

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE
LAS *SMART GRIDS***
(Study of the present situation of smart grids)

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Javier Cabeza López-Vázquez

Septiembre-2016



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Javier Cabeza López-Vázquez

Director del PFC: Jesús María Mirapeix Serrano

Título: “Estudio de la situación actual de las *smart grids*”

Title: “Study of the present situation of the smart grids “

Presentado a examen el día: 28 de septiembre de 2016

para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Antonio Quintela Incera

Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús María Mirapeix Serrano

Vocal (Apellidos, Nombre): M^a Ángeles Quintela Incera

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Contexto y objetivos.....	5
1.2. Estructura de la memoria.....	6
2. RED ELÉCTRICA, EVOLUCIÓN HACIA LA SMART GRID.....	7
2.1. Red eléctrica.....	7
2.1.1. Aparición de las primeras redes eléctricas.....	7
2.1.2. Red eléctrica convencional.....	8
2.2. Necesidad de renovación eléctrica.....	12
2.3. Concepto de <i>Smart grid</i>	17
3. SMART GRIDS.....	18
3.1. Objetivos de las redes inteligentes.....	18
3.2. Principales características y aspectos clave de las <i>smart grids</i>	20
3.2.1. Generación distribuida y flujo bidireccional.....	20
3.2.2. Un consumidor interactivo.....	21
3.2.3. Seguridad	21
3.2.4. Eficiencia y fiabilidad.....	22
3.2.5. Energías renovables, sostenibilidad y vehículo eléctrico.....	22
3.2.6. Diferencias entre la red eléctrica actual y las <i>smart grids</i>	24
3.3. Principales ventajas y beneficios de las <i>smart grids</i>	27
3.4. Inconvenientes, barreras en la implementación de las <i>smart grids</i>	28
3.5. Actores involucrados.....	30
4. ARQUITECTURA Y ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA SMART GRID.....	33
4.1. Infraestructura de Medida Avanzada (AMI).....	33
4.2. Arquitectura general de una <i>smart grid</i>	34
4.3. Micro-redes.....	36
4.3.1. Elementos básicos que componen las micro-redes.....	37
4.4. Principales tecnologías implicadas.....	38
4.4.1. TICs: tecnologías de la información y comunicaciones	38
4.4.2. Contadores inteligentes.....	38
4.4.3. Sensores.....	40

4.4.4. Sistemas de almacenamiento de energía.....	41
4.5. Vehículo eléctrico en la <i>smart grid</i>	46
4.6. Electrónica de potencia.....	48
4.7. Redes de comunicación en las <i>smart grids</i>	50
5. INTEGRACIÓN DE SMART GRIDS EN LA ACTUALIDAD.....	55
5.1. Normativa y regulación española.....	55
5.2. Políticas energéticas en la UE y distintos países.....	57
5.2.1. Estados Unidos (EE.UU.)	57
5.2.2. Unión Europea (UE).....	58
5.2.3. Japón.....	58
5.2.4. China.....	59
5.3. Proyectos de desarrollo en España.....	60
5.3.1. STAR	60
5.3.2. PRICE.....	61
5.3.3. OSIRIS.....	62
5.3.4. BIDELEK.....	63
5.3.5. MONICA	63
5.3.6. REDES 2025.....	64
5.3.7. ENERGOS.....	65
5.3.8. I-SARE.....	66
5.4. Proyectos de desarrollo en la Unión Europa.....	67
5.4.1. WISEGRID.....	69
5.4.2. DISCERN.....	69
5.4.3. SiNGULAR.....	70
5.4.4. DC4CITIES	71
6. CONCLUSIÓN.....	72
7. BIBLIOGRAFÍA.....	74
7.1. Bibliografía utilizada.....	74
7.2. Índice de figuras.....	78
7.3. Índice de tablas.....	79

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y objetivos

Vivimos en una sociedad donde la energía eléctrica es un componente esencial, conviviendo cada día con dispositivos y electrodomésticos capaces de ayudarnos en múltiples tareas. A día de hoy es imposible imaginar el mundo tal cual lo conocemos sin un suministro eléctrico que ilumine nuestros hogares o haga funcionar nuestras fábricas. Cada día que pasa el consumo eléctrico crece a medida que lo hacen nuestras necesidades, unas necesidades que se adecuan al ritmo con el que evolucionan las nuevas tecnologías. Evidentemente, no son iguales las necesidades eléctricas en la actualidad frente a las que se tenían hace cincuenta años sin ir más lejos.

Sin embargo, un crecimiento global del consumo conlleva una mayor necesidad de generación de electricidad, que en la mayoría de los casos es obtenida a partir de combustibles que se encuentran en el planeta de forma limitada, esto es, los combustibles fósiles, generando con ello grandes vertidos de gases nocivos para el medio ambiente.

Es por ello que el marco eléctrico tradicional está evolucionando hacia una nueva perspectiva donde la generación distribuida basada en fuentes renovables está adquiriendo un papel muy relevante; se plantea un modelo de red eléctrica basado en tres pilares: generación distribuida, autonomía en su control y tecnologías de la información para transmitir y manejar todos los datos.

En este sentido ha surgido la nueva generación de redes eléctricas inteligentes o *smart grids*, las cuales han sido objeto de numerosos estudios de desarrollo e implantación.

El presente proyecto de desarrollará con la intención de comprender el concepto de las nuevas redes de energía, las *smart grids*, abordando los distintos aspectos involucrados. Se estudiarán sus principales características, detallando sus beneficios y barreras en su implantación, se analizarán los principales elementos que las componen, así como las distintas tecnologías implicadas. Por último, se destacarán las normativas relativas a su integración y se detallarán numerosos proyectos de desarrollo, intentando proporcionar una visión clara y concreta de la situación actual y el estado en el que se encuentran.

Para poder entender cómo funciona este nuevo concepto de red eléctrica y de qué se trata, se llevará a cabo en primer lugar un análisis del funcionamiento de la red eléctrica tradicional y se verá cómo las nuevas necesidades de la sociedad y el hacer frente a los problemas derivados del sistema eléctrico tradicional han propiciado la necesidad de buscar nuevas soluciones en el marco eléctrico, desarrollándose las nuevas redes inteligentes.

1.2. Estructura de la memoria

Una vez dejadas atrás las paginas introductorias, la memoria estará formada por seis capítulos más, siendo el último correspondiente a las referencias y bibliografía utilizada durante el desarrollo del proyecto. A continuación, se mostrarán los contenidos que se detallarán en los capítulos:

- En el segundo capítulo se describe el funcionamiento de la red eléctrica de transporte y distribución tradicional, detallando las distintas fases que tienen lugar desde la generación de la energía hasta el momento en que se consume. También se analizarán distintos factores por los que se ha hecho necesaria una evolución de dichas redes tradicionales hacia las nuevas redes del futuro, las *smart grids*. Se cerrará el capítulo con una descripción del concepto de *smart grid*.
- El capítulo tercero trata en profundidad el concepto de *smart grid* definido en el capítulo segundo. Para ello se hará un análisis de los objetivos que persiguen, sus características principales y elementos clave sobre los que se cimientan, así como las principales diferencias que existen entre las redes tradicionales y las *smart grids*. Se verán sus ventajas e inconvenientes y barreras en su implantación. Por último, se analizarán los actores involucrados en este nuevo sistema eléctrico.
- En el cuarto capítulo se van a abordar aspectos más técnicos propios de las *smart grids*, como son su arquitectura y elementos que la componen. Se tratará de mostrar cómo está estructurada una *smart grid*, teniendo en cuenta su subdivisión en dos niveles, red de generación y transporte de energía y red de comunicaciones. Se analizarán las distintas tecnologías que están implicadas, así como el vehículo eléctrico y su integración en las *smart grids*. Para finalizar se analizarán conceptos como la electrónica de potencia y las redes de comunicación y protocolos de telecomunicaciones dentro de las redes inteligentes.
- El capítulo cinco detalla la normativa existente en nuestro país sobre la implantación de redes inteligentes. Se hará un repaso de las políticas energéticas de distintos países y de la Unión Europea. Para terminar, se estudiarán algunos de los distintos proyectos de desarrollo, de implantación y de investigación en España y a nivel europeo con el fin de poder analizar su grado de madurez e integración en el capítulo siguiente.
- En el sexto se expondrán las conclusiones obtenidas acerca de los aspectos más importantes del estudio y de la situación en que se encuentra el proceso de implantación de redes inteligentes actualmente.

2. RED ELÉCTRICA, EVOLUCIÓN HACIA LAS *SMART GRIDS*

2.1. Red eléctrica

2.1.1. Aparición de las primeras redes eléctricas

Con el paso de los años, desde sus inicios en la Revolución Industrial, la red eléctrica de generación y distribución ha pasado de constituir un sistema aislado que suministraba energía a una zona geográfica concreta a convertirse en una red expandida que incorpora multitud de áreas.

Antiguamente toda la energía era producida cerca del dispositivo o servicio que la requería. Fue con la aparición en escena, de Thomas Alva Edison, quien tras haber estudiado la industria de la iluminación del gas inventó el primer sistema eléctrico que suministraba energía por medio de redes virtuales para la iluminación [1]. Con esto las empresas eléctricas se encargaron de las economías de escala y cambiaron a generación centralizada, distribución y administración del sistema.

Sin embargo, el concepto moderno de red eléctrica que a día de hoy se conoce, en el que el modelo de generación, la transmisión a alta tensión y la distribución a media y baja tensión, son solo posibles gracias a las máquinas de inducción magnética que Nikola Tesla concibió.

2.1.2. Red eléctrica convencional

La red eléctrica tradicional, en la actualidad forma el sistema encargado de hacer llegar energía a los hogares. Este sistema está formado por el conjunto de elementos para la generación, el transporte y la distribución de la energía, además de los mecanismos de control, seguridad y protección [2] [3].

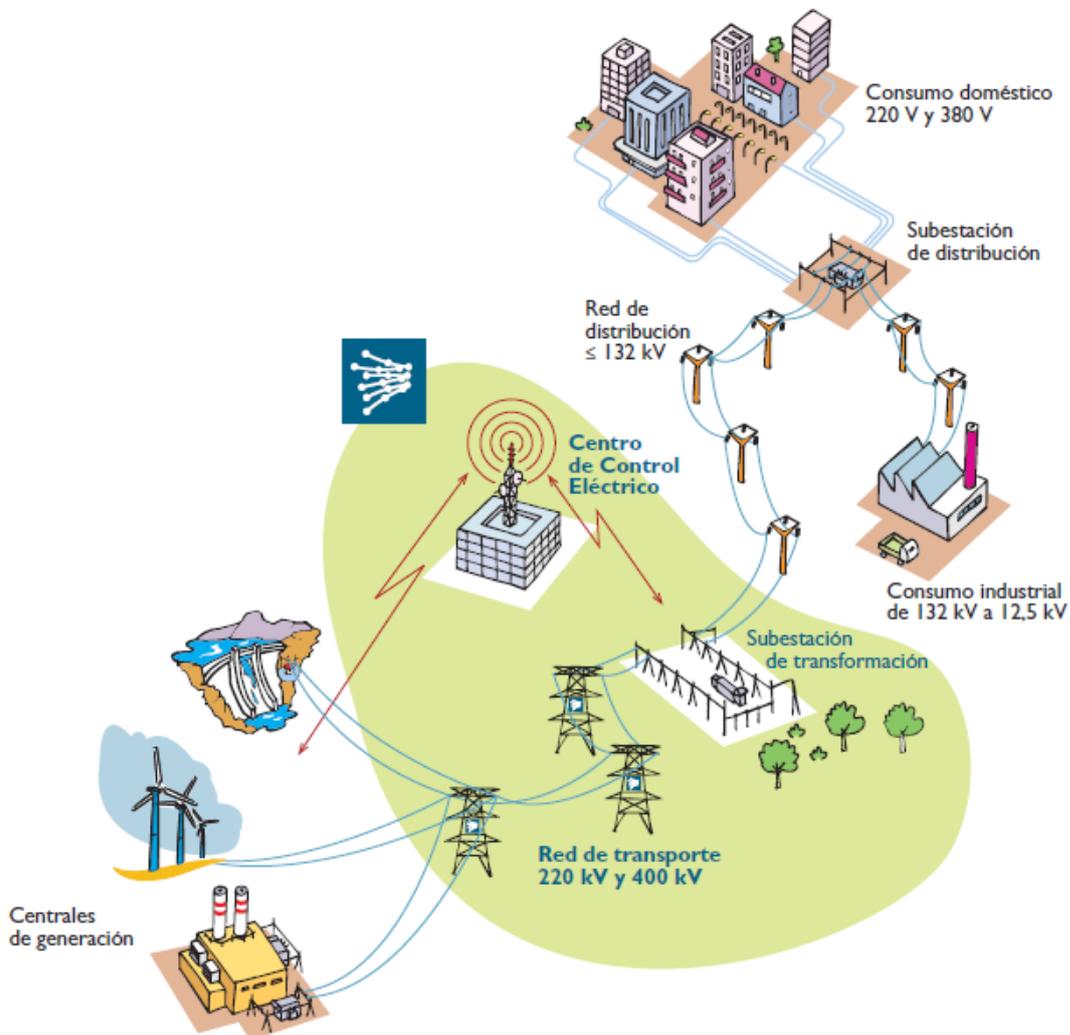


Figura 1. Esquema de la red eléctrica convencional en España [4]

