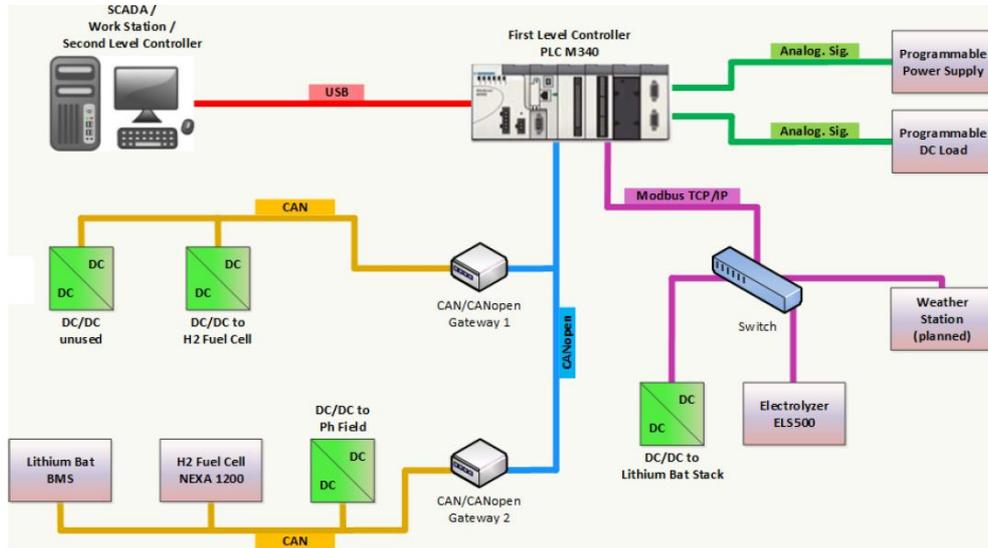


Ilustración 91 Sistema de comunicaciones de la microrred Hylab en la Universidad de Sevilla [64]

## 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DIMENSIONADO DE MICRORREDES

En este capítulo se realizará un análisis estadístico de las microrredes descritas en el apartado anterior. Este análisis estadístico tiene como objetivo dar una idea general al lector de la dimensión y de las características de los equipos que conforman estas microrredes. Para la realización del análisis se han comparado las microrredes entre ellas y los resultados obtenidos se han expresado gráficamente.

Por razones técnicas de espacio, los nombres de las microrredes se han asociado a números que aparecerán en los ejes horizontales de las gráficas.

NÚMERO	NOMBRE DE LA MICRORRED
1	Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)
2	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I
3	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II
4	Microrred de la Universidad de Navarra
5	Microrred de la Universidad de Valencia
6	Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa
7	Microrred Atenea de Cener (Navarra)
8	Microrred LIER (Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE)
9	Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE
10	Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes
11	Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente
12	Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón
13	Microrred del IREC Energy SmartLab
14	Microrred del INTA
15	Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER
16	Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE
17	Microrred de Tecnalia
18	Microrred de la Universidad de Oviedo
19	Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab

Tabla 1 Asociación Numérica de las Microrredes

Asimismo, antes de comenzar, se presentan algunas hipótesis referidas a las unidades de los datos representados en los apartados consecutivos del análisis:

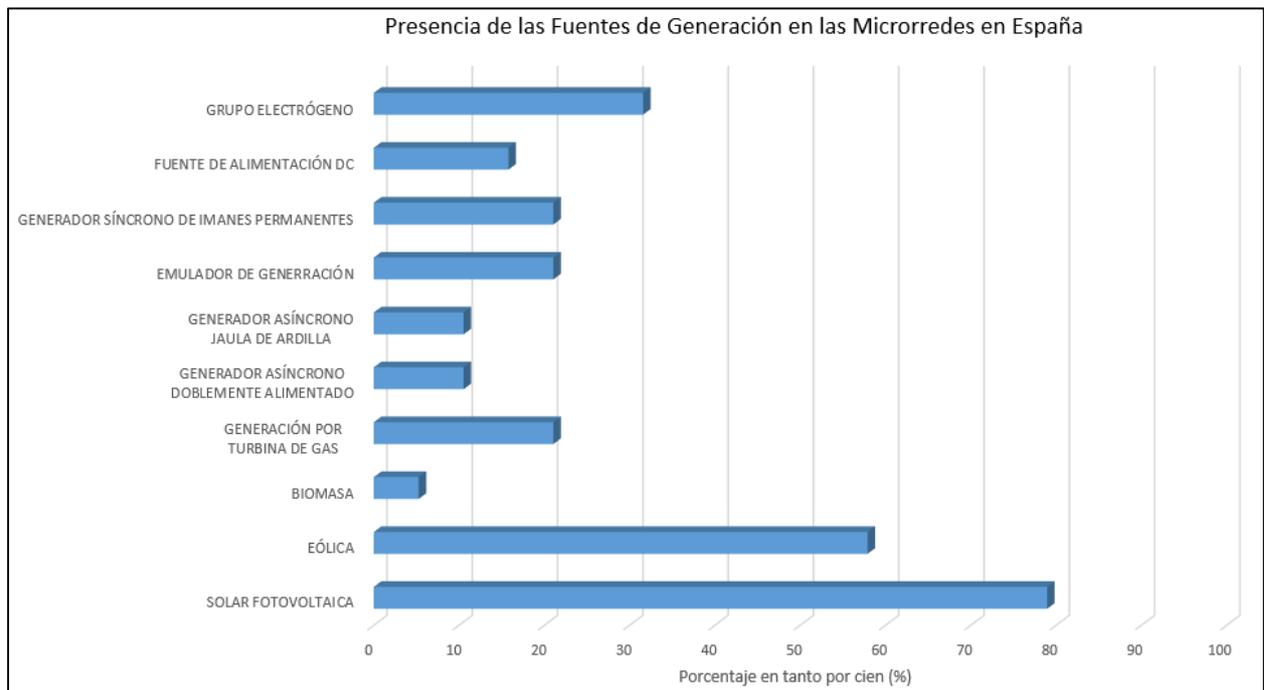
- La capacidad de las baterías y supercondensadores se expresa en vatios hora (Wh). Sin embargo, en algunos casos la capacidad de las baterías viene expresada en unidades de intensidad (Ah) y tensión (V). Por lo tanto, para obtener la potencia de la batería se han multiplicado ambos valores.

- La potencia de las cargas de consumo de la microrred se expresa en KW. Sin embargo, en algunos casos esta potencia venía expresada en KVA. Para pasar las unidades a KW se ha supuesto un factor de potencia de 0,9 (que suele ser un factor de potencia bastante común en este tipo de instalaciones).

En el anexo se puede consultar la base de datos utilizada para el análisis estadístico.

## 4.1 Fuentes de generación presentes en las microrredes de España

La siguiente gráfica muestra los tipos de equipos de generación presentes en las microrredes de España, donde se muestra el porcentaje de presencia de cada tipo de tecnología. Como ejemplo, se observa que aproximadamente el 80% de las microrredes de España presenta energía solar fotovoltaica.



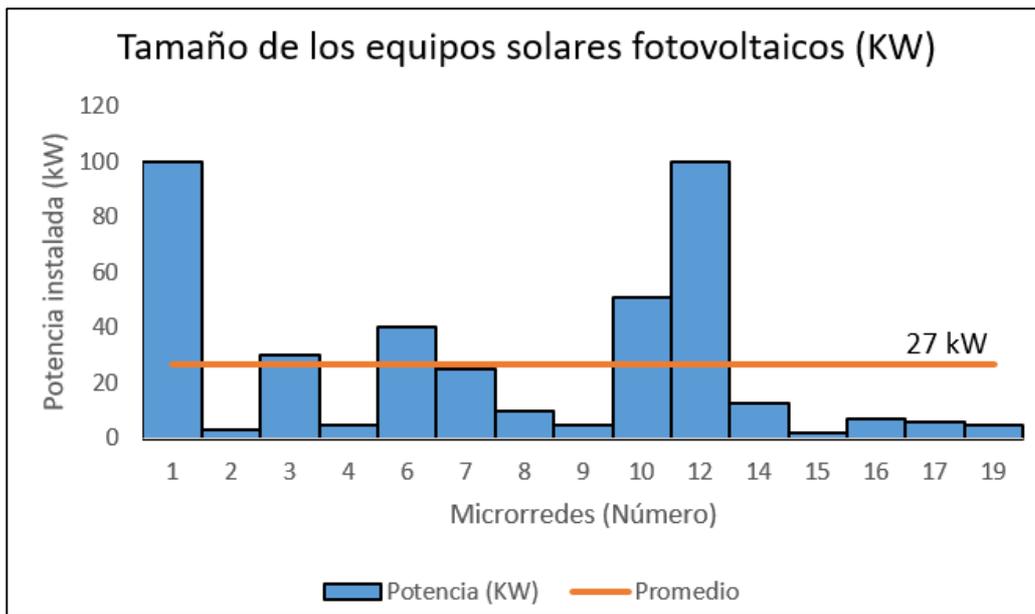
Gráfica 1 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Generación por tipología en las microrredes españolas

### 4.1.1 Análisis del Tamaño Medio de los Equipos Renovables

#### 4.1.1.1 Energía fotovoltaica

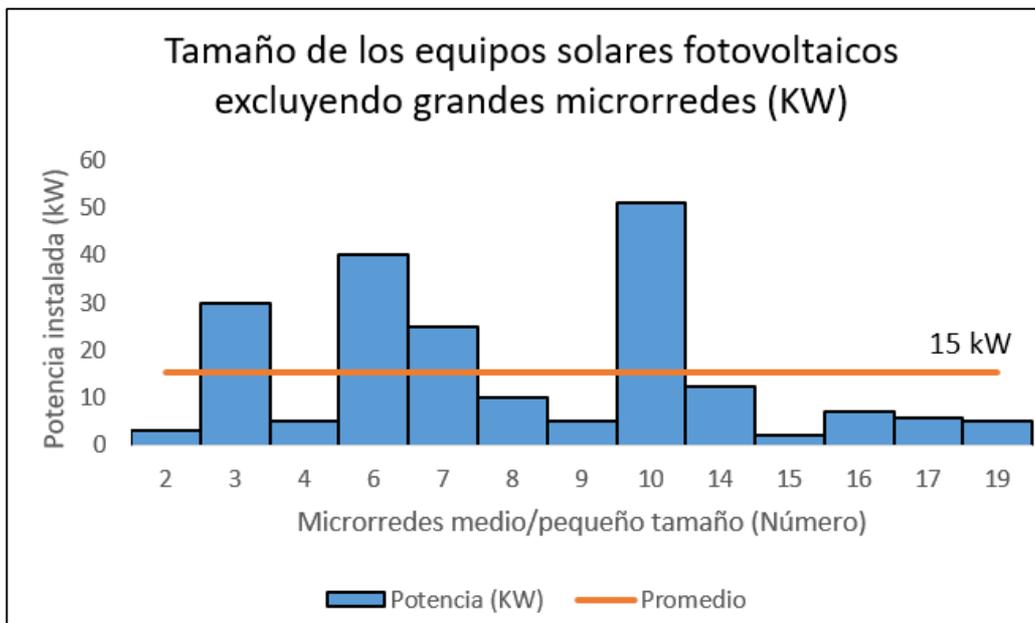
Para la obtención del tamaño medio de los equipos de energía fotovoltaica, se ha tenido en cuenta aquellas microrredes que presentaban placas solares fotovoltaicas (excluyendo aquellas que son emuladas mediante emuladores de generación).

El siguiente gráfico de barras representa la potencia instalada de energía fotovoltaica (KW) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred. El tamaño medio se ha obtenido realizando el promedio de estos valores.



Gráfica 2 Tamaño de los Equipos Solares Fotovoltaicos (kW) vs Microrredes en España

Como se puede apreciar hay dos microrredes que sobresalen en potencia instalada fotovoltaica. Estas son las microrredes 1 y 12 correspondientes a las microrredes del Centro Nacional de Hidrógeno y a la Microrred Walqa de la Fundación Hidrógeno Aragón respectivamente. Ambas son microrredes excepcionales, de grandes dimensiones. Es por ello que, con el objetivo de obtener un valor promedio usual del tamaño de estos equipos en España, se ha decidido excluirlas en un segundo análisis. Por lo tanto, en esta segunda gráfica se incluyen como objeto de estudio todas las microrredes con placas solares fotovoltaicas excepto las microrredes 1 y 12.

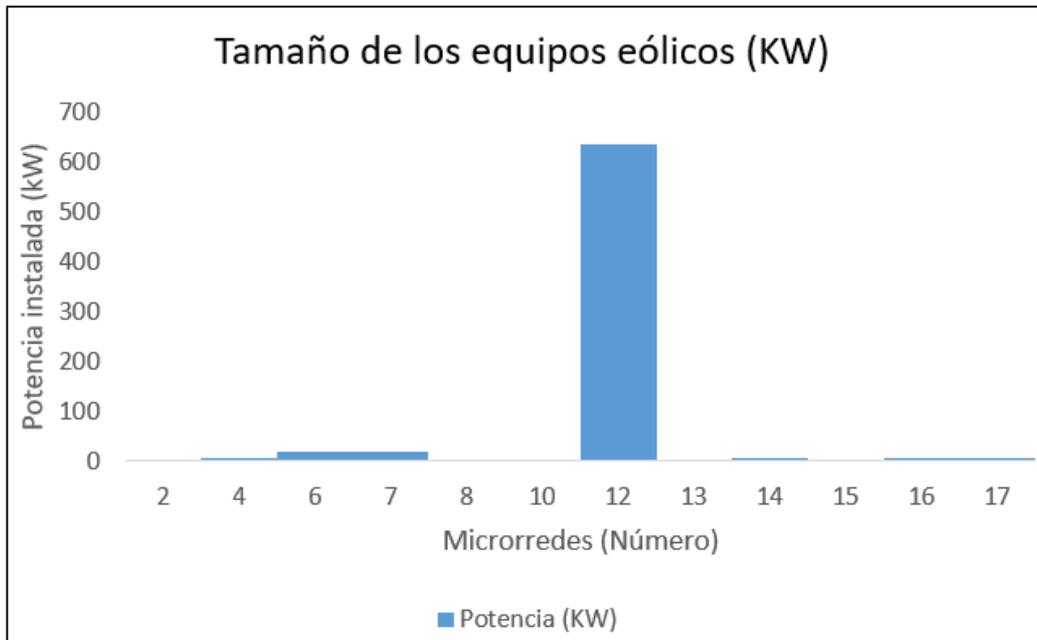


Gráfica 3 Tamaño de los Equipos Solares Fotovoltaicos vs microrredes en España (excluyendo grandes microrredes)