- **Generación:** en primer lugar, las centrales eléctricas generan la electricidad a partir de fuentes de energía. Dentro de las fuentes de energía se encuentran:
 - a. No renovables: se genera energía a partir de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), y combustibles nucleares. Estas fuentes se encuentran en la naturaleza de manera limitada y su extinción supone un problema a largo plazo pues no pueden ser sustituidas.
 - b. Renovables: estas se pueden clasificar como provenientes del sol (directa o indirectamente), o no solares (mareomotriz y geotérmica). Dentro de las solares indirectas se obtiene energía eólica, hidráulica y de biomasa. Las solares directas obtienen térmica y fotovoltaica.

Las plantas de generación por lo general están localizadas cercas de fuentes de agua, alejadas de áreas pobladas y suelen ser de gran tamaño.

El hecho de que la electricidad a nivel industrial se deba consumir en el momento en que se produce, obliga a disponer de centrales con potencias elevadas para hacer frente a las puntas de consumo. A la electricidad generada se le incrementa su tensión en las estaciones transformadoras elevadoras que se ubican a la salida de las centrales generadoras, las cuales se va a conectar a la red de transporte.

- **Transporte:** la red de transporte es la encargada de enlazar las centrales con las redes de distribución, uniendo las centrales con las subestaciones de transformación. La línea de alta tensión es el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias. Están constituidas por el elemento conductor (cables de cobre o aluminio) y por el elemento de soporte, las torres de alta tensión.
- **Subestaciones de transformación:** son vitales para el funcionamiento de cualquier sistema eléctrico. Proporcionan interconexión de todas las líneas entre sí con el fin de hacer llegar la energía generada en las centrales a los centros de consumo. Esto exige un cambio de tensión, la energía llega de la red de transporte a alto voltaje para recorrer largas distancias. En la subestación mediante un transformador se logra reducir dicha tensión para poder iniciar su distribución.

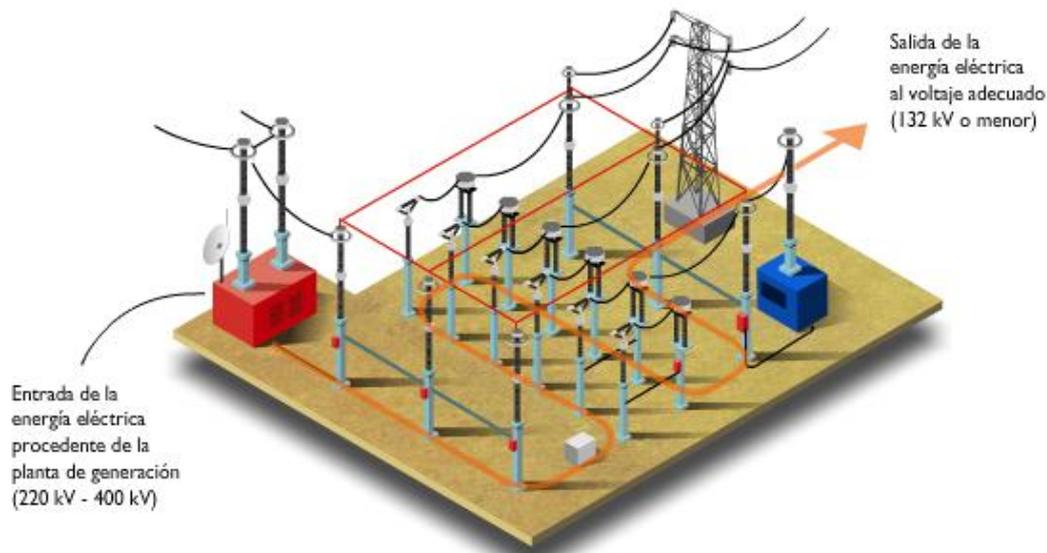


Figura 2. Subestación de transformación (red eléctrica española) [5]

- **Redes de distribución:** son las líneas eléctricas de aproximación a los grandes centros de consumo (ciudades e instalaciones industriales de cierta importancia). Mayoritariamente estas líneas suelen ser aéreas, y generalmente una vez llegan a los núcleos urbanos se utilizan redes subterráneas.
- **Centros de transformación:** son los encargados de realizar la última transformación, reduciendo el voltaje de media tensión de distribución a voltajes con valores aptos de consumo en baja tensión. El voltaje de utilización en España va desde los 220v hasta los 380v en los casos de uso doméstico, mientras que en uso industrial los valores varían de 132kv a 12,5 kv.
- **Centro de control eléctrico:** Es el responsable de la operación coordinada en tiempo real de las instalaciones de generación y de transporte del sistema eléctrico (CECOEL en el sistema eléctrico español). Con la información recibida de las subestaciones se comprueba el funcionamiento del sistema eléctrico en su conjunto y se toman decisiones de modificarlo o corregirlo si procede.

Enviar la energía eléctrica a través de una red lleva asociado que parte de energía se pierda en el proceso. En el caso de las líneas de transporte y distribución, la cantidad que se pierde varía dependiendo de factores como su extensión, ubicación de la generación y la demanda, características técnicas de los equipos, etc.

Este sistema tiene que ser capaz de entregar energía eléctrica a todos los consumidores, sin que se produzcan interrupciones en el suministro y de darse cualquier fallo en alguna parte del sistema, este ha de durar lo menos posible para que no afecte al resto de componentes del sistema.

Esta estructura de red eléctrica, mantenida prácticamente sin alterar desde mediados del siglo pasado, ha comenzado un proceso de cambio provocado por la introducción de la generación distribuida (pequeñas centrales de generación ubicadas cerca del consumo) que se conectan directamente a la red de distribución y al consumo.

2.2. Necesidad de renovación eléctrica

La red eléctrica conforma el sistema interconectado más extenso del planeta. Fue diseñada para transportar y proporcionar energía a distintos lugares, y durante más de un siglo ha cumplido su función de manera satisfactoria.

No obstante, a medida que avanza la tecnología, las necesidades de consumo de energía de la sociedad actual han ido creciendo, lo que ha provocado un aumento en la demanda de energía eléctrica y la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía, como las energías renovables. Estos son algunos de los factores que hacen evidente la necesidad de una reestructuración del sistema eléctrico de transporte y distribución.

Además, existen otra serie de problemas o necesidades puramente económicas, existe una gran dependencia de los precios de los combustibles fósiles a lo que habría que sumarle el precio de los derechos de emisión de CO₂. En el caso del barril de crudo estos precios vienen determinados por una compleja dinámica en la que intervienen factores como la capacidad excedentaria, los niveles de inventarios entre otros. Según estudios realizados por el instituto para la Diversificación y de la Energía (IDAE) [6], (aunque en los tres últimos haya caído en España), la tendencia en los próximos años del precio del barril de crudo es a aumentar.

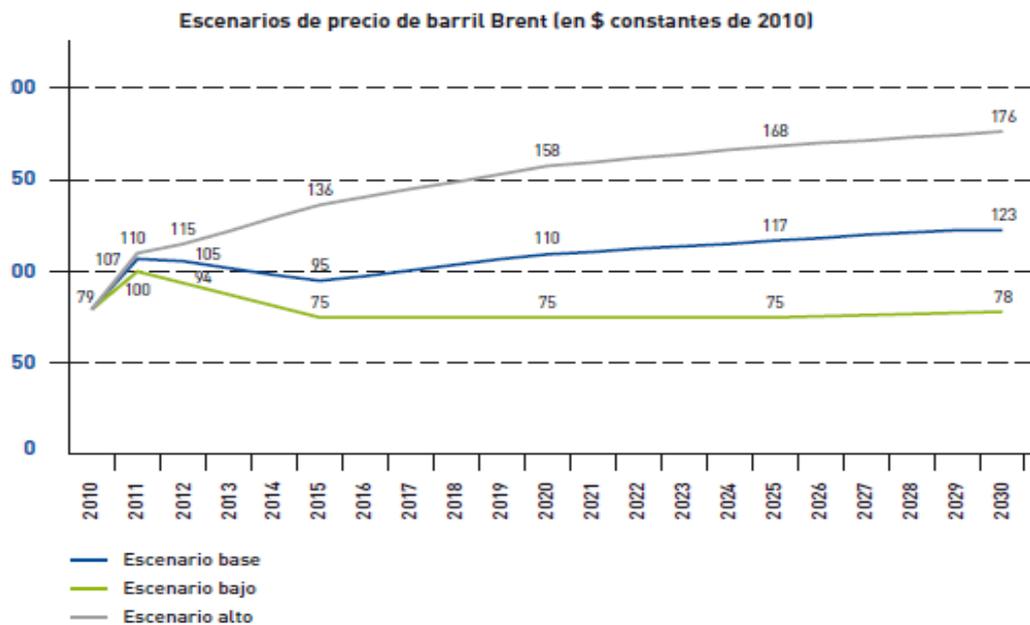


Figura 3. Escenarios del precio del crudo hasta 2030 [6]

La estimación del precio de los derechos de emisión de CO₂ realizado en el mismo estudio indica un aumento de los mismos.

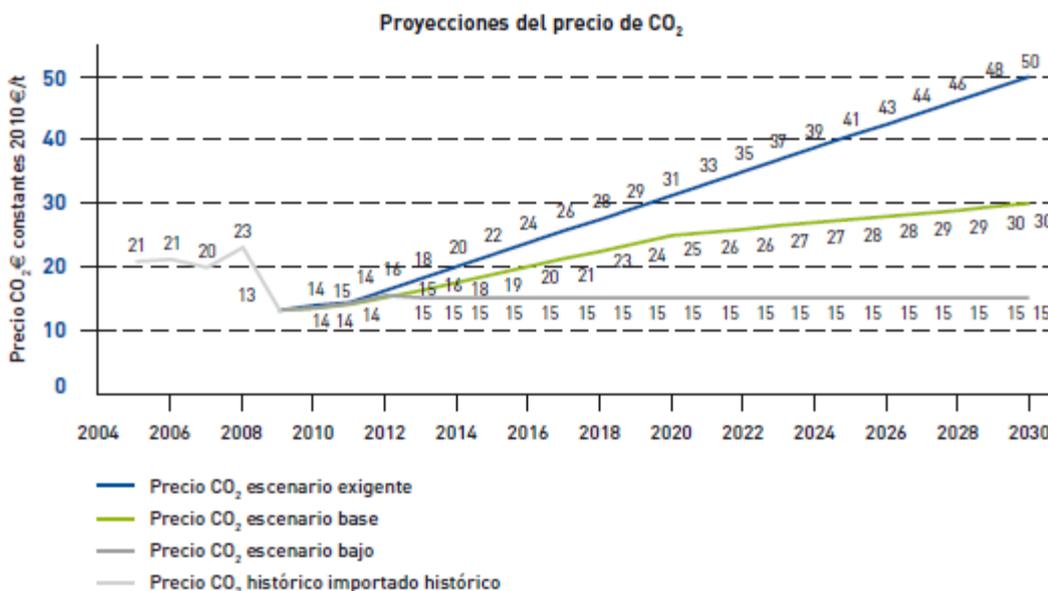


Figura 4. Escenarios del precio de emisiones de CO₂ hasta 2030 [6]

Otro factor económico a tener en cuenta está en el coste de la generación de la energía.

Según el informe publicado bajo el título “Los costes de generación de las energías renovables 2014” [7], por la Agencia Internacional de Energía Renovable (Irena), los costes para generar energía a partir de fuentes renovables como la eólica y la solar han alcanzado niveles de igualdad o son incluso más bajos que los costes de generación de los combustibles fósiles. El informe muestra que la biomasa, la hidroeléctrica, la energía geotérmica y la energía eólica son competitivas en costos o más baratas que las instalaciones que producen electricidad a partir de carbón, petróleo y gas, aún sin apoyo financiero y a pesar de la caída en los precios del petróleo [8].

“Nunca ha sido tan barato evitar el peligroso cambio climático, crear empleos, reducir los presupuestos para la importación de combustibles y proteger nuestro sistema de energía con fuentes renovables”, señalaba Adnan Z. Amin, director general de Irena [8].

Existen plantas especiales destinadas a cubrir los picos de demanda que se producen en algunos intervalos de tiempo, generando sobrecostes, pues solo se utilizan en estos periodos. Estos factores económicos repercuten directamente en el coste final de la energía.

Como se mencionó anteriormente existe un problema debido al coste de las materias primas, pero un problema aun mayor es la dependencia que se tiene de los suministradores, que se ve acrecentada si son de otros países, subidas de los precios, restricciones en los suministros pueden hacer no viables proyectos para la sociedad.

Sin ir más lejos España se sitúa como uno de los países de la UE con más dependencia eléctrica. Según el Informe sobre el Estado de la Unión de la Energía (*State of the Energy Union*) [9] España se sitúa 17 puntos por encima de la media europea con un 70.5%. El máximo de la dependencia energética de España se alcanzó en 2005 (81,4%), mientras que el mínimo se marcó en 1990 (63,1%).

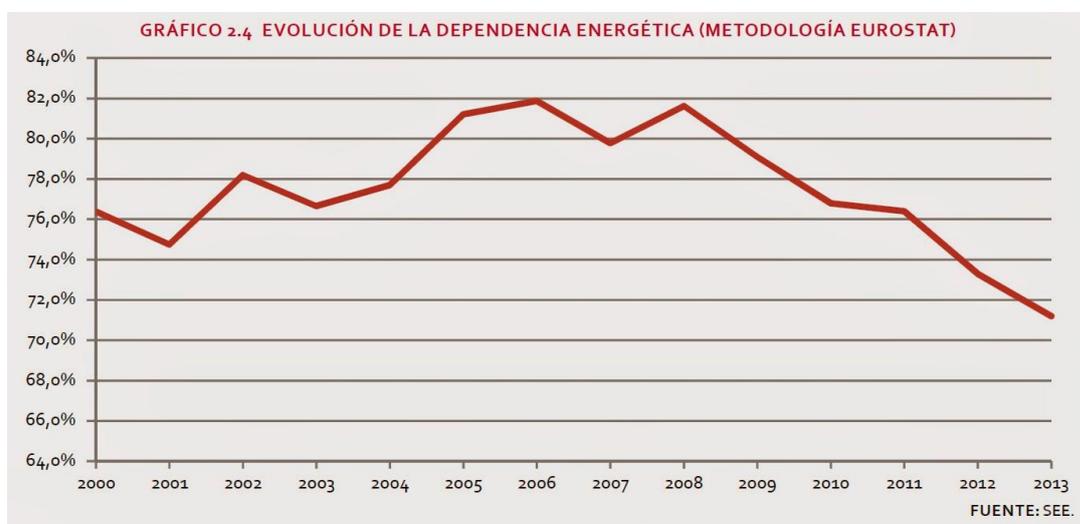


Figura 5. Evolución de la dependencia energética en España [10]

Los aspectos medioambientales también están presentes, un gran número de centrales operativas en la actualidad utilizan combustibles fósiles como son el petróleo o el carbón cuyo procesamiento y combustión genera humos y gases (CO₂, NO₂...) que provocan el efecto invernadero.

Como se refleja en la figura 6 actualmente nos encontramos muy por debajo del año 2005, donde se dieron los picos más altos, sin embargo, se observa una tendencia al alza desde el 2013 donde las emisiones han subido en torno a un 5% alcanzando los valores de 1998 [11].

EMISIONES CO2 EN ESPAÑA 1990-2015

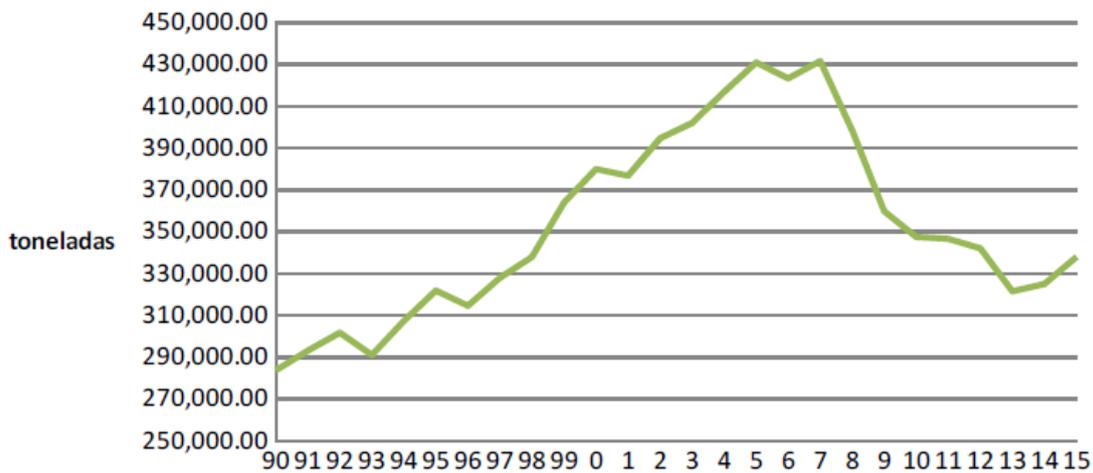


Figura 6. Evolución de emisiones de CO₂ en España [12]

Otro problema derivado de estas emisiones nocivas está en el cambio climático. A lo largo de las últimas décadas se han podido observar cambios y anomalías en las temperaturas que vienen aumentando en los últimos años. Este cambio climático puede traer consigo fatales consecuencias, no solo sobre el clima, sino también sobre el medio ambiente y el ser humano.

Consecuencias como el aumento del nivel del mar (3mm por año) provocado por el deshielo de los polos y glaciares, aumento de temperaturas en lagos y ríos, acidificación de las aguas (descenso del nivel de pH de las aguas producto de la absorción del CO₂ atmosférico), fenómenos climáticos extremos (heladas o nevadas fuera de temporada), son producidas por un cambio climático provocado por el calentamiento global.

En la siguiente figura puede apreciarse las anomalías de temperatura que se han venido dando en los últimos años.

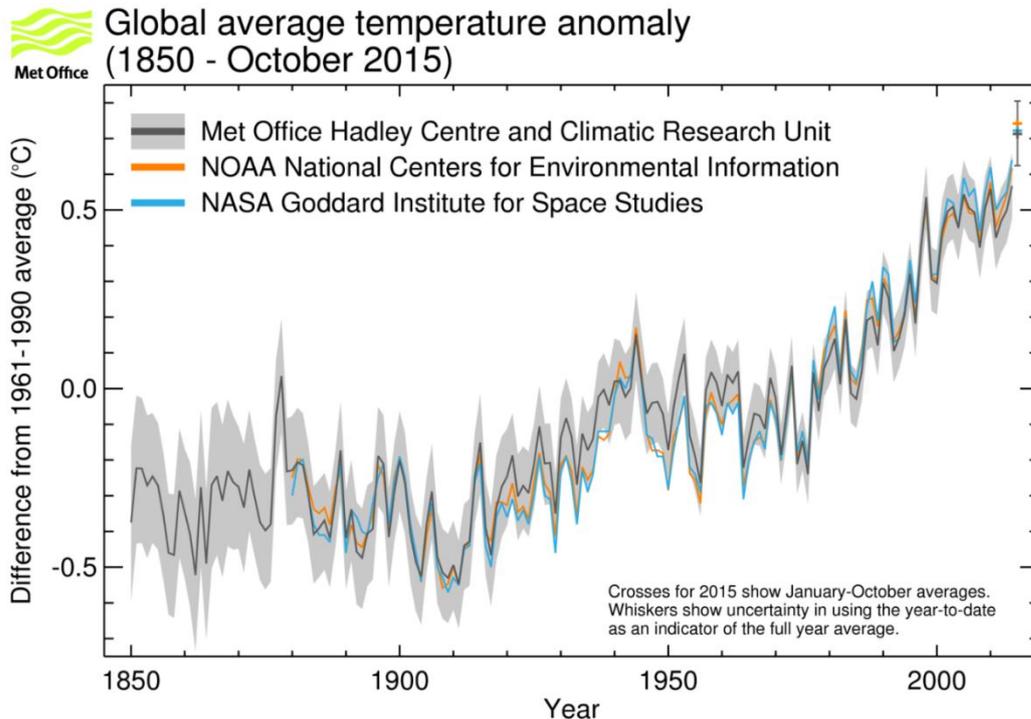


Figura 7. Anomalías de la temperatura en el último siglo [13]

Aumentar la fiabilidad de la energía y su distribución es otro factor a tener en cuenta a la hora de implantar el nuevo sistema de redes, pues, aunque a día de hoy la fiabilidad en los países desarrollados es muy alta, aparecen situaciones en las que se producen fallos en la red, generando apagones ocasionales, que de no atajarse con urgencia pueden provocar un efecto cascada debido a la congestión y sobrecargas.

Actualmente las infraestructuras de las centrales eléctricas generadoras de energía son, en algunos casos, obras que se han realizado hace muchos años: sus prestaciones, tecnologías e instalaciones han quedado obsoletas ante la era de electrónica inteligente en la que estamos inmersos.

Esta modernización de nuestras redes de transporte y distribución se basa en la implementación de sistemas automáticos inteligentes, que permitan un uso eficiente de la energía eléctrica que se genera, a través de una comunicación bidireccional entre el consumidor y el generador de la energía.

Los avances en el campo de las telecomunicaciones, en sensores y procesadores mucho más potentes, capaces de trabajar a mayores velocidades, combinados con la utilización de energías renovables harán que la generación, gestión y distribución sea más barata, eficiente y sostenible.

Todas estas motivaciones han llevado a lo que se conoce como *smart grids* o Redes Eléctricas Inteligentes.