#### 4.1.1.2 Energía eólica

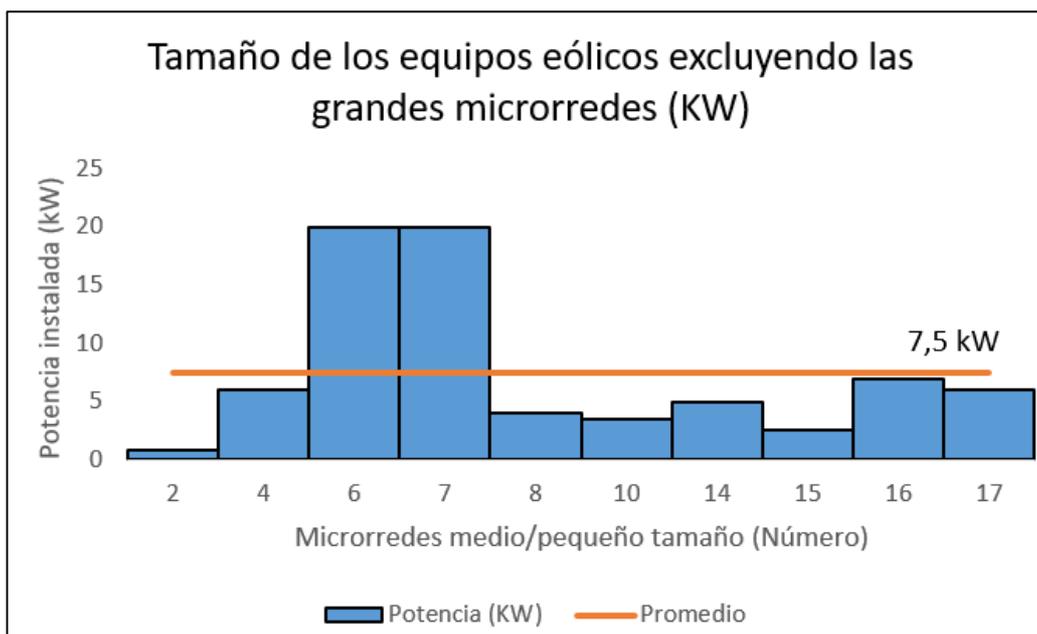
Para la obtención del tamaño medio de los equipos de energía eólica, se ha tenido en cuenta aquellas microrredes que presentaban aerogeneradores o mini aerogeneradores (excluyendo aquellas que son emuladas mediante emuladores de generación).

El siguiente gráfico de barras representa la potencia instalada (KW) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred. El tamaño medio se ha obtenido realizando el promedio de estos valores.



Gráfica 4 Tamaño de los Equipos solares Eólicos vs Microrredes en España

Al igual que ocurre en el anterior apartado, la gran microrred 12 nos impide dar un valor realista promedio. Siguiendo el mismo razonamiento anterior, se hace un segundo análisis excluyendo esta microrred.



Gráfica 5 Tamaño de los Equipos Eólicos vs Microrredes en España (excluyendo grandes microrredes)

### 4.1.2 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y potencia gestionada por la microrred

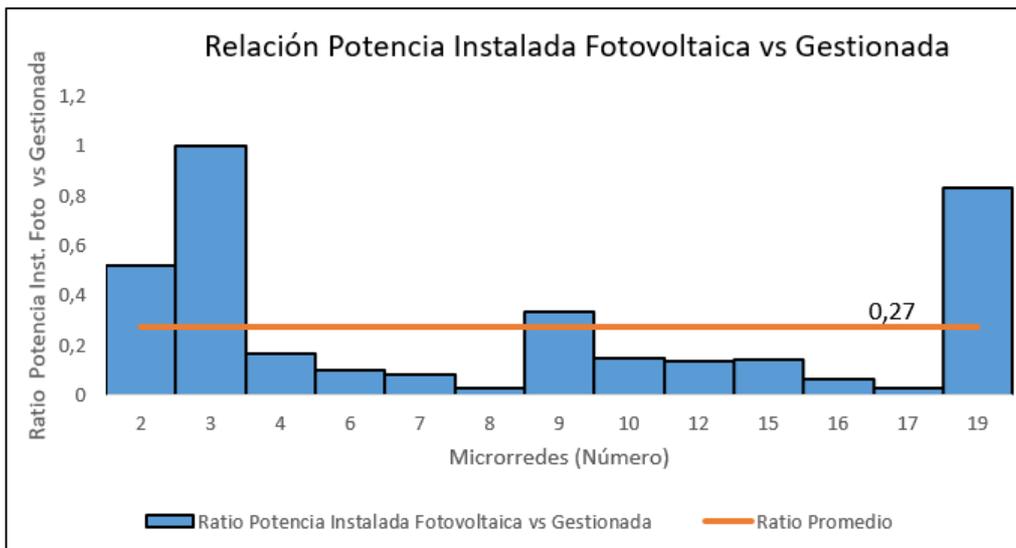
Para la obtención de la relación entre potencia de los equipos renovables y potencia gestionada por la microrred, se ha tenido en cuenta (tal y como se hizo en la sección anterior) aquellas microrredes que presentaban placas solares fotovoltaicas/aerogeneradores (excluyendo aquellas que son emuladas mediante emuladores de generación). Se entiende por potencia gestionada por la microrred como la potencia máxima que puede ser asumida simultáneamente por la microrred, es decir, aquella que es capaz de gestionar el control de la infraestructura. Se excluyen algunas microrredes por falta de datos con respecto a la potencia gestionada ( como ocurre con la microrred 1 y 14).

El ratio de potencia instalada y potencia gestionada sigue la siguiente fórmula:

$$Ratio_{potencia} = \frac{P_{instalada}}{P_{gestionada}}$$

#### 4.1.2.1 Energía fotovoltaica

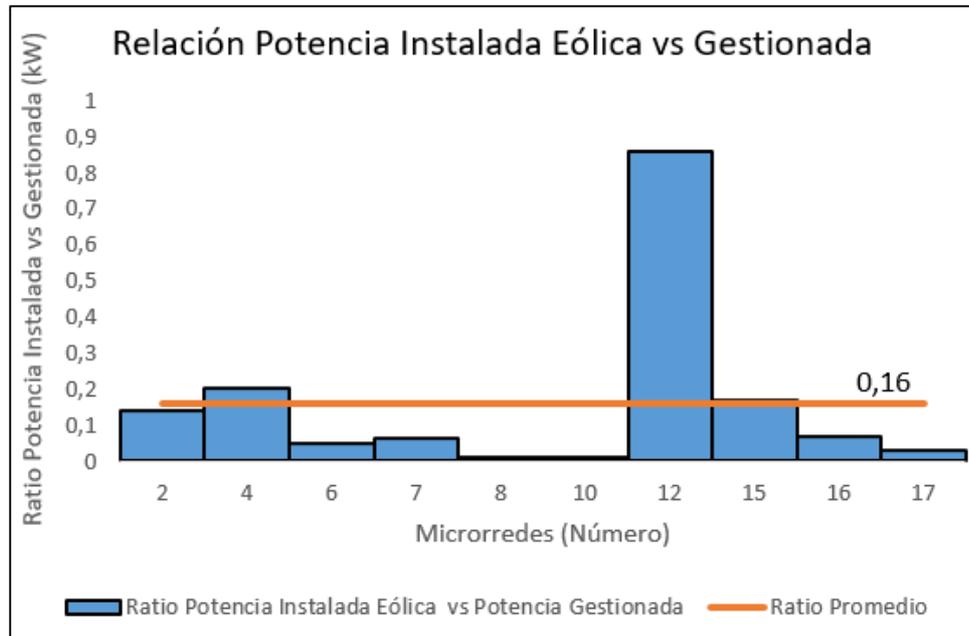
El siguiente gráfico de barras representa el ratio de potencia en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred. El tamaño medio se ha obtenido realizando el promedio de estos valores.



Gráfica 6 Relación de Potencia Instalada de Fotovoltaica vs Potencia Gestionada por las microrredes de España

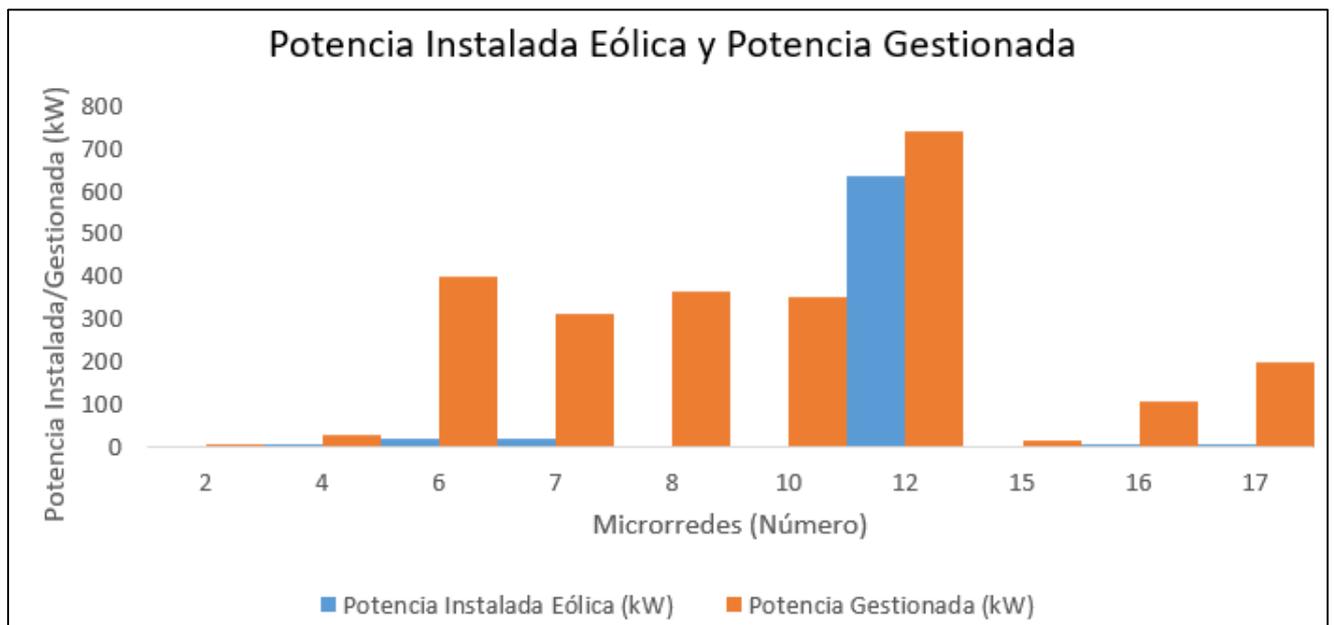
#### 4.1.2.2 Energía eólica

El siguiente gráfico de barras representa el ratio de potencia en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred. El tamaño medio se ha obtenido realizando el promedio de estos valores.



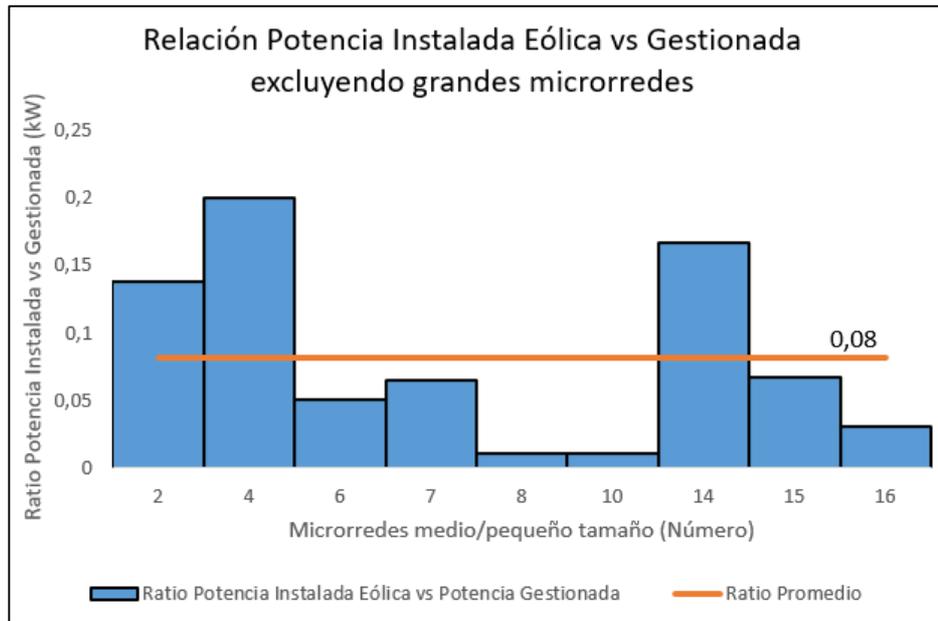
Gráfica 7 Relación de Potencia Instalada Eólica vs Potencia Gestionada por las microrredes

Sin embargo, al igual que en los anteriores casos, observamos que la gran microrred 12 tiene valores alejados con respecto al resto de microrredes de mediano/pequeño tamaño. Este fenómeno es observable en la siguiente gráfica:



Gráfica 8 Potencia Instalada Eólica y Potencia Gestionada por las microrredes de España

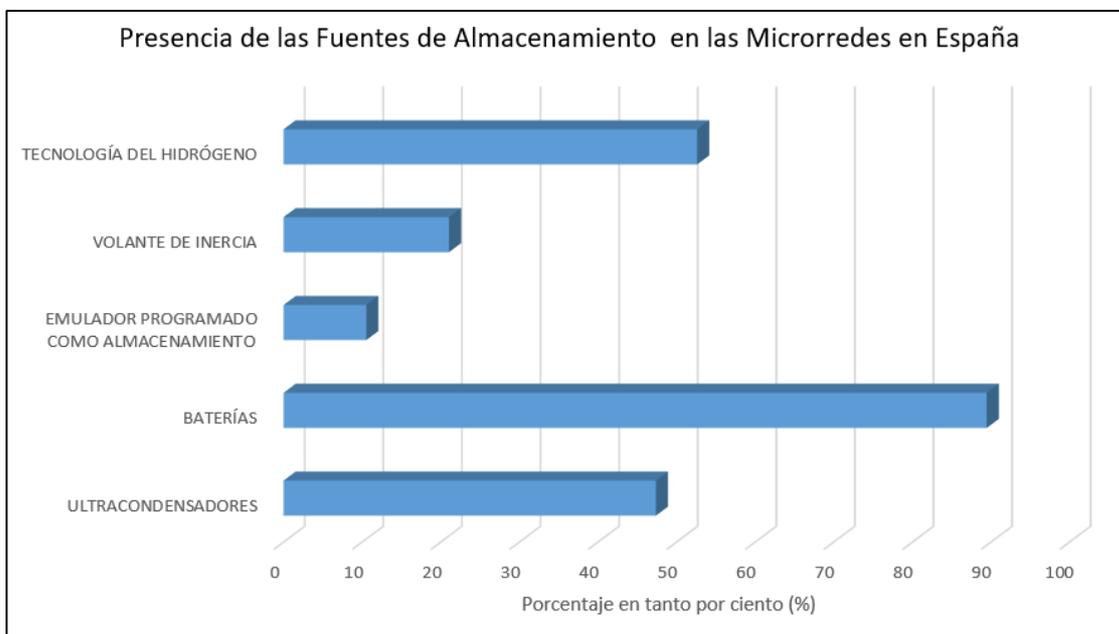
Es por ello que se decide excluir en un segundo análisis. Los resultados de este análisis se muestran en esta gráfica:



Gráfica 9 Relación Potencia Instalada Eólica vs Potencia Gestionada por la microrred excluyendo grandes microrredes

## 4.2 Fuentes de almacenamiento presentes en las microrredes de España

La siguiente gráfica muestra los tipos de equipos de almacenamiento presentes en las microrredes de España, donde se muestra el porcentaje de presencia de cada tipo de tecnología. Como ejemplo, se observa que aproximadamente el 90% de las microrredes de España presenta baterías entre sus sistemas de almacenamiento.