2.3 Concepto de *smart grid*

Las *smart grids* o redes eléctricas inteligentes son una forma de gestión eficiente de la electricidad. A pesar de que no existe una definición universal estandarizada, la Plataforma Tecnológica Europea de *smart grids* (*smart grids: European Technology Platform*, <http://www.smartgrids.eu>) la define como “una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de los usuarios conectados en ella (quienes generan electricidad, quienes consumen y quienes realizan ambas acciones) para proporcionar un suministro de electricidad seguro, económico y sostenible” [14].

Para ello se emplean tecnologías de última generación, creando un sistema que permita la comunicación bidireccional de electricidad e información entre el consumidor final de la energía y las compañías eléctricas, que satisfaga las necesidades de la era digital, mejorando la eficiencia y fiabilidad de la red eléctrica.

Se puede resumir el fin que persiguen las *smart grids* en lo siguiente:

- Garantizar óptimos niveles de fiabilidad, seguridad y calidad del suministro.
- Reducir el impacto medioambiental del sistema eléctrico de suministro.
- Proporcionar a los consumidores mayor información de oferta.
- Permitir a los consumidores formar una parte importante en la optimización del sistema.
- Facilitar y mejorar la conexión y el funcionamiento de los generadores de todo tipo de tamaños y tecnologías.

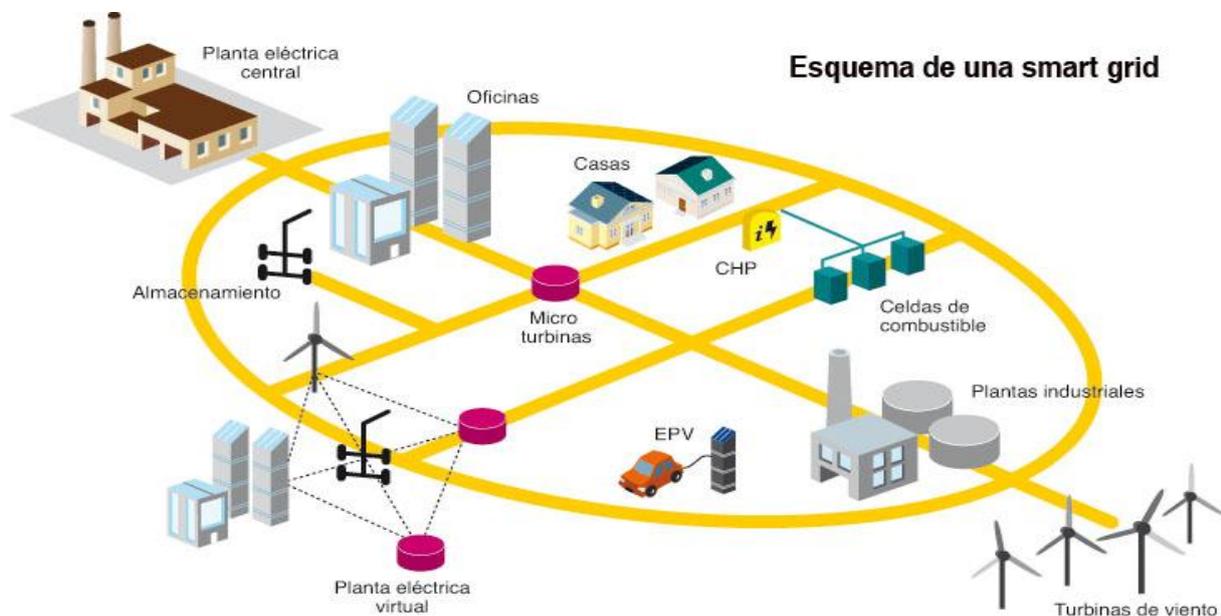


Figura 8. Esquema de una *smart grid* [15]

3. SMART GRIDS

3.1 Objetivos de las Redes Inteligentes

Las *smart grids* están basadas en el uso de sensores, sistemas de comunicación y han de tener capacidad de computación y control de datos para tomar las decisiones más oportunas en cada momento que permitan obtener un suministro más eficaz, económico y fiable. Estas se vuelven “inteligentes” cuando ante las fluctuaciones que se puedan producir, se consiguen tomar las decisiones más eficientes en tiempo real.

Una Red Inteligente emplea equipos y servicios innovadores junto con monitorización inteligente, nuevas técnicas de control, comunicaciones y de autoajuste con el fin de conseguir los siguientes objetivos [14]:

- Red eléctrica renovada e innovadora: mejorar la calidad del servicio, robustecer y automatizar la red, con el fin de obtener una red de transporte y distribución de calidad y minimizar las pérdidas en la misma.
- Un abastecimiento seguro: resolver el problema del agotamiento de las fuentes de energía actuales (combustibles fósiles), optimizando la conexión de las zonas con fuentes de energía renovables y minimizando costes. Tener capacidad de suministro de calidad adecuado a la era digital, permitiendo al usuario que lo demande disponer de cierto grado de calidad en su suministro energético para el uso en distintas aplicaciones.
- Reducir el impacto medioambiental: reducir emisiones de humos y gases ayudando a reducir el efecto invernadero, tratando de aumentar la responsabilidad social y la sostenibilidad.
- Gestionar la demanda energética, permitiendo a los consumidores gestionar sus consumos energéticos de una forma más eficiente.
- Permitir la autogestión durante incidencias, asegurando un flujo constante de energía en todos los puntos ante fallos o errores en la red.

- Potenciar la participación activa de los consumidores, incentivando la generación local de energía y la entrega del exceso energético a la red en horas punta. Aportar a los consumidores mayor cantidad de información y opciones a la hora de seleccionar el suministro energético.
- Variedad en modalidades de generación, permitiendo la coexistencia en la red de todo tipo de generadores, sin distinción de tamaño y tecnología. Variedad en las estrategias de almacenamiento, ayudado por la implementación de micro-redes y a la generación energética distribuida.
- Facilitar el crecimiento de los mercados nacional y europeo, facilitando el transporte de energía a largas distancias, introduciendo elementos como el vehículo eléctrico, acrecentando el uso de las energías renovables y otros elementos en desarrollo.

3.2 Principales características y aspectos clave de las *smart grids*

Una *smart grid* no es únicamente un concepto, sino un esquema que combina diversas tecnologías, concretamente las que están vinculadas a la comunicación y el control, que transforman dicha red eléctrica en un modelo distribuido, aumentando su nivel de confianza, disponibilidad y reduce el costo de la energía. [16]. Para lograr estas metas se debe hacer especial hincapié en distintos aspectos y características prometedoras de estas nuevas redes inteligentes.

3.2.1 Generación distribuida y flujo bidireccional

Sin duda una de las características más relevantes que diferencia a una red inteligente de una tradicional es su capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional, donde la información proporcionada por los consumidores es utilizada por las compañías para permitir una operación más eficiente de la red eléctrica. Una red donde los usuarios pueden pasar a ser también proveedores gracias al desarrollo de las tecnologías de energía renovable (por ejemplo, mediante una instalación solar fotovoltaica conectada a la red).

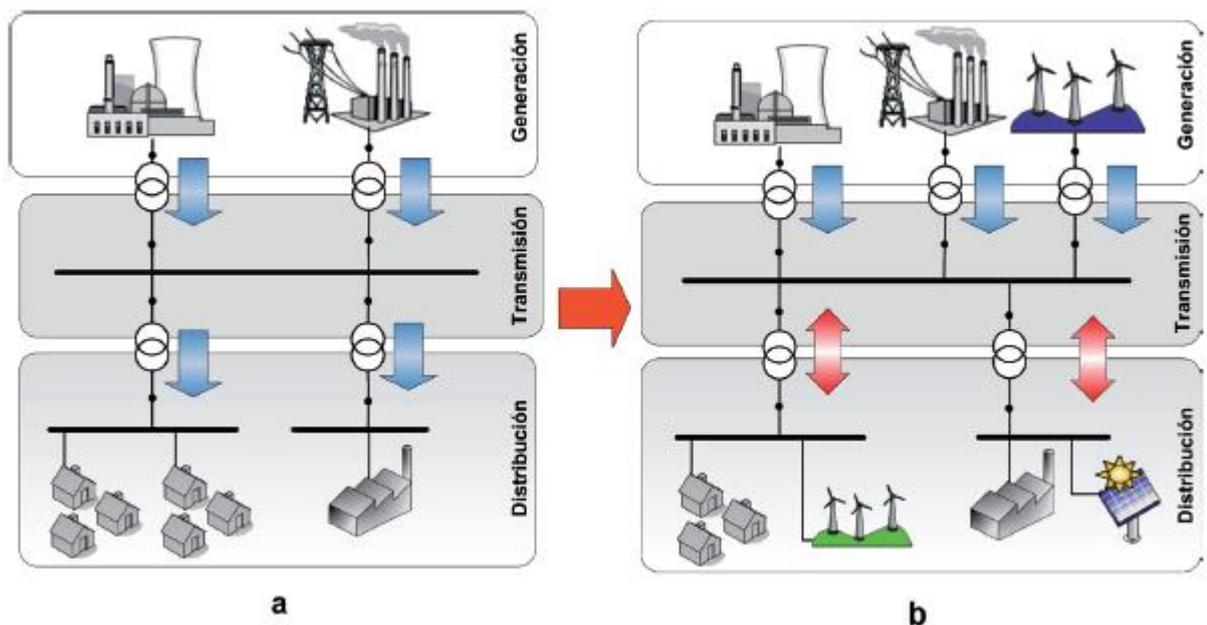


Figura 9. Sistemas de energía tradicional(a) frente a sistemas de distribución(b) [17]

3.2.2 Un consumidor interactivo

Tradicionalmente, el cliente en la gestión de su consumo únicamente se ha limitado a controlar su demanda energética.

Con las *smart grids* los consumidores tienen un mayor seguimiento sobre la cantidad de energía que se produce y entrega en sus hogares, y pueden gestionar su propio consumo, gracias a sus equipos instalados, contadores electrónicos y sistemas de gestión automatizados que se comunican entre sí.

Dentro del concepto de red inteligente, el consumidor es capaz de generar su propia energía, la cual podrá ser devuelta a la red. [18]

3.2.3 Seguridad

En las redes actuales se dan situaciones que causan problemas de seguridad debido al propio estado de antigüedad de las infraestructuras de la red eléctrica.

En la mayoría de estas situaciones son los clientes los que han de ponerse en contacto con la compañía eléctrica para denunciar el fallo, y de este modo la compañía puede determinar donde se ha producido la interrupción. Una *smart grid* podría alertar de problemas potenciales incluso antes de que estos se produjeran, permitiendo la reconfiguración inmediata y evitarían interrupciones y cortes a gran escala.

Otra particularidad importante de las nuevas Redes Inteligentes es el ofrecer seguridad cibernética [19].

Existen números tipos de ataques como accesos no autorizados e incumplimiento de sistemas de control, manipulación de datos de vigilancia, de señales de control, otros como virus, gusanos o malware que dañan el software. Las *smart grids*, haciendo uso de su poder de computación y su ancho de banda mejorado, son capaces de realizar una protección más sofisticada, asegurándose de que la energía está disponible a la vez que se anticipa a las amenazas que pueden dañar la integridad de la red.



3.2.4 Eficiencia y fiabilidad

Una forma de reducir costes, disminuir la contaminación y los riesgos de seguridad en la producción y transferencia energética es utilizando menos electricidad, por ello las *smart grids* persiguen reducir el consumo a nivel global usando las nuevas tecnologías.

Las nuevas redes de contadores instalados a lo largo de la Red Inteligente surten de información a los operadores para que puedan ver lo que está sucediendo en cualquier momento, les permite saber con exactitud cuanta cantidad de energía se está demandando, evitando así alimentar a las líneas con más electricidad de la indispensable.

Con el paso de los años la red de transporte y suministro de energía tradicional envejece, dando lugar a la posibilidad de intermitencias en el suministro y desajustes en la calidad de la energía, la incapacidad de saber lo que está pasando en la red y la falta de equipos automáticos son causas de estas interrupciones.

Los avances en cuanto a material de construcción, así como los nuevos materiales de conductores y transformadores, las distintas tecnologías de almacenamiento energético, pero sobre todo el análisis y la asimilación de la información obtenida entre los distintos puntos de control ayudarán a aumentar su eficiencia y fiabilidad. [20]

3.2.5 Energías renovables, sostenibilidad y vehículo eléctrico

Es evidente que una forma de reducir el impacto en el medio ambiente que las centrales de generación eléctrica tradicionales ejercen (emisiones de CO₂, efecto invernadero, calentamiento global) es hacer uso de fuentes de energía renovables (EERR), fuentes más limpias y “verdes” como la solar (fotovoltaica o térmica), eólica y geotérmica entre otras.

Pero la energía proveniente de fuentes renovables no es constante, esta presenta fluctuaciones dependiendo de las condiciones meteorológicas como el viento, la lluvia o el brillo del sol, lo que complica el hecho de suministrar energía cuando es requerida. Los métodos de almacenamiento de energía, las tecnologías actuales de envío de información, y los sistemas de previsión que incorporan las *smart grids* hacen posible la integración de estas energías sostenibles y su óptimo funcionamiento.

Otra característica que juega un papel importante en la implantación de las nuevas redes inteligentes es el vehículo eléctrico. Cuando se habla de los vehículos eléctricos se piensa en sus beneficios medioambientales, como las reducciones de las emisiones de CO₂ al impulsarse con energías renovables, menos contaminación acústica. Sin embargo, uno de los grandes potenciales del coche eléctrico es su uso como sistema de almacenamiento de energía, la cual puede ser consumida y gestionada por las *smart grids* [21]. En este sentido se están implementando las siguientes tecnologías:

- V2G – *Vehicle to grid* (del vehículo a la red)

Es un sistema en el cual la energía almacenada en el vehículo puede ser inyectada (vendida) a la red eléctrica. Se podría por lo tanto vender electricidad en horas pico, comprándola en horas valle, consiguiendo con ello un beneficio económico.

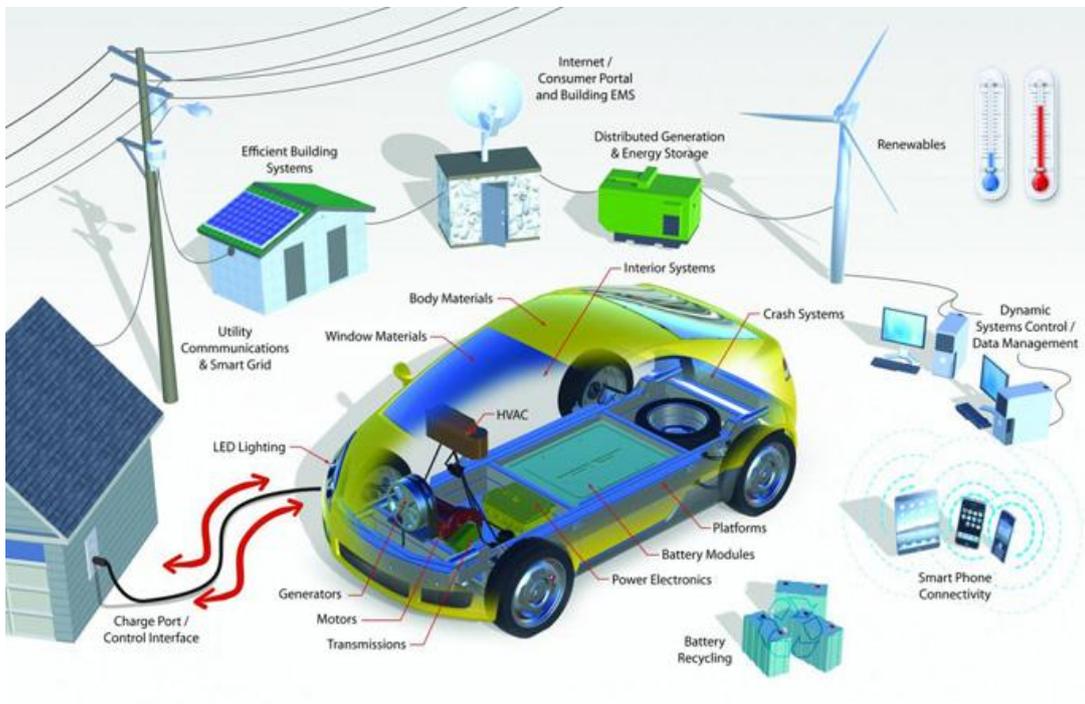


Figura 10. Esquema de implantación del vehículo eléctrico en una *smart grid* [22]

- V2H – *Vehicle to Home* (del vehículo al hogar)

Esta tecnología es una variante del V2G, pero destinada a hogares, dando la posibilidad de usar la batería del coche como fuente de alimentación de la propia vivienda, permitiendo abaratar la factura de la luz y, por ejemplo, pudiendo usarse como generador de energía de emergencia ante interrupciones.

- V2B – *Vehicle to Building* (del vehículo al edificio)

Conceptualmente idéntico al V2H, pero aplicado a edificios o industrias, con esta tecnología una flota de vehículos conectados a un mismo edificio puede servir de fuente de alimentación.

3.2.6 Diferencias entre la red eléctrica actual y las *smart grid*

Características	Red Eléctrica Actual	<i>smart grid</i>
Automatización	Escasa existencia de elementos para la monitorización.	Masiva integración de sensores, tecnologías de medición y automatización en todos los niveles de la red.
Inteligencia y control	Carencia de inteligencia, utilización de sistemas de control manuales.	AMI (infraestructura de medición avanzada).
Autoajuste	Se basa en la protección de los dispositivos ante los fallos del sistema.	Detecta automáticamente y responde a problemas en la distribución. Buscan la prevención.
Actividad del consumidor	Existe una desinformación general en los consumidores y no participan en la generación eléctrica.	El usuario participa entregando de nuevo a la red el exceso energético generado localmente.
Gestión de la demanda	La gestión de la demanda es inexistente indiferentemente de la franja horaria del día, o del estado de la red eléctrica.	Se incorporan equipos electrónicos inteligentes que permiten ajustar la eficiencia energética, la demanda de la energía se genera a tiempo real.

<p>Calidad eléctrica</p>	<p>Se limita a resolver los cortes de suministro, ignorando los problemas de calidad eléctrica. Persisten problemas de tensión, perturbaciones, ruido en la red, etc.</p>	<p>Se busca identificar y resolver problemas de calidad eléctrica para satisfacer los distintos servicios de los consumidores. Tipos de tarifas asociados a calidades energéticas.</p>
<p>Vehículos eléctricos</p>	<p>En los últimos años se están empezando a introducir puntos de recarga eléctrica de la batería de los vehículos.</p>	<p>Los vehículos eléctricos a través de la generación distribuida de las <i>smart grids</i>, usando enchufes, se pueden cargar usando fuentes sostenibles o pueden inyectar energía a la red del hogar. Pasan a ser generadores de energía.</p>
<p>Generación y almacenamiento</p>	<p>Existen muchos obstáculos para interconectar recursos energéticos distribuidos.</p>	<p>Multitud de dispositivos generadores y de almacenamiento de energía que complementan a las grandes centrales generadoras. Inclusión de conexiones "<i>PlugAndPlay</i>". Gran participación de energías renovables.</p>
<p>Optimización del transporte eléctrico</p>	<p>Grandes pérdidas energéticas por las infraestructuras antiguas y grandes distancias.</p>	<p>Los sistemas inteligentes de control permiten intercambios de energía entre los distintos dispositivos. Menores distancias, por lo tanto, menores pérdidas.</p>

<p>Mercados</p>	<p>Los mercados de venta al por mayor siguen trabajando para encontrar los mejores modelos de operación. No existe una buena integración entre estos. La congestión en la transmisión separa compradores y vendedores.</p>	<p>Buena integración de los mercados al por mayor. Prósperos mercados al por menor. Congestionamiento de transmisión y limitaciones mínimas.</p>
<p>Optimización de bienes y funcionamiento eficiente</p>	<p>Integración escasa de los datos de operación y la gestión de bienes. Mantenimiento basado en el tiempo</p>	<p>Uso de sensores para medir las condiciones de la red. Tecnologías integradas para la gestión de los bienes. Mantenimiento basado en las condiciones de la red.</p>

Tabla 1. Diferentes características entre las redes convencionales y las *smart grid* [23]

3.3 Principales ventajas y beneficios de las *Smart Grids*

Una vez se conocen las características y aspectos más importantes a tener en cuenta se pueden listar las ventajas como [24]:

- Sistemas de producción/generación más eficientes y consecuentes con el medio ambiente (reducción de CO₂).
- Evolución hacia la generación distribuida. Descentralizar la generación ayudará a la conservación del medio ambiente al utilizar energías renovables, a descongestionar los sistemas de transporte de energía y reducirá las pérdidas de energía al ser sistemas cercanos al consumo.
- Autoconsumo con balance neto de energía en viviendas. Este es un sistema mediante el cual los consumidores que poseen pequeñas instalaciones de energías renovables (eólica y fotovoltaica principalmente) pueden verter a la red eléctrica el exceso producido sin contraprestación económica con la finalidad de hacer uso del mismo en otro momento.
- Renovación de equipos y sistemas de generación y distribución. Si bien podría considerarse como una barrera, debido a la inversión económica que supone para las grandes compañías eléctricas, se hace necesaria una modernización de los equipos para adecuarlos a las nuevas tecnologías que utilizarán las *smart grids* aportando los beneficios aquí descritos.
- Información actualizada al momento sobre la calidad y la necesidad de la red.
- Reducción de pérdidas en el transporte y distribución de la energía debido a la reducción de la distancia entre puntos generadores y consumidores.
- Desarrollo de equipos de almacenamiento-decrecimiento de demanda en horas punta.
- Estabilización de la curva de la demanda.
- Gestión activa de la demanda, conocimiento del consumidor.
- Optimización del sistema mediante puntos de control.

- Mayor participación de los clientes en la generación de la energía. Incrementar la cantidad de usuarios que se convierten en generadores y contenedores de energía. Esta energía será gestionada por los equipos inteligentes instalados en sus hogares para obtener mayor eficiencia y beneficios económicos.
- Mayor integración de los vehículos eléctricos a la red que podrán cargar sus baterías aprovechando las fuentes de energía renovables instaladas en la *smart grid*, de igual modo podrán inyectar energía de sus baterías a la red actuando como fuentes de energía de emergencia en caso de necesidad
- Posibles incentivos económicos por parte de la administración.

3.4 Inconvenientes, barreras en la implementación de las *smart grids*

Se ha visto como los beneficios que aportan las *smart grids* son numerosos, sin embargo, su implantación no será una tarea rápida, económica, y mucho menos sencilla. En los últimos años en los que la posibilidad y viabilidad de las nuevas redes ha cobrado más importancia son muchos los obstáculos y barreras a los que se tienen que enfrentar.