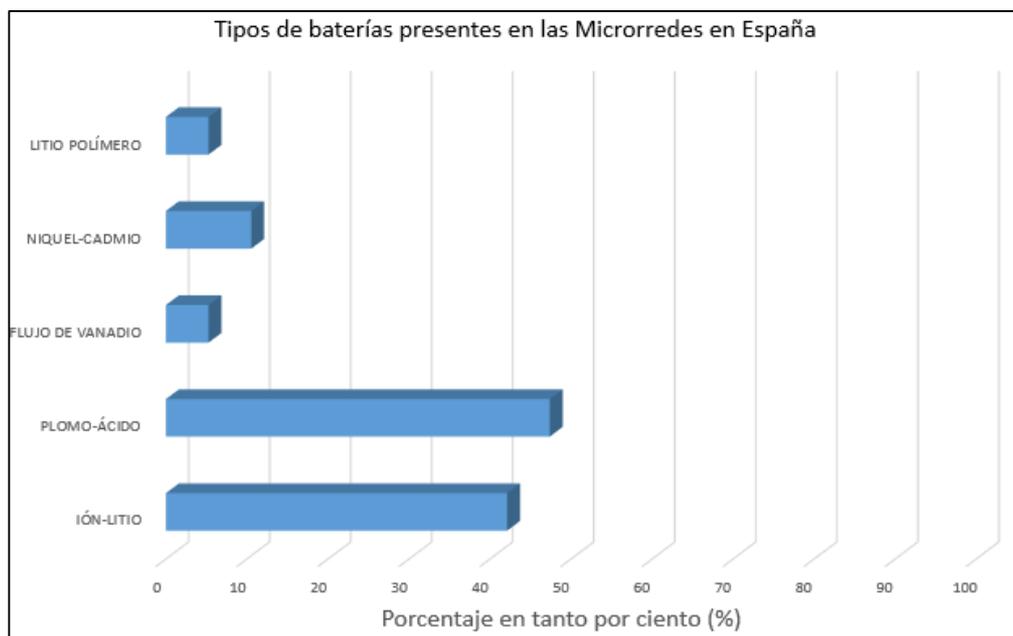


Gráfica 10 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Almacenamiento por tipología en las microrredes españolas

### 4.2.1 Tipos de baterías

La siguiente gráfica muestra los tipos de baterías presentes en las microrredes de España, donde se muestra el porcentaje de presencia de cada tipo de batería. Como ejemplo, se observa que aproximadamente el 40% de las

microrredes españolas poseen baterías de Ión-Litio.

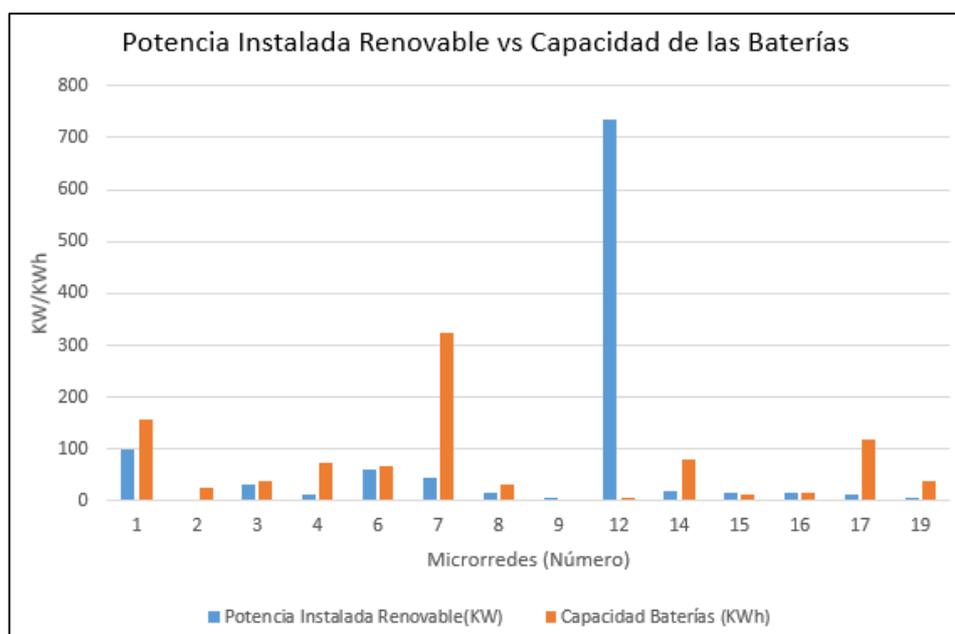


Gráfica 11 Porcentaje de Presencia de Baterías por tipología en las microrredes españolas

#### 4.2.2 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de las baterías.

Para la obtención de esta relación, se ha tenido en cuenta aquellas microrredes que presentaban equipos renovables (sin incluir los emuladores de generación).

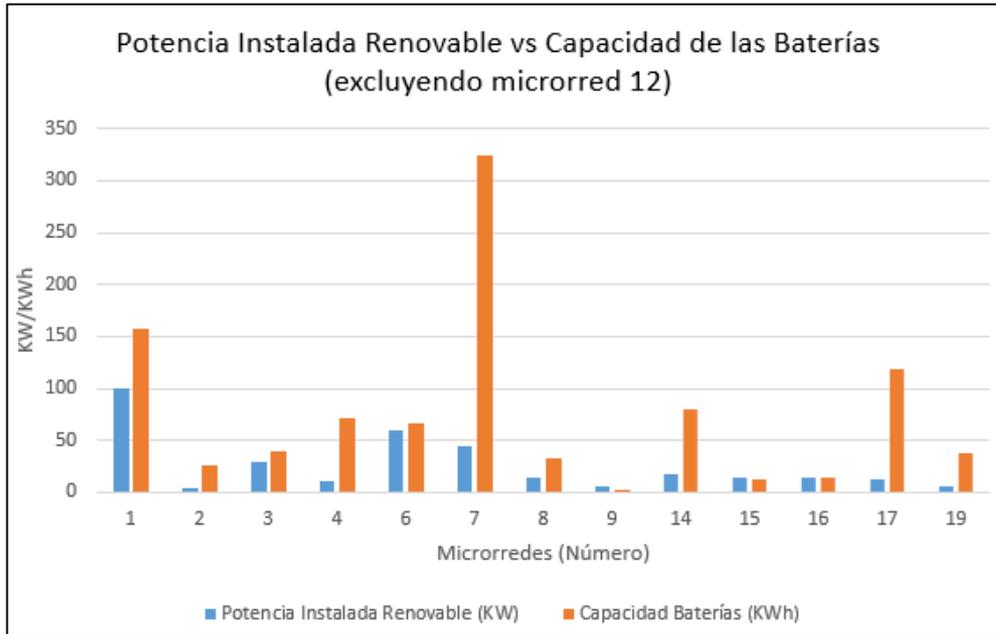
El siguiente gráfico de barras representa la potencia instalada renovable (kW) y la capacidad de las baterías (kWh) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred.



Gráfica 12 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de las Baterías (kWh) de las microrredes españolas

Se puede apreciar que la microrred número 12 destaca sobre las demás debido a que la diferencia entre la

potencia instalada renovable y la capacidad de las baterías es bastante alta. Esto es debido a que usa como principal fuente de almacenamiento la tecnología del hidrógeno, siendo las baterías un método auxiliar pero no representativo. Es por ello que se ha decidido excluir en un segundo estudio con la finalidad de obtener unos resultados más fiables.

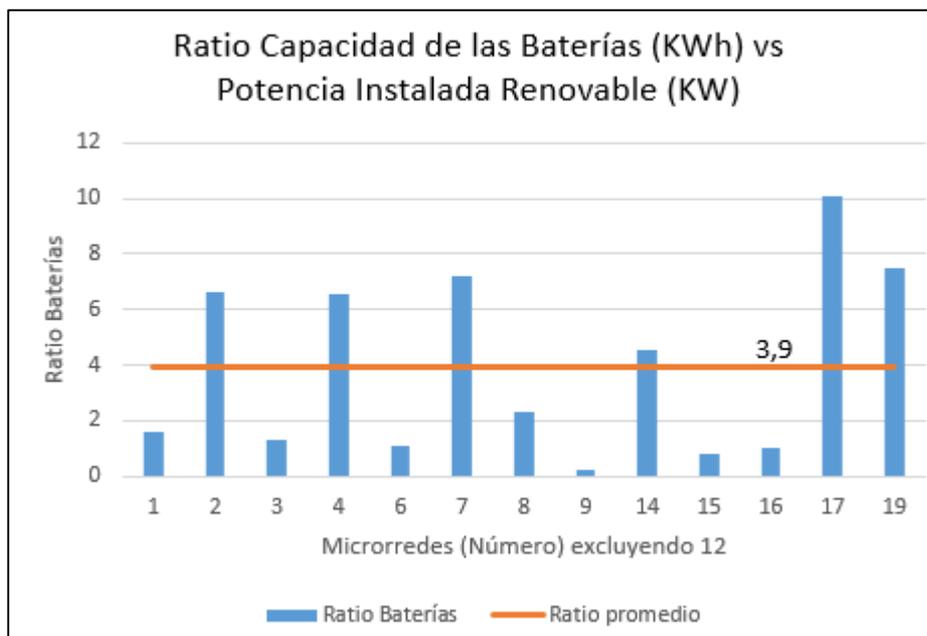


Gráfica 13 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de las Baterías (kWh) de las microrredes españolas (excluyendo microrred 12)

A continuación, se calcula un ratio que representa la relación de tamaño entre la capacidad de las baterías y la potencia instalada renovable. Este ratio se ha obtenido de la siguiente forma:

$$Ratio_{Baterías} = \frac{P_{instalada\ renov} (KW)}{C_{Baterías} (KWh)}$$

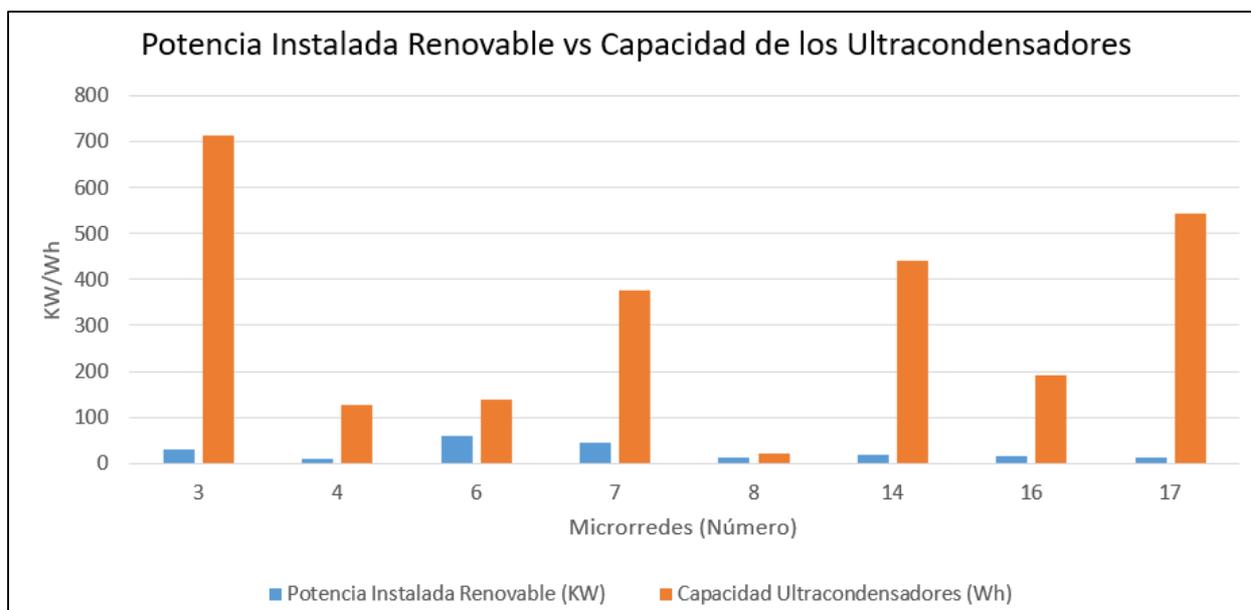
Los resultados de los ratios se presentan en la siguiente gráfica. Al igual que en los anteriores apartados, se ha añadido una línea representativa del valor promedio de estos ratios.



Gráfica 14 Ratio de Capacidad de las Baterías vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas excluyendo microrred 12.

#### 4.2.3 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de los ultracondensadores

A diferencia de las baterías, la capacidad de los ultracondensadores se expresa en Wh y suelen tener mucha menor capacidad que éstas. A continuación, se muestra un gráfico donde se representa la potencia instalada renovable (kW) y la capacidad de los ultradondensadores (Wh) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza al nombre de la microrred.



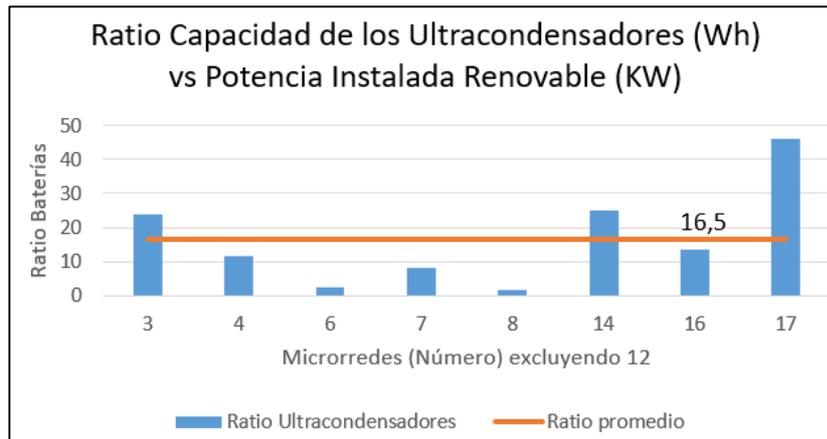
Gráfica 15 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Ultracondensadores (Wh) de las microrredes españolas

Se calcula el ratio que representa la relación de tamaño entre la capacidad de los ultracondensadores y la potencia instalada renovable. Este ratio se ha obtenido de la siguiente forma:

$$Ratio_{ultracondensadores} = \frac{C_{ultracondensadores} (Wh)}{P_{instaladarenov} (KW)}$$

Con respecto a los anteriores ratios, se puede observar que disciernen bastante las unidades de medida de cada parámetro. Es por ello que se debe considerar este ratio de manera cualitativa. Este ratio permite estimar cuanto excede la capacidad de los ultracondensadores (en Wh) a la potencia instalada renovable (en KW).

Los resultados de los ratios se presentan en la siguiente gráfica. Al igual que en los anteriores apartados, se ha añadido una línea representativa del valor promedio.



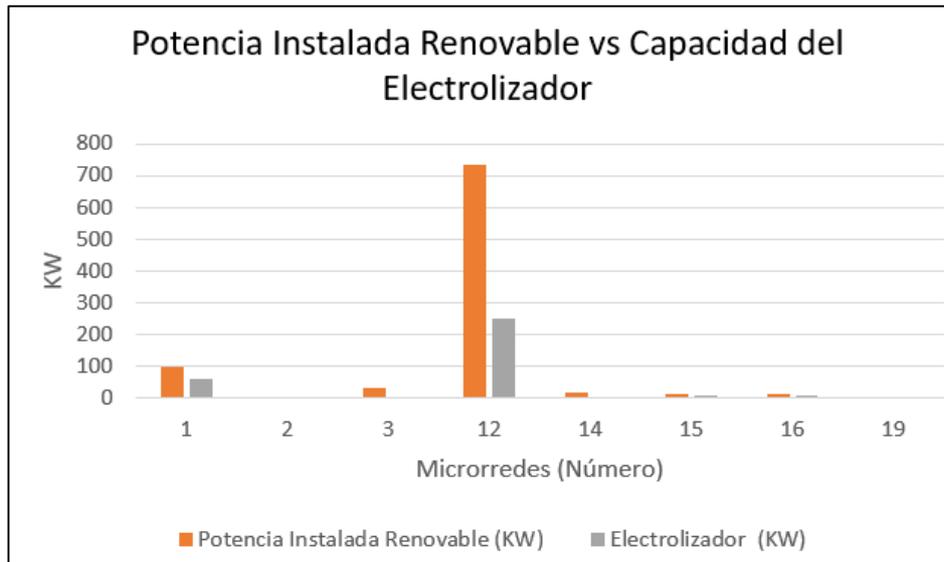
Gráfica 16 Ratio de Capacidad de los Ultracondensadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas

#### 4.2.4 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la tecnología del hidrógeno

##### 4.2.4.1 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad del electrolizador

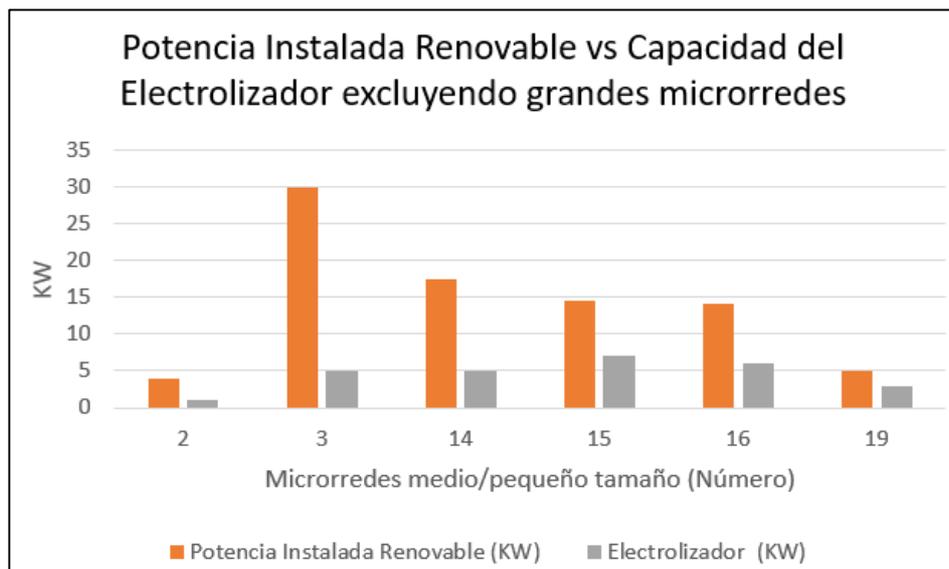
Al igual que en los apartados anteriores, para la obtención de esta relación se ha tenido en cuenta aquellas microrredes que presentaban equipos renovables (sin incluir los emuladores de generación) y que presentaban la tecnología de almacenamiento del hidrógeno.

El siguiente gráfico de barras representa la potencia instalada renovable (KW) y la capacidad del electrolizador (KW) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza los nombres de las microrredes.



Gráfica 17 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Electrolizadores (KW) de las microrredes españolas

Para observar mejor los valores del resto de microrredes, se decide en un segundo análisis obviar las grandes microrredes.

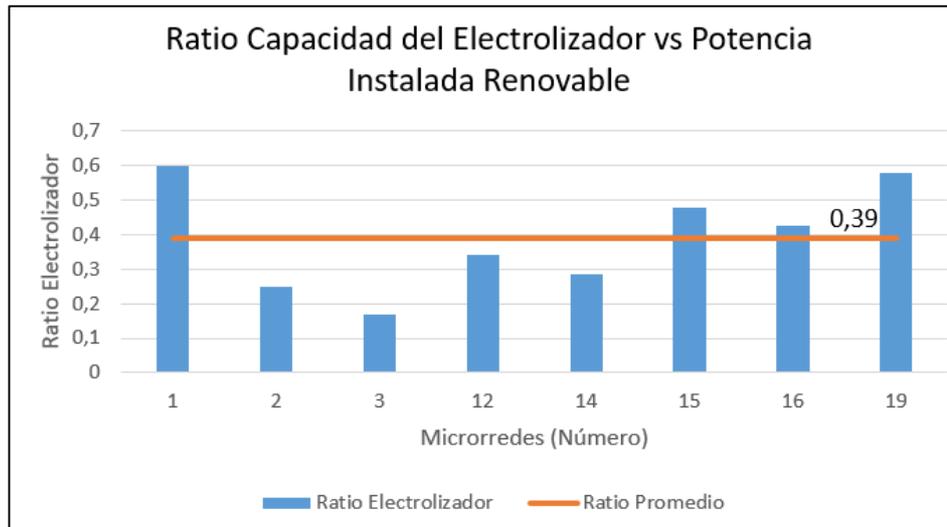


Gráfica 18 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de los Electrolizadores (KW) de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes

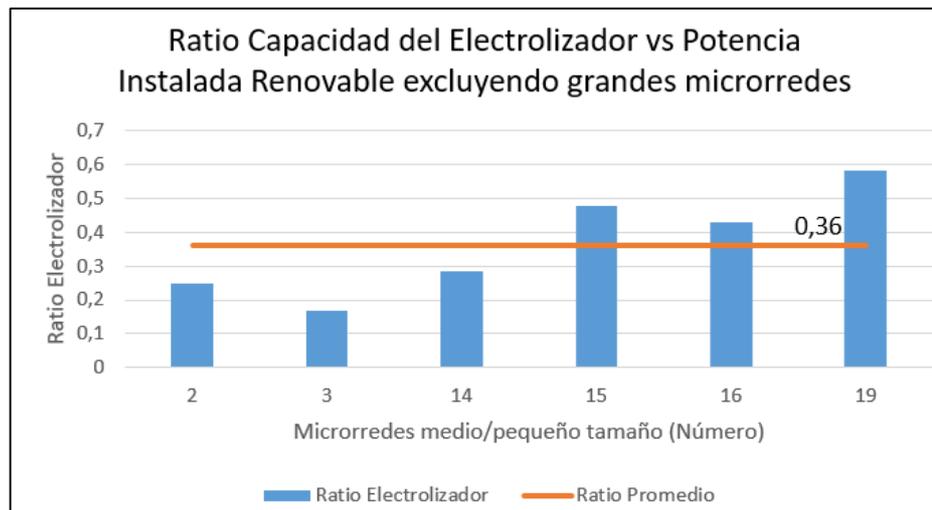
Se calcula el ratio que representa la relación de tamaño entre la capacidad de los electrolizadores y la potencia instalada renovable. Este ratio se ha obtenido de la siguiente forma:

$$Ratio_{electrolizadores} = \frac{C_{electrolizadores} (KW)}{P_{instaladarev} (KW)}$$

Los resultados de los ratios se presentan en la siguiente gráfica. Al igual que en los anteriores apartados, se ha añadido una línea representativa del valor promedio de estos ratios.



Gráfica 19 Ratio de Capacidad de los Electrolizadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas



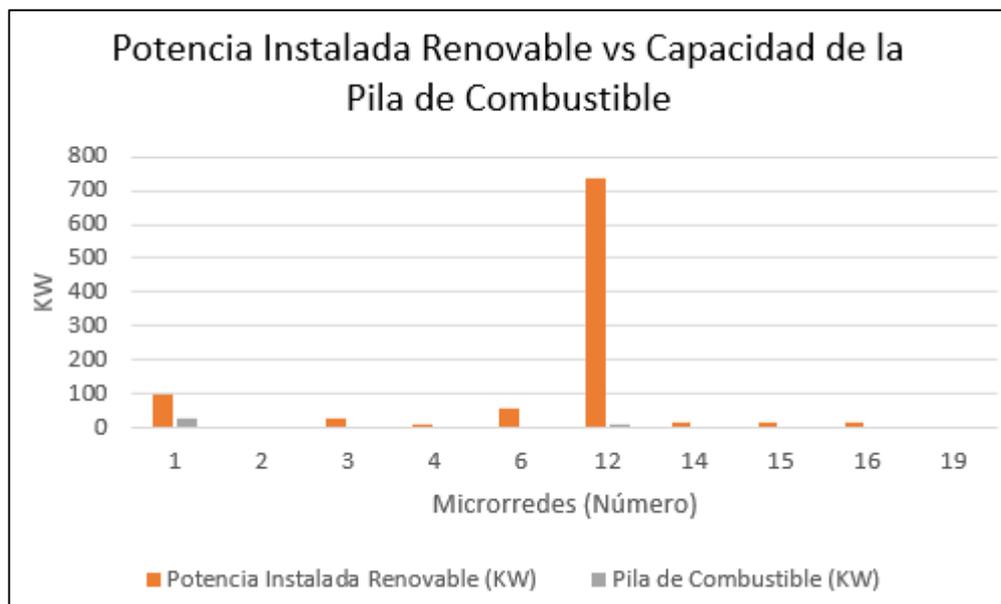
Gráfica 20 Ratio de Capacidad de los Electrolizadores vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas

Con respecto a las anteriores apartados, se puede observar que no disciernen los ratios promedios de ambos análisis (con y sin grandes microrredes).

#### 4.2.4.2 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de la pila de combustible

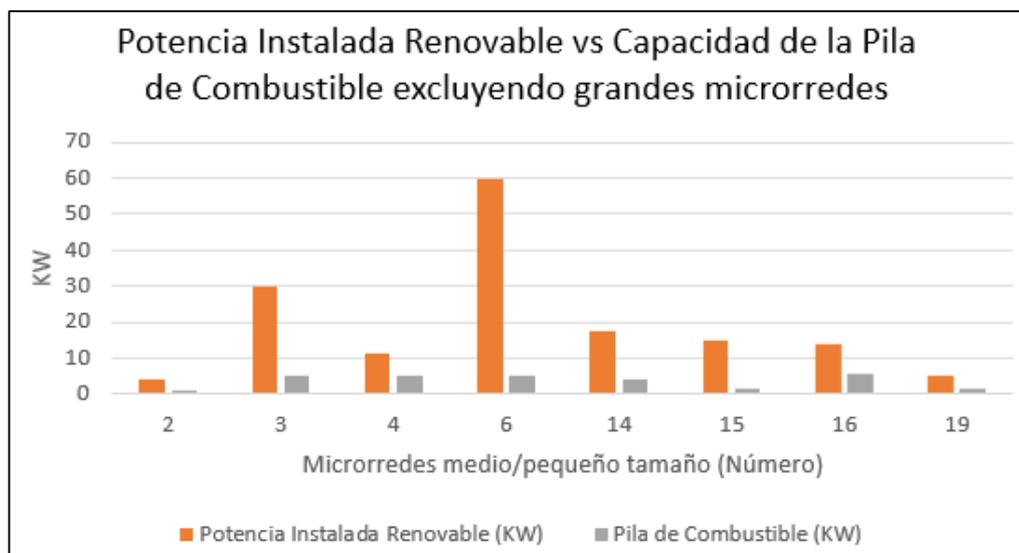
Para la obtención de esta relación se ha tenido en cuenta aquellas microrredes que presentaban equipos renovables (sin incluir los emuladores de generación) y que presentaban la tecnología de almacenamiento del hidrógeno.

El siguiente gráfico de barras representa la potencia instalada renovable (kW) y la capacidad de la pila de combustible (kW) en el eje vertical mientras que en el eje horizontal aparece el número que enlaza los nombres de las microrredes.