Los factores que obstaculizan esta revolución en la red se pueden sub-catalogar en tres grupos diferenciados [25-24]:

- Barreras económicas:
 - a. Inversión inicial elevada y largos plazos de recuperación de inversiones. Llevar a cabo una reestructuración y modernización de los sistemas de generación y transporte para adecuarlos a las características de las *smart grids* supondría un importante desembolso para las compañías.
 - b. Incertidumbre de las grandes empresas eléctricas para obtener el mismo beneficio que están obteniendo con el sistema tradicional. Con la integración masiva del cliente como generador y contenedor eléctrico, con un balance neto regulado y una gestión de la demanda que mejora la eficiencia energética, las grandes empresas pasarían a encontrarse en un marco económico diferente, donde el cómputo global podría o no superar los beneficios que obtienen hoy en día.

- c. Redefinición de las tarifas eléctricas teniendo en cuenta el sistema de gestión de demanda y al consumidor como parte activa en la generación eléctrica.
 - d. Inexistencia de un marco regulatorio de incentivos por inversión.
- Barreras técnicas:
 - a. Dudas respecto a la madurez de las tecnologías que evolucionan día a día.
 - b. Necesidad de coexistir y cohabitar durante un periodo de tiempo prolongado con la red actual con el fin de adecuar las nuevas redes sin perder prestaciones.
 - c. Falta de estándares en las TIC que utilizan los aparatos de cada empresa suministradora, lo que dificulta definir una estrategia común.
 - d. Cambios en la manera de proceder a la hora de ejecutar edificios o intervenir en futuras rehabilitaciones.
- Barreras regulatorias:
 - a. Necesidad de regular múltiples aspectos derivados de la implantación de las *smart grids* (generación distribuida, generadores virtuales, almacenadores, propiedad de contadores ...).
 - b. Diferencias entre los mercados que dificultan el desarrollo de soluciones eficientes.

Además, el modelo de implantación de estas redes genera una controversia en el ámbito social. Por una parte, existe una falta de conciencia tecnológica por una gran parte de la población y en especial de las personas de edad más avanzada, y, por otro lado, está la desconfianza que genera que el sistema analice y tenga constancia de las tendencias energéticas de cada usuario, temiendo por la seguridad y protección de datos.

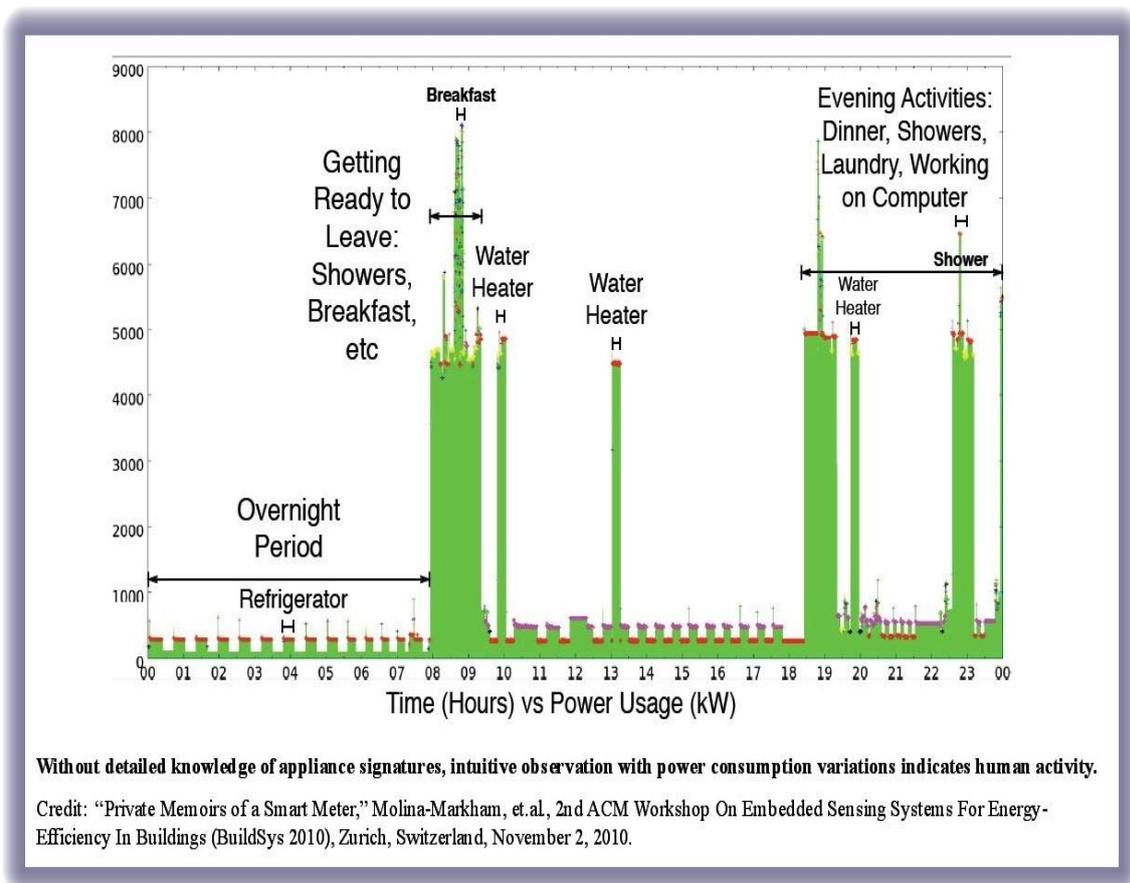


Figura 11. Perfil de consumo eléctrico de un hogar. [26]

3.5 Actores involucrados

Con la aparición de las *smart grids* surgen nuevos agentes involucrados e interesados que colaboran para dar forma al modelo conceptual de las Redes Inteligentes [23].

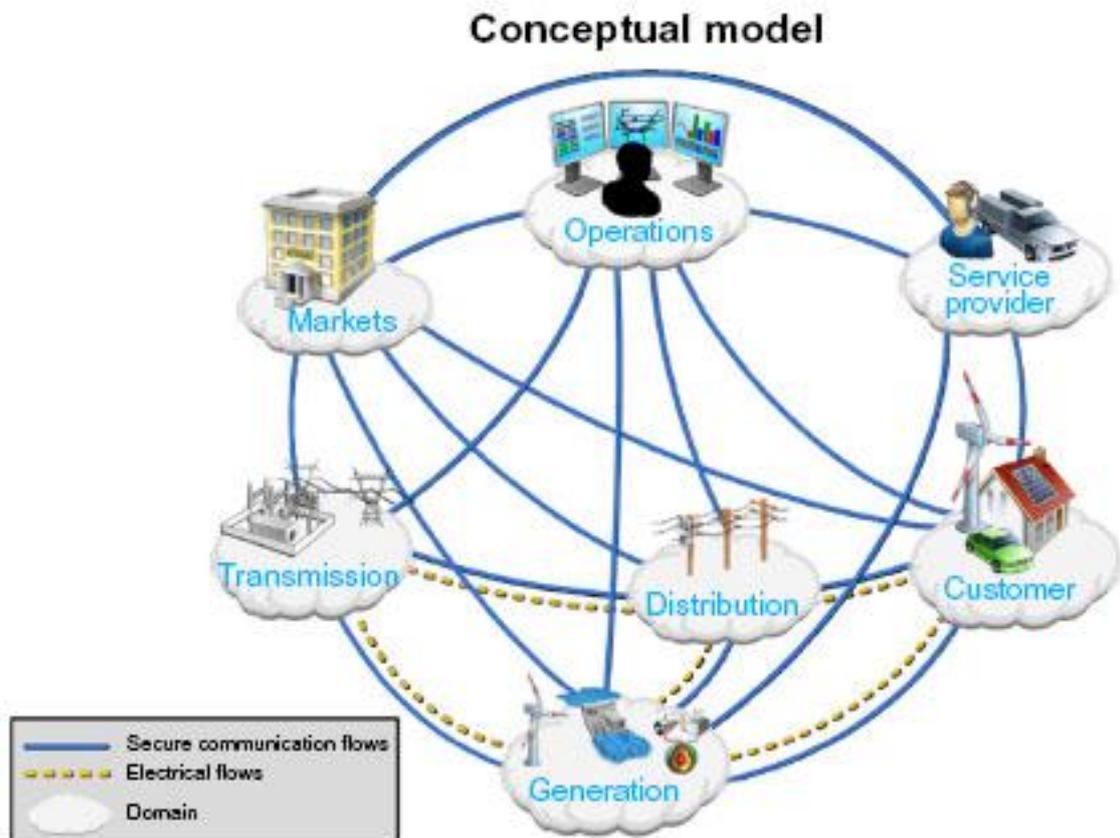


Figura 12. Esquema conceptual de agentes involucrados en las *smart grids* [27]

- **Usuarios:** Se convierten en agente activos, capaces de generar su propia energía para su uso particular, teniendo opción de vender el excedente generado devolviéndolo a la red. Los consumidores saldrán favorecidos del sistema de tarificación en tiempo real pudiendo pagar solo por la energía que consumen.
- **Compañías de redes eléctricas y servicios energéticos:** Deben satisfacer las exigencias de los usuarios dándoles soluciones efectivas y eficientes, ofreciéndoles las mejores opciones para reducir costos. Además, deben ser las encargadas de introducir los avances tecnológicos en las redes y en los hogares de sus clientes.

- **Investigadores y desarrolladores (I+D):** Las nuevas tecnologías de la información y comunicación son primordiales en la viabilidad de los proyectos de implantación de las *smart grids*: para cumplir los objetivos que persiguen, hacer frente a ataques cibernéticos, manejar información de millones de usuarios a tiempo real y procesarla óptimamente se necesitan los últimos avances en materia tecnológica. Parece lógico pensar que será necesaria una gran inversión en I+D.
- **Operadores:** Gracias al libre comercio, el consumidor puede elegir el operador y las tarifas que mejor cumplan sus expectativas y satisfagan sus necesidades.
- **Generadores:** Aparecen agentes independientes que aportan energía a la red, el concepto de *smart grids* fomenta la participación de estos generadores facilitándoles acceso tecnológico y normativo.
- **Reguladores:** El mercado de energía europeo y sus servicios relacionados deben ser apoyados por un marco regulador claro y estable, con normativas bien establecidas para toda Europa que faciliten la labor de los agentes involucrados.
- **Agentes gubernamentales:** Son los encargados de preparar las nuevas legislaciones que se encarguen de regir todos los matices, gestiones y trámites relacionados.

4. ARQUITECTURA Y ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA SMART GRID

4.1 Infraestructura de Medida Avanzada (AMI)

Como se ha visto un elemento clave y primordial en el concepto de *smart grid* es la comunicación bidireccional y realizar una óptima gestión de la demanda energética en cada momento.

En el año 1974 el Sr. Paraskevakos en EE.UU. obtuvo la primera patente de la tecnología AMR (*Automatic Meter Reading*), en 1977 desarrolló y produjo el primer sistema de medida automatizada [28], AMR cuantifica el consumo de los distintos usuarios a distancia y mejora la eficiencia con respecto a los medidores electromecánicos. El problema es que este sistema no permite realizar una comunicación bidireccional, y por consiguiente tampoco es capaz de realizar la gestión de la demanda energética que persigue el modelo de las redes inteligentes.

Es por ello que surge la Infraestructura de Medida Avanzada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*), un sistema de comunicación bidireccional que conecta medidores inteligentes y otros dispositivos de gestión de energía, que es capaz de conectar y desconectar servicios a distancia, registrar formas de onda, vigilar tensión y corriente y ofrecer información en tiempo real de la demanda energética de las empresas.

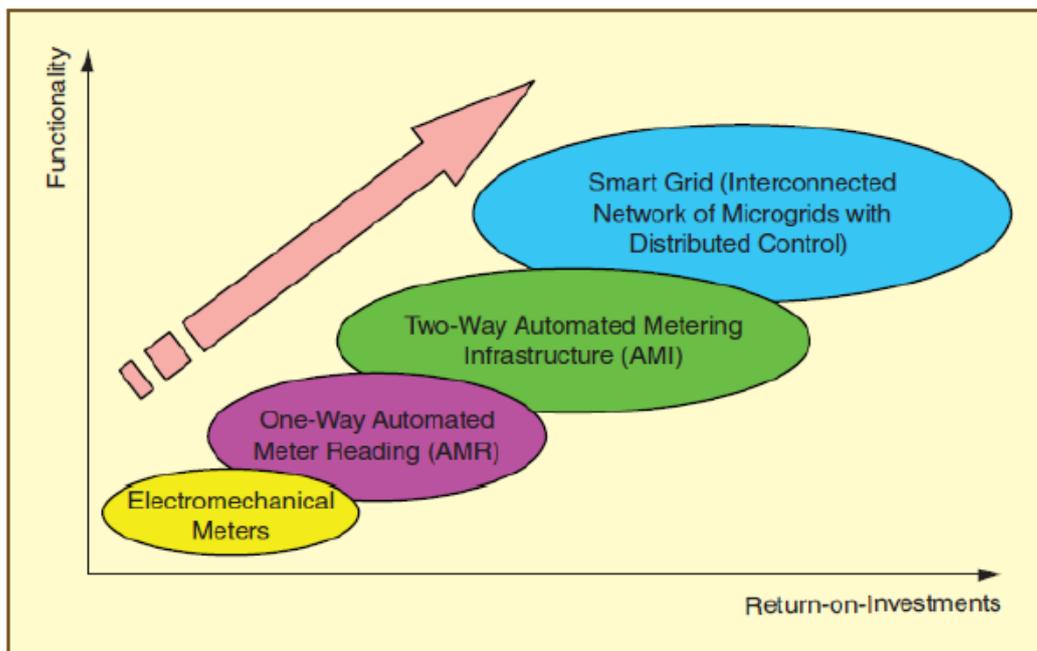


Figura 13. Evolución de sistemas medición *smart grid* [29]

4.2 Arquitectura general de una *smart grid*

Dentro de la nueva red eléctrica inteligente se pueden encontrar dos niveles diferenciados en su arquitectura, estos son: energía y comunicaciones.

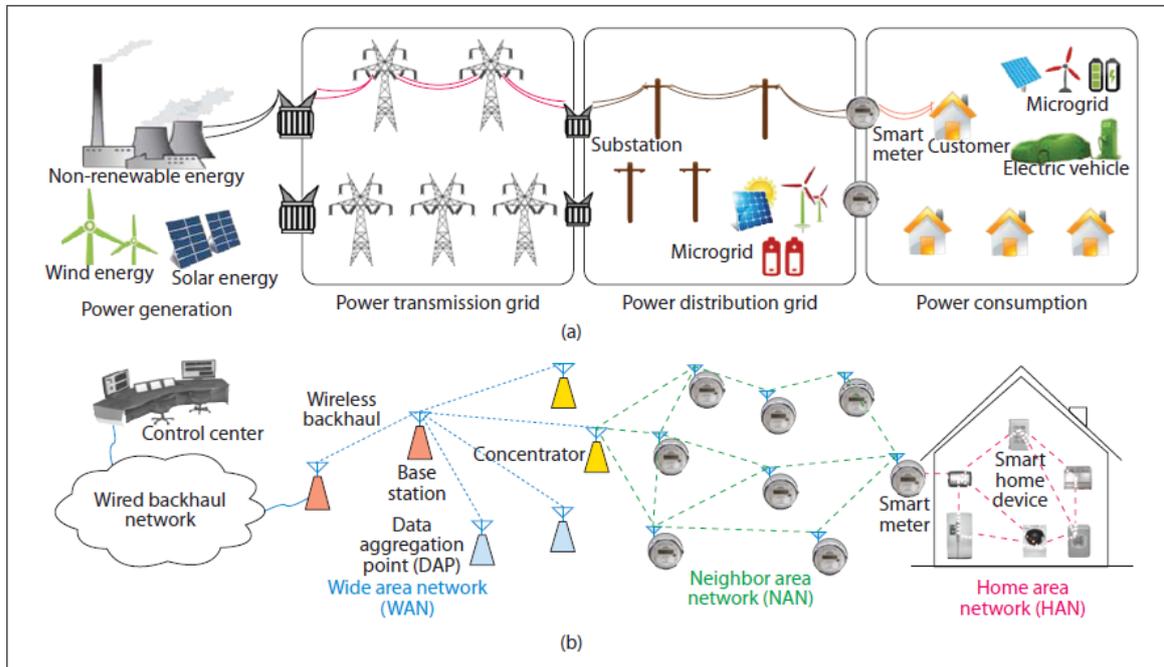


Figura 14. Arquitectura general de un *smart grid* [30]

Con respecto al campo de la energía se distinguen cuatro áreas funcionales al igual que en la red eléctrica tradicional: generación, transporte, distribución, y consumo. Pero en las *smart grids* el modelo es más complejo, no toda la energía se proporciona a través de las centrales eléctricas tradicionales, en las *smart grids* esta energía puede ser también entregada por las fuentes renovables, por la gestión de demanda de los sistemas de almacenamiento y por la generación distribuida..

La arquitectura de las comunicaciones es un sistema que combina gran variedad de tecnologías (con la utilización de la IP como protocolo unificador de múltiples protocolos, dominios internos y externos). Dichas tecnologías requieren interfaces bien definidas, por ello se ha buscado la estandarización a través de estos tres subniveles [17] [30]:

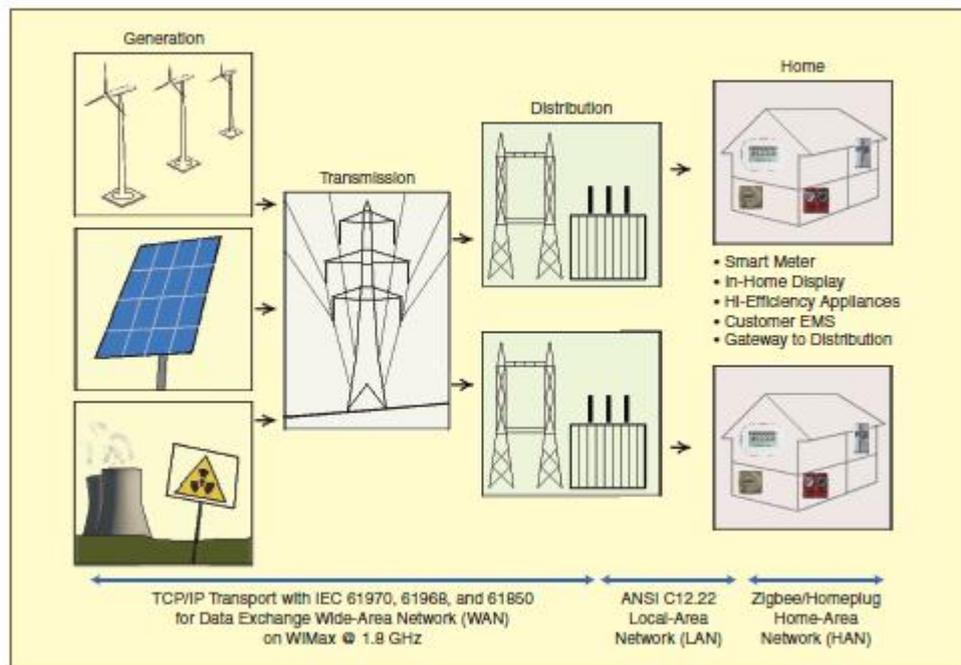


Figura 15. Arquitectura de comunicaciones de una *smart grid* [29]

- **HAN** (*Home Area Network*): Es una red de comunicaciones de corto alcance que conecta electrodomésticos y otros dispositivos en el entorno de una vivienda o edificio para controlar la información permitiendo un mejor consumo de energía. El objetivo es que esta capa sea transparente a las superiores interactuando con ellas independientemente de las tecnologías utilizadas, (ya que no existe una estandarización en las tecnologías a nivel doméstico). Estas redes a su vez pueden estar conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como los PEV (*Plug-In Electric Vehicle*), fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento. Dependiendo si nos encontramos ante un edificio o una empresa se requiere una BAN (*Building Area Network*) o una IAN (*Industrial Area Network*).
- **NAN** (*Neighbor Area Network*): Este nivel proporciona el intercambio de la información de los contadores inteligentes (*smart meters*) entre los usuarios consumidores y las compañías eléctricas. Una NAN proporciona cobertura dentro de un área geográfica limitada que puede abarcar varios edificios.
- **WAN** (*Wide Area Network*): Es la red de más alto nivel, cubre áreas más amplias e integran por lo general varias redes de menor tamaño. Recopila datos e información procedentes de la NAN y se encarga de transmitirlos recorriendo largas distancias, a compañías eléctricas, estaciones de distribución de energía, subestaciones, redes de distribución y centros de control.

4.3. Micro-redes

Las redes eléctricas inteligentes son concebidas como el conjunto y la unión de micro-redes coordinadas e interconectadas entre sí.

Una micro-red puede definirse como un conjunto de cargas y generadores que forman una red en miniatura que puede funcionar de manera independiente o conectada a la red global. Integran sus propios métodos de generación de energía, generalmente de fuentes renovables y tienen la capacidad de satisfacer la demanda energética local comportándose como una pequeña fuente de energía y se complementa junto con el resto de la red en caso de necesidad [23]. Las micro-redes integran sensores inteligentes que aportarán información, datos y medidas en tiempo real a los centros de nivel local, que actúan de núcleo capaz de controlar la micro-red y como punto de conexión con el resto de micro-redes.

Por lo tanto, las micro-redes para poder catalogarse como tal, deben de cumplir una serie de requisitos fundamentales:

- Deben existir fuentes de generación eléctrica cercanas a las cargas (los elementos consumidores de la energía).
- Han de tener sistemas de almacenamiento de energía para paliar las posibles intermitencias de energía propias de las fuentes provenientes de energías renovables.
- Es necesaria la integración de elementos “inteligentes” para controlar y gestionar la energía que se está produciendo de forma local de manera eficiente.
- Deben ser capaces de funcionar de modo aislado.

La utilización de estas redes a pequeña escala otorga a la red global mayor robustez al tratar determinadas zonas de la red como elementos independientes. Como se ha mencionado, el uso de micro-redes optimiza la red dotándola de mayor eficiencia en el transporte energético al ser menor la distancia que separa la producción y el consumo.

4.3.1 Elementos básicos que componen las micro-redes

Los elementos más importantes que forman parte de la configuración de una micro-red son los siguientes [31]:

- **Inversores:** convierten la corriente continua vertida de los sistemas de generación de energía, (como instalaciones fotovoltaicas o generadores eólicos) en corriente alterna,
- **Contadores inteligentes:** son medidores AMI que usualmente cuentan con controladores de energía programables para establecer límites de consumo, con un puerto HAN y servicios de tarificación bajo demanda. Para su implantación en las redes inteligentes, estos contadores, a aparte de mantener los elementos básicos como son el sistema de medida, la memoria y el dispositivo de información principal, cuentan con elementos complementarios para ampliar sus capacidades: sistemas de cálculo, procesadores de cálculo y comunicaciones y dispositivos de accionamiento y control.
- **Concentrador:** es un elemento intermedio entre el sistema de gestión y control y los *contadores inteligentes*. Hace factible su comunicación [32].
- **Aplicaciones *multi-utility*:** los sistemas de tele-gestión están preparados para incorporar datos de medida de otras compañías de otros servicios como el agua y gas.

Dispositivos de seccionamiento: su función es mantener aislada eléctricamente una parte de la instalación eléctrica, dejando dicha sección sin carga o en vacío, para poder acceder a ella en condiciones de seguridad.