Gráfica 21 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de la Pila de Combustible (KW) de las microrredes españolas

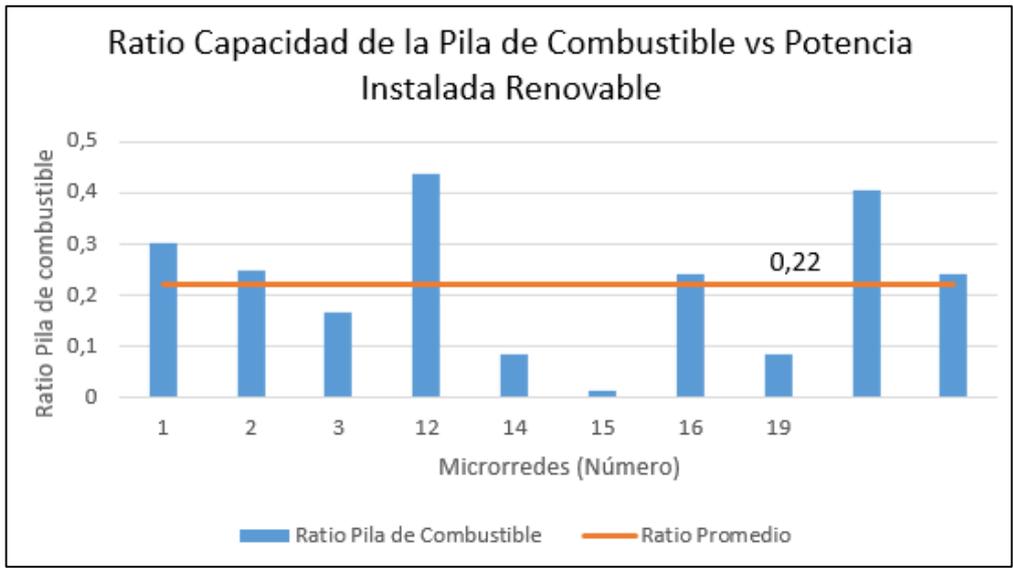
Siguiendo el mismo procedimiento que en otros apartados, en un segundo análisis se obvian las grandes microrredes.



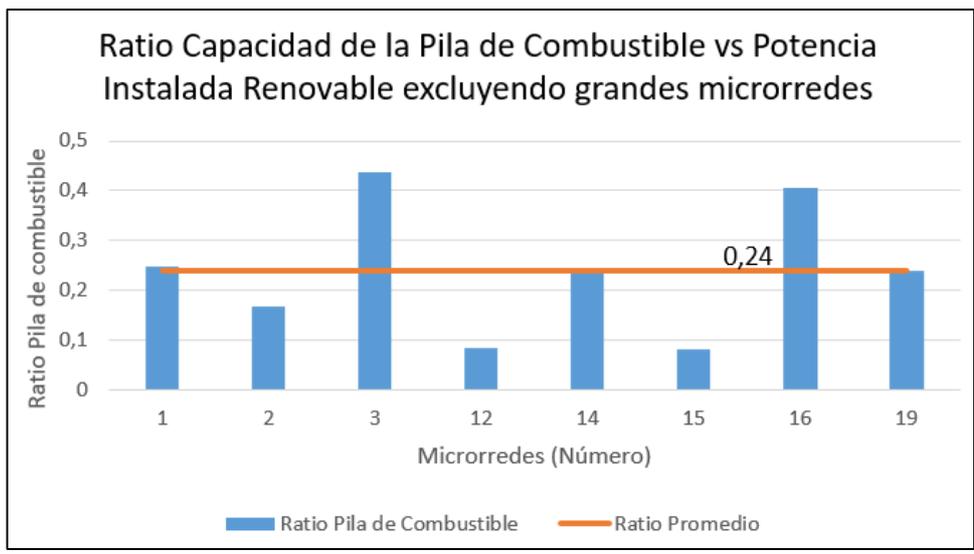
Gráfica 22 Potencia Instalada Renovable (KW) y Capacidad de la Pila de Combustible (KW) de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes

Se calcula el ratio que representa la relación de tamaño entre la capacidad de las pilas de combustible y la potencia instalada renovable. Este ratio se ha obtenido de la siguiente forma:

$$Ratio_{pila\ de\ combustible} = \frac{C_{pila\ de\ combustible} (KW)}{P_{instaladarenov} (KW)}$$



Gráfica 23 Ratio de Capacidad de la Pila de Combustible vs Potencia Instalada Renovable de las microrredes españolas

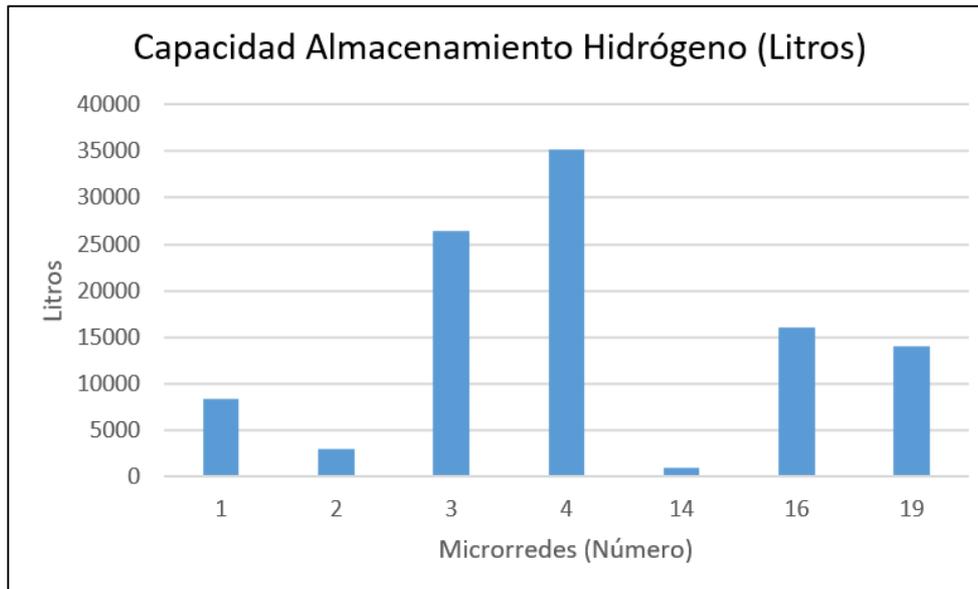


Gráfica 24 Ratio de Capacidad de la Pila de Combustible vs Potencia instalada Renovable de las microrredes españolas excluyendo grandes microrredes

Con respecto a las anteriores apartados, se puede observar que no disciernen los ratios promedios de ambos análisis (con y sin grandes microrredes).

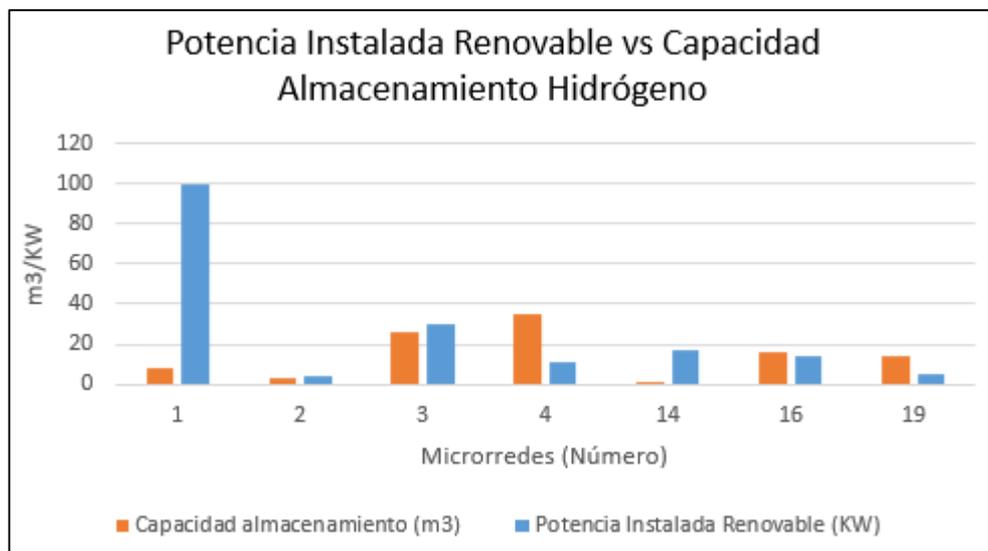
**4.2.4.3 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y la capacidad de la pila de combustible**

A continuación, se muestra una gráfica que donde se observa el tamaño de los tanques de hidrógenos (en litros) presentes en las microrredes españolas. En este caso, el número de microrredes mostradas es inferior a los anteriores apartados debido a que no se han podido obtener datos del resto sobre la capacidad de almacenamiento de sus tanques de hidrógeno.



Gráfica 25 Tamaño de los tanques de hidrógeno (en litros) de las microrredes españolas

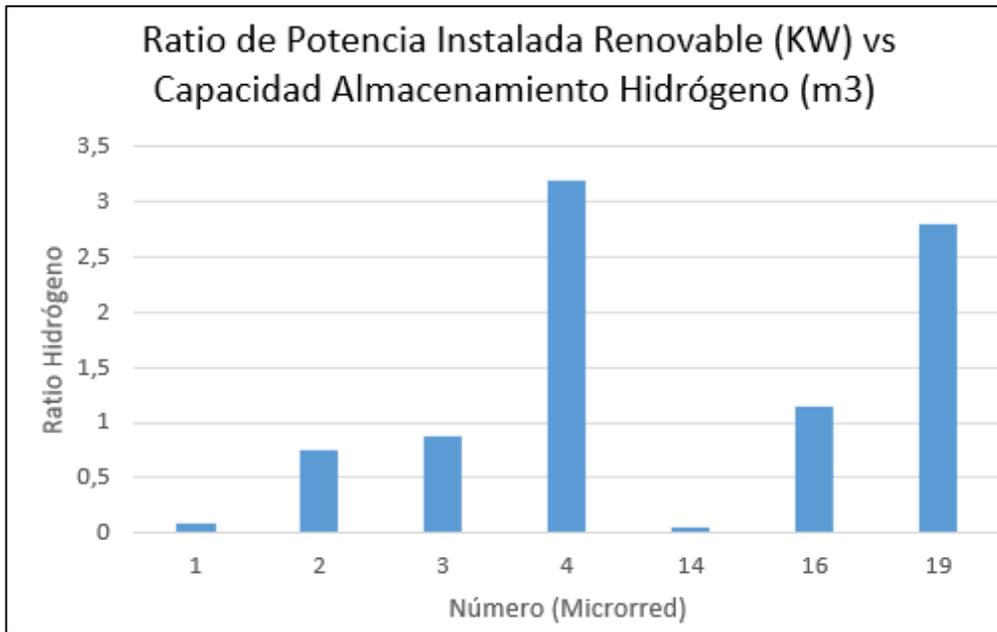
Por comodidad a la hora de realizar comparaciones con la potencia instalada, se expresará la capacidad de almacenamiento de los tanques de hidrógeno en metros cúbicos.



Gráfica 26 Potencia Instalada Renovable vs Capacidad de Almacenamiento de Hidrógeno de las microrredes españolas

A continuación, se calcula el ratio que representa la relación de tamaño entre la capacidad de los tanques de hidrógeno y la potencia instalada renovable. Este ratio se ha obtenido de la siguiente forma:

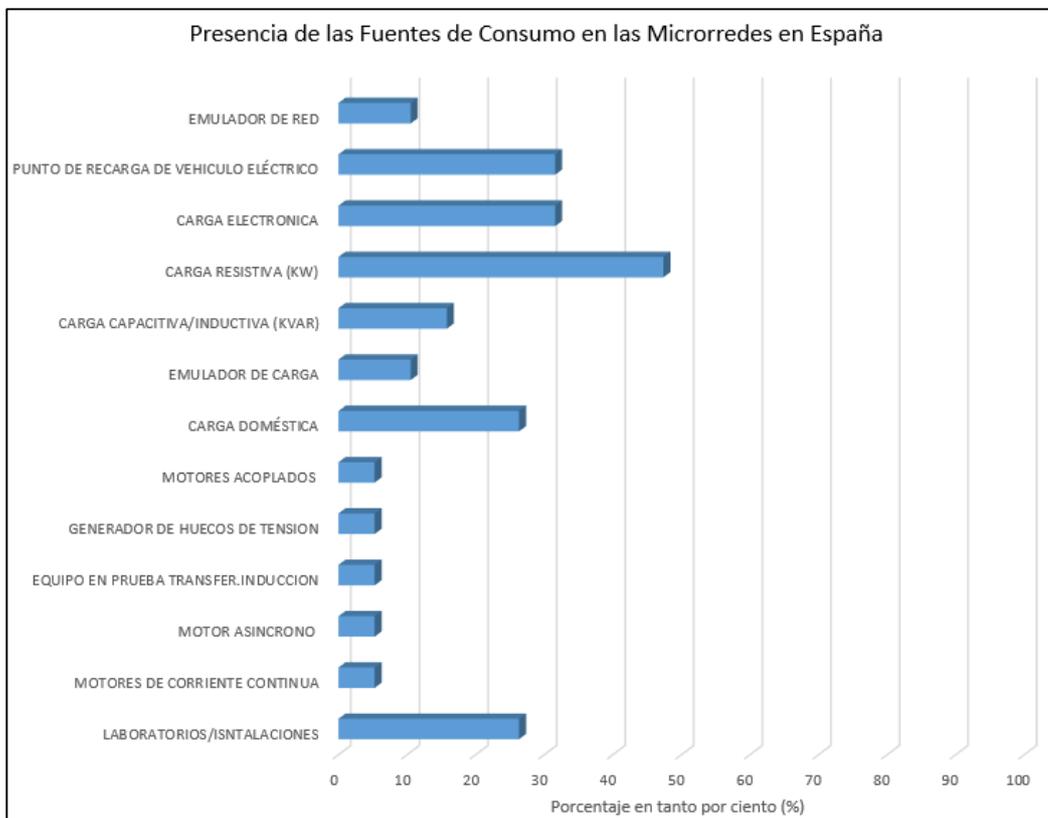
$$Ratio_{Hidrógeno} = \frac{P_{instalada\ renov} (KW)}{C_{Tanques\ Hidrógeno} (m^3)}$$



Gráfica 27 Ratio de Potencia instalada Renovable vs Capacidad de Almacenamiento de Hidrógeno de las microrredes españolas

### 4.3 Fuentes de consumo presentes en las microrredes de España

La siguiente gráfica muestra los tipos de equipos de consumo presentes en las microrredes de España, donde se muestra el porcentaje de presencia de cada tipo de tecnología. Como ejemplo, se observa que aproximadamente el 45% de las microrredes de España presenta cargas resistivas.



Gráfica 28 Porcentaje de Presencia de Fuentes de Generación por tipología en las microrredes españolas

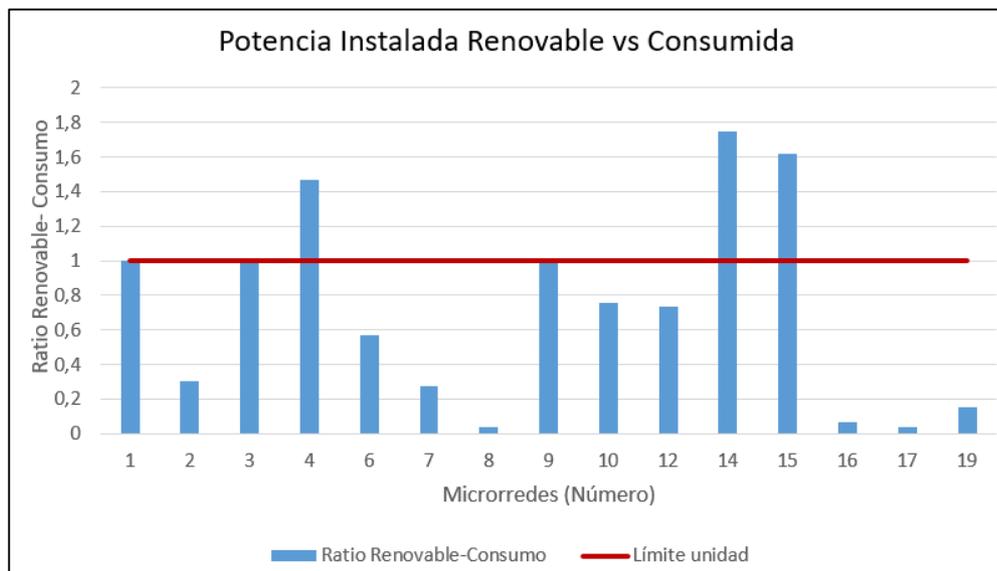
Previo a los siguientes apartados:

- La potencia de consumo va referido a la suma de la potencia de todos los equipos que actúan como cargas en la microrred, es decir, a la potencia instalada de consumo (que correspondería al consumo de la microrred si todos estos equipos consumieran su máxima potencia a la vez).
- El límite unidad representado en la gráfica indica el valor uno. Este límite será utilizado en el siguiente apartado para obtener las conclusiones de los análisis.

#### 4.3.1 Relación entre potencia instalada de los equipos renovables y de los equipos de consumo de la microrred

En la gráfica se representa el ratio renovable-consumo, referido a la división de la potencia total instalada de equipos renovables y la potencia instalada de consumo:

$$Ratio_{Renovable-Consumo} = \frac{P_{instalada\ renov}(KW)}{P_{instalada\ consumo}(KW)}$$

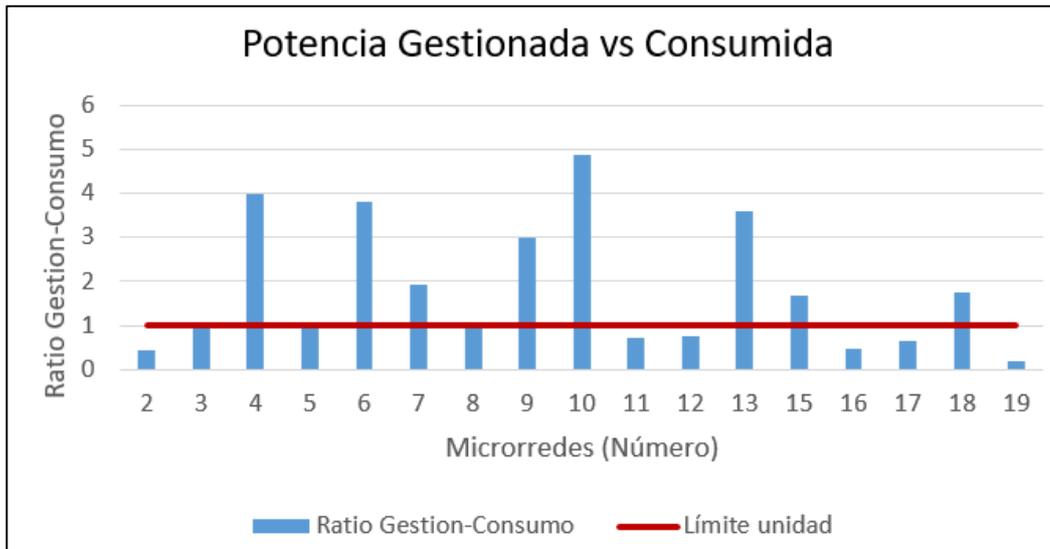


Gráfica 29 Ratio de Potencia instalada Renovable vs Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas

#### 4.3.2 Relación entre potencia gestionada por la microrred y la potencia instalada de los equipos de consumo de la microrred

En la gráfica se representa el ratio gestionada-consumo, referido a la división de la potencia gestionada y la potencia instalada de consumo:

$$Ratio_{Gestionada-Consumo} = \frac{P_{gestionada}(KW)}{P_{instalada\ Consumo}(KW)}$$

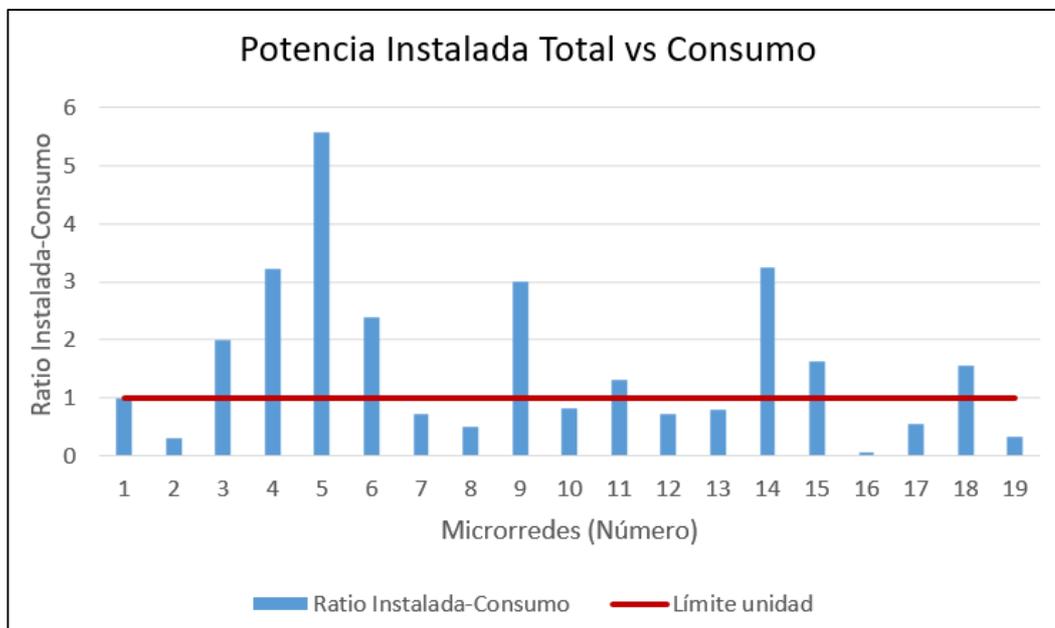


Gráfica 30 Ratio de Potencia gestionada vs la potencia instalada de consumo de las microrredes españolas

### 4.3.3 Relación entre potencia instalada de los equipos de generación y de los equipos de consumo de la microrred

En la gráfica se representa el ratio instalada-consumo, referido a la división de la potencia instalada total de generación (incluyendo no renovables) y la potencia instalada de consumo:

$$Ratio_{Instalada-Consumo} = \frac{P_{instaladatotal}(KW)}{P_{instaladaConsumo}(KW)}$$

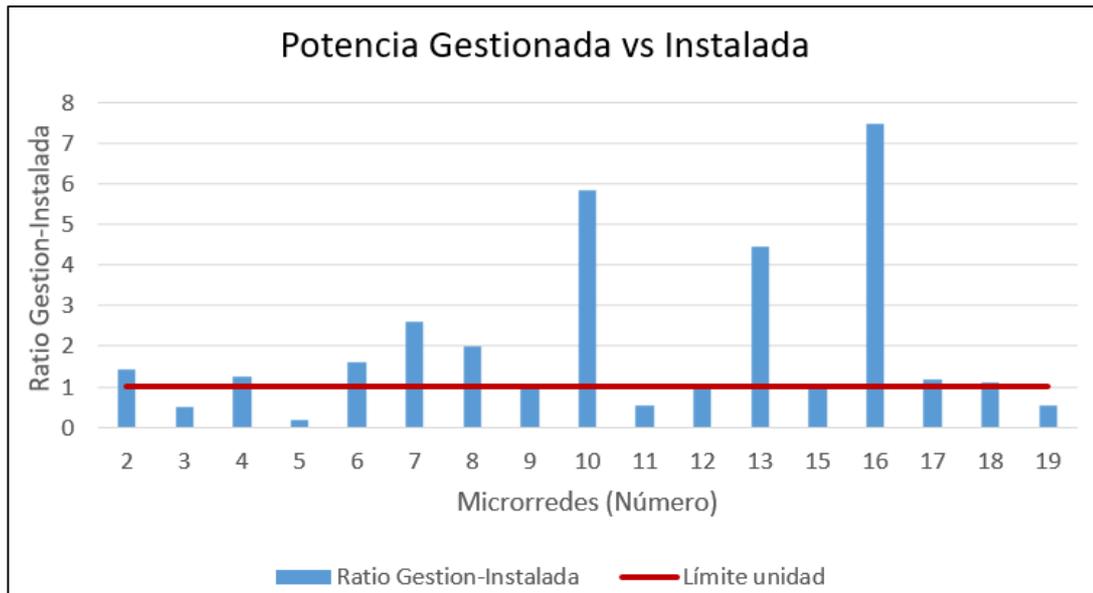


Gráfica 31 Ratio de Potencia instalada de generación vs la Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas

#### 4.4 Relación entre la potencia gestionada y potencia instalada de generación de las microrredes de España

En la gráfica se representa el ratio gestionada-instalada, referido a la división de la potencia gestionada por la microrred y la potencia instalada de generación total:

$$Ratio_{Instalada-Consumo} = \frac{P_{gestionada}(KW)}{P_{instaladatotal}(KW)}$$



Gráfica 32 Ratio de Potencia instalada de generación vs la Potencia instalada de consumo de las microrredes españolas

## 5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

---

A continuación, se recogen las conclusiones obtenidas en el análisis estadístico del dimensionado de las microrredes españolas:

- Las fuentes de generación por excelencia de las microrredes españolas son la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Esta conclusión es bastante obvia ya que el objetivo de las microrredes es garantizar la seguridad del suministro a partir de una producción sostenible (con el mínimo impacto ambiental). Esto solo es posible basando la generación de las microrredes en energías renovables. (Apartado 4.1.)
- La potencia solar fotovoltaica instalada media de las microrredes españolas es de 15 KW (sin contar las grandes microrredes). Esta última aclaración va referida a que de este análisis se obtiene la conclusión de que existen dos microrredes (1 y 12) que por sus dimensiones destacan sobre las demás. Estas microrredes deben su dimensión a que están diseñadas para alimentar grandes laboratorios e instalaciones. Con la finalidad de dar un valor realista promedio, se han excluido a la hora de calcular este dato. (Apartado 4.1.1.1.)
- Sin contar las grandes microrredes, al igual que en el apartado anterior para dar un valor medio realista, se concluye que la potencia eólica instalada media es de 7,5 KW. (Apartado 4.1.1.2.)

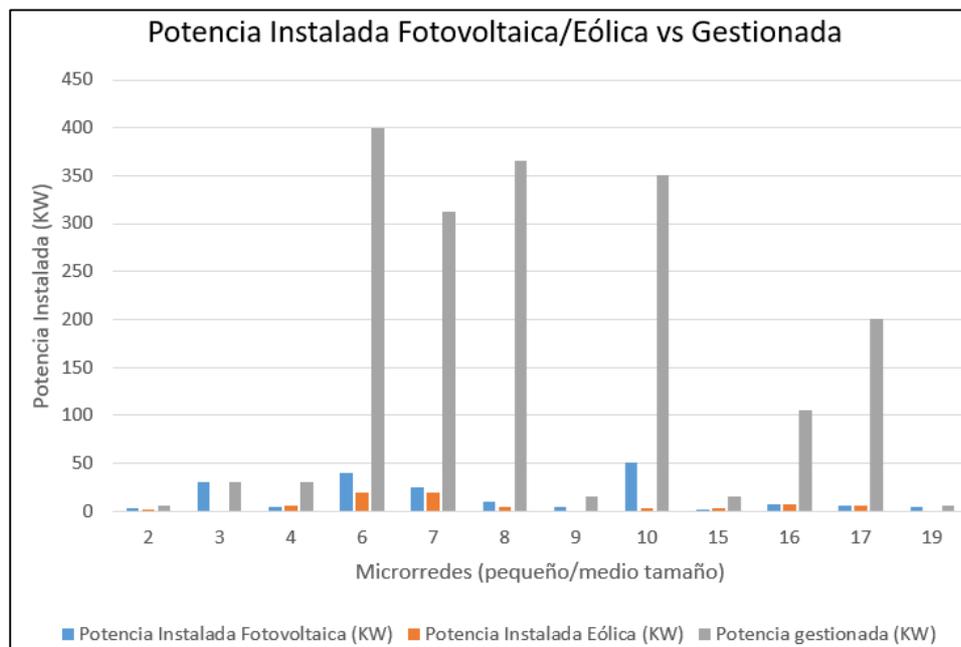
Recordando los datos del apartado 2.2.1 de este proyecto, la energía eólica es la segunda fuente de generación eléctrica peninsular. Por ello, es fácil pensar que el tamaño de la potencia instalada de estas fuentes de energía crecerá en un futuro próximo en las microrredes españolas. Esto se conseguirá adaptando los parques eólicos existentes en España al concepto de microrred. Un ejemplo de ello es la gran microrred 12, perteneciente a la Fundación Hidrógeno Aragón. Esta microrred con tan solo tres aerogeneradores (procedentes del “repowering” de otros parques eólicos) tiene una potencia instalada eólica mayor a 600 KW. Sin embargo, grandes potencias suponen grandes retos en relación a la electrónica implicada en el control de las microrredes. Con los avances en este campo a lo largo de los años, se conseguirá transformar estos parques eólicos en microrredes.

- Según el ratio que relaciona potencia instalada de energía fotovoltaica y la gestionada por la microrred, tener un valor de este ratio mayor que 1 implicaría no poder gestionar toda la potencia solar máxima que puede producir la instalación (es decir, que todas las placas fotovoltaicas estén dando el 100% de su potencia a la vez). Como se puede observar en la gráfica 6 del apartado 4.1.2.1., ninguna supera este valor. El valor promedio es 0,27 (bastante alejado de este límite). Esto

sería indicativo de que el sistema de control puede gestionar bastante bien los picos de producción de energía solar de manera general.

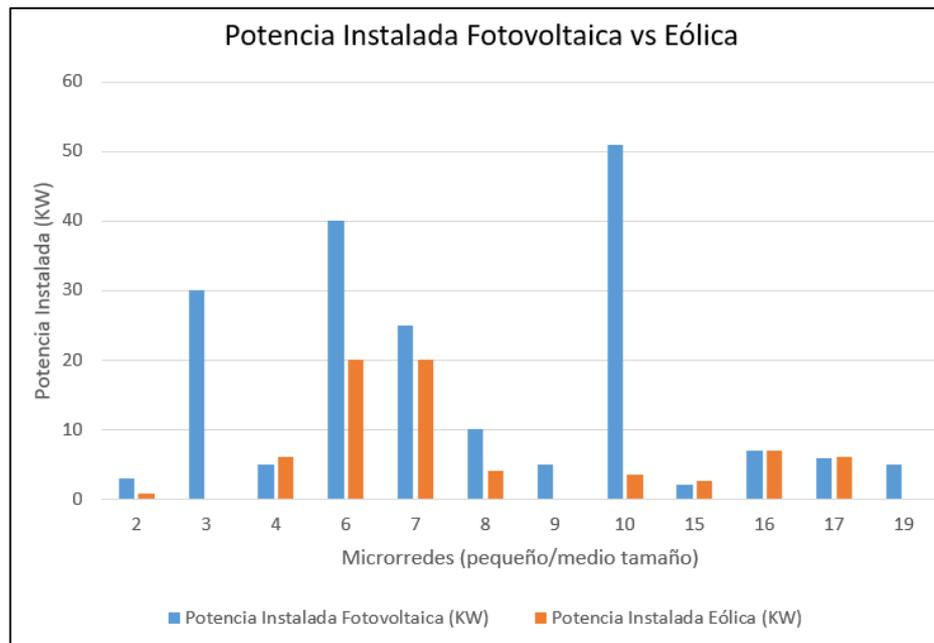
Al igual que en el caso anterior, en el caso donde se relaciona potencia instalada de energía eólica y la gestionada por la microrred, tener un valor de este ratio mayor que 1 implicaría no poder gestionar toda la potencia eólica máxima que puede producir la instalación. (Apartado 4.1.2.2.). A diferencia del caso anterior, se excluye la microrred número 12 debido a la diferencia de valores con el resto de microrredes. Esto es debido a que la microrred número 12 excepcionalmente tiene siete veces más potencia instalada eólica que solar. Entonces, incluyendo la microrred 12 se concluye un ratio de 0,16 mientras que excluyéndola se puede concluir que el ratio es 0,08.

Como conclusión, la razón entre la diferencia de valores entre la solar y la eólica se debe a que la potencia instalada eólica es más baja por lo general que la solar. Desde el punto de vista del dimensionamiento de la potencia gestionada por la microrred; esto quiere decir que el punto de mira va a estar situado en el lado de la máxima producción de potencia solar antes que en el lado de la máxima producción de potencia eólica (por el tamaño de la potencia instalada). Para ello observemos las siguientes gráficas, que se han representado solo aquellas microrredes de las cuales tenemos datos de su potencia gestionada. (Se ha excluido la microrred 12 debido a que la diferencia de potencias hacía difícil apreciar en la gráfica el resto de microrredes).



Gráfica 33 Potencia Instalada Fotovoltaica y Eólica vs Potencia Gestionada por las microrredes españolas

Evidentemente, se observa que la mayoría de microrredes tienen la potencia gestionada bastante sobredimensionada con respecto a las producciones máximas renovables, como hemos concluido al encontrar ratios con valores alejados de 1. Además, observamos que en la mayoría de los casos la potencia instalada solar (barra azul) es mayor que eólica (barra naranja). En la siguiente gráfica, al no incluir la potencia gestionada, se puede ver más claro.



Gráfica 34 Potencia Instalada Fotovoltaica vs Potencia Instalada Eólica en las microrredes españolas

- Las fuentes de almacenamiento más utilizadas son las baterías, presentes en el 89% de las microrredes españolas. La principal razón es por su alto grado de madurez. Sin embargo, se puede observar que las nuevas tecnologías como el almacenamiento de energía mediante la tecnología del hidrógeno o por ultracondensadores están ganando bastante relevancia. (Gráfica 10, apartado 4.2.).
- Las baterías más usadas son las baterías de Plomo-Ácido, que corresponde con lo mencionado en el apartado 2 del proyecto de ser la batería recargable más utilizada. Siguiendo a las baterías de Plomo-Ácido, se encuentran las baterías de Ión-Litio. En la actualidad, estas baterías han tenido un gran desarrollo en múltiples aplicaciones como en la industria de la fabricación de teléfonos móviles y vehículos eléctricos. Además, este tipo de baterías subsanan algunos de los problemas tradicionales de las baterías de Plomo-Ácido como el bajo número de ciclos o su elevado peso. Por ello no es raro encontrarlas en la segunda posición de baterías más usadas en las microrredes españolas.
- Del “ratio baterías”, que relaciona la potencia instalada renovable con la capacidad de las baterías, se puede concluir que por norma general la potencia instalada renovable (KW) supera aproximadamente cuatro veces la capacidad de las baterías (KWh). (Apartado 4.2.1.).
- Del “ratio ultracondensadores” se concluye que la capacidad de los ultracondensadores (en Wh) excede 16 veces la a potencia instalada renovable (en KW). (Apartado 4.2.2.).

Recordar que, como se ha mencionado anteriormente, estos dos últimos ratios son más cualitativos ya que las unidades a comparar no son las mismas.

- Del “ratio electrolizadores”, que representa la relación de tamaño entre la capacidad de los electrolizadores y la potencia instalada renovable, se concluye un valor medio de 0,37. Esto implica que la potencia instalada renovable supera la capacidad del electrolizador. A diferencia de anteriores ratios, no hay una diferencia significativa excluyendo del análisis a las grandes microrredes. (Apartado 4.2.4.1.)
- Del “ratio pila de combustible” que representa la relación de tamaño entre la capacidad de las pilas de combustible y el la potencia instalada renovable, se concluye un valor medio de 0,23. Al igual que en el apartado anterior, no hay una diferencia significativa excluyendo del análisis a las grandes microrredes. (Apartado 4.2.4.2.).

- Si el “ratio renovable-consumo” (referido a la división de la potencia total instalada de equipos renovables y la potencia instalada de consumo) es mayor que la unidad, implica que pueden funcionar todos los equipos de consumo a la vez y la potencia instalada renovable cubriría ese consumo en caso de estar generando su máxima potencia. Al estar sobredimensionada la generación con respecto al consumo, hay una mayor probabilidad de almacenar energía. Generalmente se puede observar que esto no se cumple en la mayoría de las microrredes, sin embargo, sí se cumple que la mayoría de ellas tienen valores de este ratio cercanos a la unidad. (Apartado 4.3.1.).
- Si el “ratio gestionada-consumo” (referido a la división de la potencia gestionada y la potencia instalada de consumo) es mayor que la unidad, implica la microrred es capaz de gestionar el escenario en el que todos los equipos de consumo consuman la máxima potencia a la vez. Si bien más del 40% de las microrredes lo superan, el resto tiene un ratio igual o inferior pero cercano a la unidad. (Apartado 4.3.2.).
- Si el “ratio instalada-consumo” (referido a la división de la potencia instalada total de generación -incluyendo no renovables- y la potencia instalada de consumo) es mayor que la unidad, implica que la microrred con su máxima potencia de generación podría cubrir el consumo máximo de los equipos instalados. Esto se cumple para más de la mitad de las microrredes, si bien el resto se queda en valores cercanos a la unidad. La 16 presenta un valor bastante bajo, que puede ser debido a que se trata de una microrred de laboratorio con fines experimentales. (Apartado 4.3.3.).
- Si el “ratio gestionada-instalada” (referido a la división de la potencia gestionada por la microrred y la potencia instalada de generación total) es mayor que la unidad, implica que la microrred es capaz de gestionar la generación máxima de la instalación. El 76 % de las microrredes cumple con este requisito. La más alejada de él es la microrred 5, que se puede deber a que se trata de una microrred de laboratorio con fines experimentales. (4.4.).

## REFERENCIAS

1. **Australian Energy Foundation.** Australian Energy Foundation Microgrid Pilot. [Online] 2019. <https://aef.com.au/uncategorized/microgrid-pilot/>.
2. **Schneider Electric.** The green light for a new energy project in South Australia. [Online] 2019. <https://www.se.com/ww/en/work/products/medium-voltage-switchgear-and-energy-automation/news/2017/the-green-light-for-a-new-energy-project-in-south-australia.jsp>.
3. **Chauchan, Rajeev Kumar Chauchan Kalpana.** Distributed Energy Resources in Microgrids: Integration, Challenges and Optimization. s.l. : Academic Press, 2019.
4. *Frequency Control for Island Operation of Bornholm Power System.* **Seung Tae Cha, Qiuwei Wu, Haoran Zhao, Chengshan Wang.** s.l. : Energy Procedia, 2014.
5. *Microgrid in China: A review in the perspective of application.* **Pengbang Wei, Weidong Chen.** s.l. : Energy Procedia, 2018.
6. *A review of microgrid development in the United States – A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools.* **Wei Feng, Ming Jin Xu Liu, Yi Bao, Chris Marnay, Cheng Yao, Jiancheng Yu.** s.l. : Applied Energy, 2018.
7. **Sung-Young Kim, John Alwyn Mathews.** Korea's Greening Strategy: The role of Smart Microgrids. *The Asia-Pacific Journal.* 2017.
8. *12 years operation of the Gaidouromantra Microgrid in Kythnos island, COI-3869.* **Tselepis, Stathis.** 2012.
9. *Recent development in microgrids and example cases around the world- A review.* **Taha Selim Ustun, Cagil Ozansoy, Aladin Zayegh.** s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
10. **Criado, Mónica López-Tafall.** *Análisis de la Viabilidad de la Implantación de Micro Redes en España. Consideraciones técnicas, Regulatorias y Económicas.* Madrid : Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad Pontificia de Comillas, 2018.
11. *Smart grid lab research in Europe and beyond.* **Luca Lena Jansen, Nikoleta Andreadou, Loulia Papaioannou, Antonios Marinopoulos.** s.l. : International Journal of Energy Research, 2020.
12. **The Boston Consulting Group.** *Development of Smart Grids in Spain.* 2012.
13. **Marta Poncela Blanco, Giuseppe Prettico, Nikoleta Andreadou, Miguel Olariaga Guardiola, Gianluca Fulli, Catalin-Felix Covrig.** *Smart Grids Laboratories Inventory.* s.l. : Joint Research Centre, 2015.
14. **Carlos Bordons, Félix García-Torres, Luis Valverde.** *Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable.* s.l. : Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial ELSEVIER, 2015.
15. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE GmbH.** *Photovoltaics Report.* 2020.
16. **Eléctrica, Máster en Sistemas de Energía.** *Apuntes de solar y eólica.* s.l. : Máster en Ingeniería Industrial, Universidad de Sevilla, 2020.
17. **Guamán Sánchez, Cristian Fernando.** *Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la empresa eléctrica regional Centro Sur.* s.l. : Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Ingeniería Energética, 2017.

18. **(GWEC), Global Wind Energy Council.** Asociación Empresarial Eólica . *La Energía eólica en el mundo.* [Online] 2020. <https://www.aeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo>.
19. **Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico REVE.** La energía solar fotovoltaica en España . [Online] 2020. <https://www.evwind.com/2020/01/17/la-energia-solar-fotovoltaica-en-espana/>.
20. **U.S. Department of Energy.** Fuel Cells. [Online] 2010. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>.
21. *El hidrógeno como almacén energético. Aplicación de la pila de combustible reversible polimérica.* **M<sup>o</sup>Del Carmen Clemente Jul, Manuel Montes Ponce de León, Carlos Fúnes Guerra.** s.l. : Anales de la Real Academia de Doctores de España, 2010.
22. **Mudathir Funsho Akorede, Hashim Hizam, Edris Pouresmaeil.** Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews ELSEVIER.* 2010.
23. **IDAE.** *Minicentrales Hidroeléctricas.* s.l. : Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, 2006.
24. *Overview of current development in electrical energy storage.* **Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke.** s.l. : Applied Energy, ELSEVIER, 2015.
25. *Microrred con sistemas de almacenamiento híbrido (baterías de gel e hidrógeno) del centro nacional de hidrógeno.* **Carlos Fúnez Guerra, Beatriz Nieto Calderón, María Jaén Caparrós, Emilio Nieto Gallego.** IV Congreso Smart Grids : SmartGridsinfo.es, 2018.
26. *Laboratorio de Microrredes CNH2, Plataforma Experimental para el prototipado rápido de soluciones de almacenamiento híbrido de energía.* **Felix García Torres, Daniel Hidalgo Serrano, Jesus Javier Martín Perez, Carlos Merino Rodríguez.** III Congreso Smart Grids : SmartGridsinfo.es, 2016.
27. **Centro Nacional del Hidrógeno.** Microgrids Laboratory. [Online] 2020. <https://www.cnh2.es/en/cnh2/laboratorio-de-microrredes/>.
28. **Institute of Smart Cities UPNA.** Infraestructura Científica del ISC: Microrred de UPNA. [Online] 2020. <https://www.unavarra.es/isc/investigacion/infraestructura-cientifica?languageId=100000>.
29. **Miqueleiz, Julio M.Pascual.** *ESTRATEGIAS AVANZADAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA BASADAS EN PREDICCIÓN PARA MICRORREDES ELECTROTÉRMICAS.* Pamplona : Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Navarra (UPNA), 2015.
30. **Romeu, Silvia Marzal.** *Concepción e Integración de Arquitecturas y Protocolos de Comunicación dentro de Sistemas de Supervisión y Control de Microrredes Inteligentes.* Valencia : Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Valencia, 2019.
31. **Jema Energy .** *i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa.* 2012.
32. **TKnika (Centro de Investigación e Innovación aplicada para la FP en Euskadi).** *Micro Red i-Sare.* 2017.
33. *Diseño de la microred inteligente I-Sare.* **Jema Energy S.A. : Giovanna Santamaría, Luis Galo Corzo, Leire Arrizubieta, Eneko Sansinenea, Iñigo Cuevas, Ibón Cerro, Iker Martínez, Ana Aizpuru.** Madrid : II Congreso Smart Grids; SmartGridsinfo.es, 2015.
34. **SmartGridsinfo.es.** i-Sare, primera microrred eléctrica inteligente de Guipúzcoa. [Online] 2014. <https://www.smartgridsinfo.es/2014/12/18/i-sare-primera-microrred-electrica-inteligente-de-guipuzcoa>.
35. **Garde, Dra. Raquel.** *Almacenamiento, integración a la red de energías renovables y redes inteligentes.* s.l. : CENER(Centro Nacional de Energías Renovables), 2015.
36. **CENER (Centro Nacional de Energías Renovables).** Microrred Atenea. [Online] 2020. <http://www.cener.com/microrred-atenea/>.
37. **CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos).** Instalaciones para la integración de las energías renovables. [Online] 2020. <https://www.fcirce.es/integracion-de-energias-renovables>.
38. **CIRCE Universidad de Zaragoza.** *Memoria de actividades 2015.* 2015.
39. **UFD DISTRIBUCIÓN ELECTRICIDAD, S.A.** Laboratorio de la UFD. [Online] 2020.

<https://www.ufd.es/en/smart-grids/laboratory/>.

40. **V. Alinguzhin, F. Mari, I. Melatti, E. Tronci, E. Ebeid, S. A. Mikkelsen, R. H. Jacobsen, J. K. Gruber, B. Hayes, F. Huerta, M. Prodanovic.** *A Glimpse of SmartHG Project Test-bed and Communication Infrastructure*. 2013.

41. *A Power-HIL microgrid testbed: Smart energy integration lab (SEIL)*. **Francisco Huerta, Milan Prodanovic, P. Matatagui.** s.l. : IEEE Industry Applications Magazine, Researchgate, 2014.

42. *Proyecto Zeohytechpark: cero emisiones mediante el uso de energías renovables e hidrógeno en parques tecnológicos*. **Jesús Simón Romeo, Fundación Hidrógeno Aragón.** s.l. : CONAMA 2012 (CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE), 2012.

43. **Foundation for the Development of New Hydrogen Technologies in Aragon.** *Zero - HyTechPark (LIFE08 ENV/E/000136)*. s.l. : LIFE+ PROJECT, 2014.

44. **Alonso, Carmen Lucia.** *Nuevos Productos y Servicios Derivados del Trading P2P para ESEs y Comercializadores*. s.l. : REGENERA (energy&environment), 2017.

45. **David Rivas (Ed.), Sindia Casado, José Manuel Martín Rapún, Sergio Ayuso Gascón, Hamada Almasalma, Jonas Engels, Sander Claeys, Geert Deconinck, Eloisa Porras Muñoz, Ari Pouttu, Tuomo Hanninen, Konstantin Mikhaylov, Juusi Haapola, Jianzhong Wu, Chenghua Z.** *Specification of test bed architectures and test planning (P2P-SMARTEST-WP6-D6.1)*. s.l. : P2P SMARTTEST (Peer to Peer Smart Energy Distribution Networks), 2015.

46. **Futured.** Ficha de descripción de capacidades científico-tecnológicas: IREC Energy SmartLab . [Online] 2018.

[http://www.futured.es/admin/resources/productos/files/39/IREC\\_Inventario\\_de\\_capacidades\\_I+D\\_FutuRED2\\_018\\_v1.pdf](http://www.futured.es/admin/resources/productos/files/39/IREC_Inventario_de_capacidades_I+D_FutuRED2_018_v1.pdf).

47. **Llerena, Fernando Isorna.** Almacenamiento y gestión de energías renovables. Instalaciones en INTA. [Online] 2018.

[https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/EVENTOS/DOCUMENTOS/04\\_presentacion\\_f\\_isorna\\_malaga\\_inta.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/EVENTOS/DOCUMENTOS/04_presentacion_f_isorna_malaga_inta.pdf).

48. **López, Ángel Durán.** *Development of a graphical simulator for microgrids with renewable energies (Final Degree Project)*. Sevilla : s.n., 2019.

49. **SmartGridsInfo.es.** Impulso al almacenamiento y gestión de renovables en áreas comerciales y residenciales con el proyecto Agerar. [Online] 2019. <https://www.smartgridsinfo.es/2019/12/12/impulso-almacenamiento-gestion-renovables-areas-comerciales-residenciales-proyecto-agerar>.

50. **INTERREG.** ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN APLICACIONES COMERCIALES Y RESIDENCIALES (BOLETÍN 2 MARZO 2019). [Online] 2019. [http://institucional.us.es/agerar/wp-content/uploads/2019/06/AGERAR\\_Boletin\\_2-ES.pdf](http://institucional.us.es/agerar/wp-content/uploads/2019/06/AGERAR_Boletin_2-ES.pdf).

51. —. ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN APLICACIONES COMERCIALES Y RESIDENCIALES (BOLETÍN 3 SEPTIEMBRE 2019). [Online] 2019. [http://institucional.us.es/agerar/wp-content/uploads/2020/05/AGERAR\\_Boletim\\_3-ES.pdf](http://institucional.us.es/agerar/wp-content/uploads/2020/05/AGERAR_Boletim_3-ES.pdf).

52. **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.** MICRORED DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA. [Online] 2020. [http://iie.webs.upv.es/labder/componentes-labder/e\)-microred](http://iie.webs.upv.es/labder/componentes-labder/e)-microred).

53. —. PRESENTACIÓN DE LABDER. [Online] 2020. <http://www.iie.upv.es/labder/presentacion-labder>.

54. **FUTURED.** LABDER. [Online] 2014. <https://www.futured.es/capacidad/?prettyUrl=labder->

55. —. Laboratorio de recursos energéticos distribuidos (LabDER). [Online] 2014. <https://www.futured.es/capacidad/?prettyUrl=laboratorio-de-recursos-energeticos-distribuidos-labder>.

56. **Redit Innovation Network.** ITE avanza en el desarrollo de Redes Inteligentes con el proyecto S-GRID. [Online] 2017. <https://www.redit.es/ite-avanza-en-el-desarrollo-de-redes-inteligentes-con-el-proyecto-s-grid/>.

57. **Instituto Tecnológico de la Energía (ITE).** Laboratorio de Interoperabilidad y Comunicaciones para Smart Devices, ITP y Smartgrids. [Online] 2020. <http://www.ite.es/laboratorios/smartgrids-e>

interoperabilidad/laboratorio-de-interoperabilidad-y-comunicaciones-para-smart-devices-itp-y-smartgrids/.

58. **Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)**. Instituto Tecnológico de la Energía Solutions for a Smart Energy World. [Online] 2020. <https://www.seimed.eu/web/content/22410>.

59. **Berkeley Lab**. TecNALIA Microgrid Laboratory. [Online] 2020. <https://building-microgrid.lbl.gov/tecnalia-microgrid-laboratory>.

60. *Microgrids integration into the distribution network*. **Eutimio Sanchez, Jon Anduaga, Asier Gil de Muro, F.J. Santiago**. s.l. : www.cigre.org (ResearchGate), 2008.

61. **TECNALIA**. Smart Grids Testing and Research Infrastructure. [Online] [https://www.tecnalia.com/images/stories/Catalogos/CAT\\_InGRID\\_EN.pdf](https://www.tecnalia.com/images/stories/Catalogos/CAT_InGRID_EN.pdf).

62. **Universidad de Oviedo**. Resources and equipment Universidad de Oviedo. [Online] 2020. <http://aecp.grupos.uniovi.es/en/transferecia/recursos>.

63. —. Universidad- Empresa Claves para Innovar Grupos de Investigación. [Online] 2014. [https://issuu.com/universidad-de-oviedo/docs/libro\\_investigaci\\_n\\_-\\_small](https://issuu.com/universidad-de-oviedo/docs/libro_investigaci_n_-_small).

64. **Sobrinó, Rubén Galera**. *Automatización de una microrred con el modelo de programación de PLCopen y gestión energética con Control Heurístico*. Universidad de Sevilla : Proyecto Fin de Master en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática, 2019.

65. **Futured Plataforma española de redes eléctricas**. *Inventario de capacidades de I+D en redes eléctricas en España*. 2014.



## ANEXO

---

Antes de mostrar las tablas, se muestra la leyenda de colores utilizada:

- Equipos de generación en celdas de color verde.
- Equipos de almacenamiento en celdas de color amarillo.
- Equipos de consumo en celdas de color azul.



NUMERO	NOMBRE	FOTOVOLTAICA	EÓLICA	BIOMASA	TURBINA DE GAS	ASÍNCRONO DOBLEMENTE ALIMENTADO	ASÍNCRONO JAULA DE ARDILLA	EMULADOR DE GENERACIÓN	SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES	FUENTE DE ALIMENTACIÓN DC	GRUPO ELECTRÓGENO
1	Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)	100									
2	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I	3,240	0,8								
3	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II	30						30			
4	Microrred de la Universidad de Navarra	5	6								13,2
5	Microrred de la Universidad de Valencia							32			
6	Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa	40	20		70						120
7	Microrred Atenea de Cener (Navarra)	25	20		30						44
8	Microrred LIER (Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE)	10	4				116		54		
9	Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE	5							10		
10	Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes	51	3,5		5,5						
11	Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente							15			40
12	Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón	100	635								
13	Microrred del IREC Energy SmartLab					4,5	4,5	4,5	4,5	27	
14	Microrred del INTA	12,5	5							15	
15	Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER	2,1	2,5	10							
16	Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE	7,037	7								
17	Microrred de Tecnalia	5,8	6		50						110
18	Microrred de la Universidad de Oviedo					15				350	90
19	Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab	5								6	

COMENTARIOS

UNIDADES EN KW  
COMA DECIMAL

Tabla 2 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (1)-Equipos de Generación

NUMERO	NOMBRE	ULTRA CONDENSADORES (Wh)	BATERÍAS (KWh)		EMULADOR PROGRAMADO (KW) COMO ALMACENAMIENTO	VOLANTE DE INERCI (KW)	TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO		
							Almacenamiento H2 (Litros)	Pila de combustible(KW)	Electrolizador(KW)
1	Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)		156,768	GEL			8300	30	60
2	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I		26,64	GEL			3000	1	1
3	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II	714	38,8	IÓN-LITIO			26400	5	5
4	Microrred de la Universidad de Navarra	125,6	72	PLOMO-ÁCIDO			35200	4,8	
5	Microrred de la Universidad de Valencia				20				
6	Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa	138,2	22	IÓN-LITIO		100		5	
			45	PLOMO-ÁCIDO					
7	Microrred Atenea de Cener (Navarra)	375	100	PLOMO-ÁCIDO DE GEL					
			200	FLUJO DE VANADIO					
			25	IÓN-LITIO					
8	Microrred LIER(Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE)	22	32,2	IÓN-LITIO					
9	Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE		1						
10	Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes								
11	Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente		55	IÓN-LITIO					
12	Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón		4,8	NIQUEL-CADMIO				10	250
13	Microrred del IREC Energy SmartLab	44	1,9	IÓN-LITIO	4,5	4,5			
			23,33	EV SEGUNDA VIDA					
14	Microrred del INTA	440	36	PLOMO-ÁCIDO			1000	4,2	5
			43	IÓN-LITIO					
15	Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER		12	PLOMO-ÁCIDO				1,2	7
16	Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE	190,4	6,29	LITIO POLÍMERO			16000	5,7	6
			8,208	NIQUEL-CADMIO					
17	Microrred de Tecnalia	541,7	92,4	PLOMO-ÁCIDO		225			
			26,88	PLOMO-ÁCIDO					
18	Microrred de la Universidad de Oviedo					10			
19	Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab		18,048	PLOMO-ÁCIDO			14000	1,2	2,9
			19,2	IÓN-LITIO					

COMENTARIOS

COMA DECIMAL

Tabla 3 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (2)- Equipos de Almacenamiento

NUMERO	NOMBRE	LABORATORIOS	MOTORES CC	MOTOR ASINCRONO	EQUIPO EN PRUEBA TRANSFER.INDUCCION	GENERADOR DE HUECOS DE TENSION	MOTORES ACOPLADOS	CARGA DOMÉSTICA	EMULADOR DE CARGA	CARGA ELECTRICA					RECARGA VEH.ELÉCTRICO	EMULADOR DE RED
										TOTAL(kva)	CARGA CAPACITIVA	CARGA RESISTIVA	CARGA ELECTRONICA			
1	Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)	100														
2	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I							8,9						2,8	1,5	
3	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II															30
4	Microrred de la Universidad de Navarra													7,5		
5	Microrred de la Universidad de Valencia											0,75	5			
6	Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa							45							60	
7	Microrred Atenea de Cener (Navarra)	38									125	53,75	112,5		11	
8	Microrred LIER(Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE)		14	134	30	45							92,5		50	
9	Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE								3				2			
10	Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes	10						7							55	
11	Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente							42								
12	Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón	1000														
13	Microrred del IREC Energy SmartLab	36							4,5				15			
14	Microrred del INTA														10	
15	Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER												9			
16	Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE						15	33			180	77,4	169,1			
17	Microrred de Tecnalia											72	200			110
18	Microrred de la Universidad de Oviedo												90	200		
19	Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab												2,5		30	

COMENTARIOS

UNIDADES EN KW  
COMA DECIMAL

Tabla 4 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (3)- Equipos de Consumo

NUMERO	NOMBRE	POTENCIA GESTIONADA (KW)
1	Microrred del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2)	
2	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental I	5,8
3	Laboratorio de microrredes del CNH2: Microrred experimental II	30
4	Microrred de la Universidad de Navarra	30
5	Microrred de la Universidad de Valencia	5,75
6	Microrred de i-Sare: La Red Inteligente de Gipuzkoa	400
7	Microrred Atenea de Cener (Navarra)	312
8	Microrred LIER (Lab. Investigación Energías Renovables Del CIRCE)	366
9	Microrred del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos de Potencia del CIRCE	15
10	Microrred del LINTER: Laboratorio de Interoperabilidad de Redes Inteligentes	350
11	Microrred del SEIL: Laboratorio de Integración de Energía Inteligente	30
12	Microrred Walqa Fundación Hidrógeno Aragón	740
13	Microrred del IREC Energy SmartLab	200
14	Microrred del INTA	
15	Microrred del Instituto de la Ingeniería Energética LABDER	15
16	Microrred del Instituto Tecnológico de la Energía ITE	105
17	Microrred de Tecnalía	200
18	Microrred de la Universidad de Oviedo	505
19	Microrred de la Universidad de Sevilla- Laboratorio de Automática Hylab	6

COMENTARIOS: COMA DECIMAL

Tabla 5 Tabla 6 Base de datos utilizada para el análisis estadístico (4)-Potencia Gestionada