- **Recursos distribuidos:** tanto de generación como de almacenamiento, constituyen fuentes de energía que puedan funcionar de manera independiente y autónoma pero que también puedan conectarse a la red principal.
- **Control y manejo de la micro-red:** esta sección debe mantener los valores de tensión y frecuencia dentro de sus límites establecidos y realizar el control de las operaciones dentro de la micro-red.

4.4. Principales tecnologías implicadas

4.4.1. TICs: tecnologías de la información y comunicaciones

Las tecnologías de información y telecomunicación (TICs) forman el sistema nervioso del sistema eléctrico, garantizando la coordinación de los agentes que lo componen. Permiten gestionar y controlar el suministro eléctrico en un marco de sostenibilidad técnica y económica.

En la actualidad se están introduciendo cada vez más TICs en los equipos y sistemas de la red eléctrica, proporcionando mayor capacidad de interconexión, aportando mayor nivel de inteligencia a la hora de suministrar la energía a los usuarios.

Una *smart grid* requiere de una arquitectura de red y de infraestructura que posibilite el intercambio continuo de información, pero, para asegurar la interconexión efectiva de los equipos y sistemas se requiere de estándares de comunicación que definan un lenguaje común que facilite el intercambio de datos.

Una vez transmitidos los datos, es necesario tratarlos para transformarlos automáticamente en información, usando herramientas y aplicaciones que utilicen dicha información para mejorar el servicio, la fiabilidad y la eficiencia.

La gestión de toda esta información es una tarea compleja debido a la cantidad de datos que se necesitan transmitir, y a medida que se vayan introduciendo más aplicaciones o funcionalidades a las *smart grids* la cantidad de datos a tratar será aún mayor.

4.4.2. Contadores Inteligentes

Como se ha mencionado reiteradas veces para que una red adquiera "inteligencia" es necesario el procesamiento de gran cantidad de información procedente de distintos elementos.

La introducción de los contadores inteligentes en las redes eléctricas hace posible obtener, almacenar y enviar a los centros de control y procesamiento dicha información.

Según las funcionalidades o servicios que adopte podemos encontrar dos grupos de contadores: AMR y AMI [33].

- **AMR (Automatic Meter Reading):** son contadores habilitados para la telemedida. Este tipo de contadores son pasivos y la comunicación es unidireccional, por lo tanto, las compañías distribuidoras solo podrán leer la energía de manera remota.
- **AMI (Advanced Metering Infrastructure):** el contador puede ser leído y gestionado de forma remota mediante una comunicación bidireccional.

Con la introducción del nuevo modelo de contador AMI se crean nuevos servicios como:

- Gestionar los equipos remotamente, pudiendo llevar a cabo labores de conexión y desconexión sin necesidad de que un técnico se encuentre en el lugar donde está instalado.
- Permiten realizar cambios de la potencia contratada remotamente y aplicar el modo de facturación de discriminación horaria, una modalidad según la cual se aplica el coste de la energía en el momento en que se consume. Esto va a permitir al consumidor gestionar cuando hacer uso de su energía.
- Monitorizar la calidad de onda y el control de las redes eléctricas con el fin de hacer una gestión más eficiente.
- Permiten la lectura y tratamiento de la información de forma remota, viendo el consumo en tiempo real.

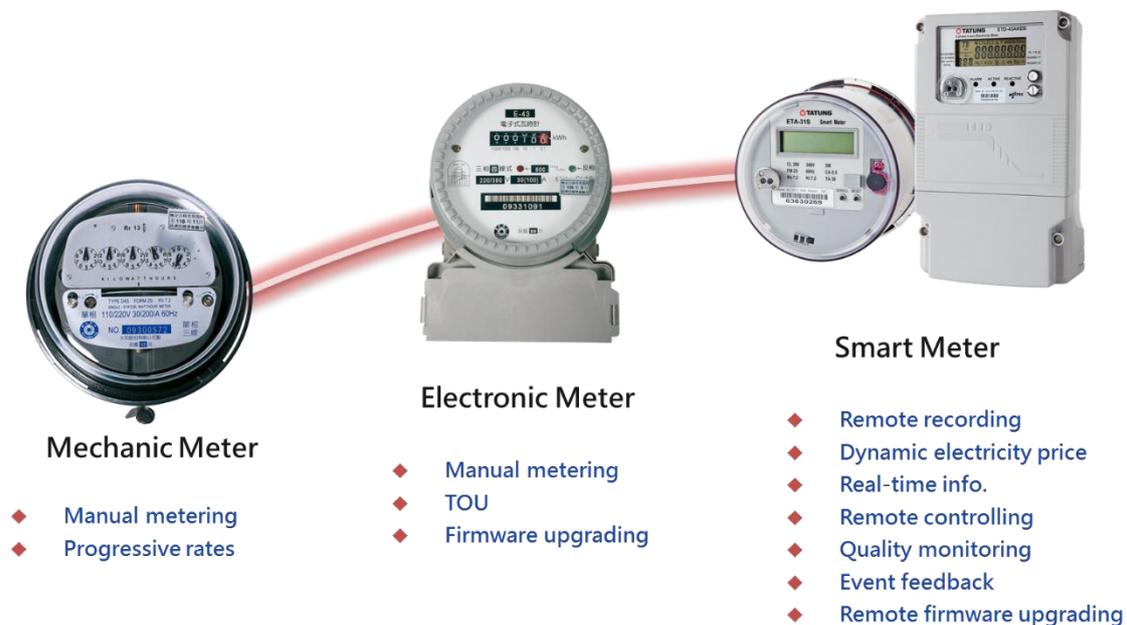


Figura 16. Diferencias entre medidores [34]

Dentro de los medidores inteligentes se pueden encontrar los siguientes bloques de medición básicos [35]: unidad micro-controladora, convertor analógico-digital, AFE (*Analog-Front End*), pantalla de cristal líquido, unidad de interfaz, reloj en tiempo real, algoritmos de seguridad y protocolos de comunicación.

4.4.3. Sensores

Los sensores son componentes esenciales en las *smart grids*. Se encargan de detectar magnitudes físicas para convertirlas en señales eléctricas que una vez transmitidas y almacenadas se convierten en datos que serán tratados.

Los sensores además de medir y monitorizar distintos aspectos de la red, deben de tener un alto grado de inteligencia y ser capaces usar la comunicación para enviar datos. Dentro del contexto de *smart grids* los sensores inalámbricos tienen un gran potencial por su menor coste de instalación.

Haciendo una monitorización del estado de algunos equipos de la red, se puede llegar a conocer su estado y su condición en tiempo real para determinar si hace falta algún tipo de intervención de mantenimiento.

Uno de los sensores que más va a favorecer el uso de nuevas aplicaciones dentro de la red de transporte y distribución son los sincrofasadores o Unidades de Medición Fasorial (*Phasor Measurement Units, PMU*). Con esta técnica se realizan medidas sincronizadas en todo el sistema, el voltaje medido localmente se compara con una onda de referencia global, obteniendo información en fases de todo el sistema que permite realizar mediciones [36]. Los PMUs cuentan con una amplia variedad de aplicaciones que necesitan conocer la situación de la red en tiempo real, como es el caso de la detección precoz de situaciones de riesgo de inestabilidad, permitiendo una operación de la red más cerca de sus límites operativos, térmicos y de estabilidad. Además, [35] son en torno a 100 veces más rápidos que los sensores que implementan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

ATTRIBUTE	SCADA	PMU
Resolution	1 sample every 2-4 seconds (<i>Steady State Observability</i>)	10-60 samples per second (<i>Dynamic/Transient Observability</i>)
Measured Quantities	Magnitude Only	Magnitude & Phase Angle
Time Synchronization	No	Yes
Total Input/ Output Channels	100+ Analog & Digital	~10 Phasors 16+ Digital 16+ Analog
Focus	Local monitoring & control	Wide area monitoring & control

Figura 17. Diferencias entre sensores PMU y sensores SCADA [37]

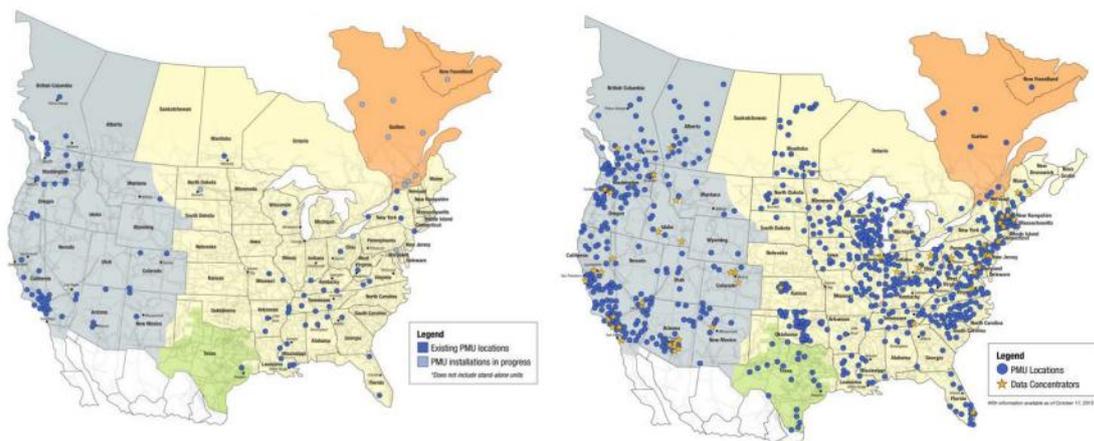


Figura 18. PMUs instalados en 2007 en EE.UU. [38] Figura 19. PMUs instalados en 2013 [38]

4.4.4. Sistemas de almacenamiento de energía

Uno de los pilares básicos sobre los que se sustenta la red eléctrica está en el equilibrio permanente entre la generación y la demanda. Los consumidores no siempre hacen un gasto constante de la energía, por lo que se hace necesario hacer predicciones sobre la demanda energética y en base a esta, realizar una generación acorde en todo momento.

De igual manera, es conocida la incapacidad del sistema de almacenar energía eléctrica en cantidades significativas a unos costes aceptables, para ser utilizada en periodos de mayor demanda o periodos punta.

Uno de los propósitos de las *smart grids* es el poder aprovechar al máximo el uso de las fuentes renovables para maximizar la generación de la energía, reduciendo al mismo tiempo la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, la dificultad en la predicción del recurso en las fuentes renovables y las fluctuaciones en su generación hace que sea complicado depender únicamente de estas fuentes como sistema de generación de energía. Siempre será necesario la aportación de fuentes complementarias que puedan cubrir la demanda en periodos en los que la generación a través de fuentes renovables se hace imposible debido a las condiciones ambientales, lluvias, brillo del sol, viento, etc.

El almacenamiento de energía local para combatir los picos de demanda energética y poder hacer frente a la intermitencia de la generación proveniente de fuentes renovables ha propiciado que los investigadores estén trabajando en desarrollar distintas tecnologías sobre métodos de almacenamiento de energía. Sin embargo, su introducción en la red eléctrica, al encontrarse algunas todavía en fase embrionaria y tecnológicamente inmaduras [33], provoca que sea un mercado con un atractivo menor en el desarrollo de algunas tecnologías a corto plazo (grandes inversiones necesarias).

Los beneficios esperados de la implantación de estas tecnologías a gran escala para la red eléctrica comprenden un incremento de la capacidad efectiva de la red de transporte y distribución y la mejora de la fiabilidad del sistema.

El conjunto de tecnologías de almacenamiento que se están desarrollando se basan en una serie de principios mecánicos, térmicos, electroquímicos y electromagnéticos que determinan, a su vez, su clasificación en diez tipologías:

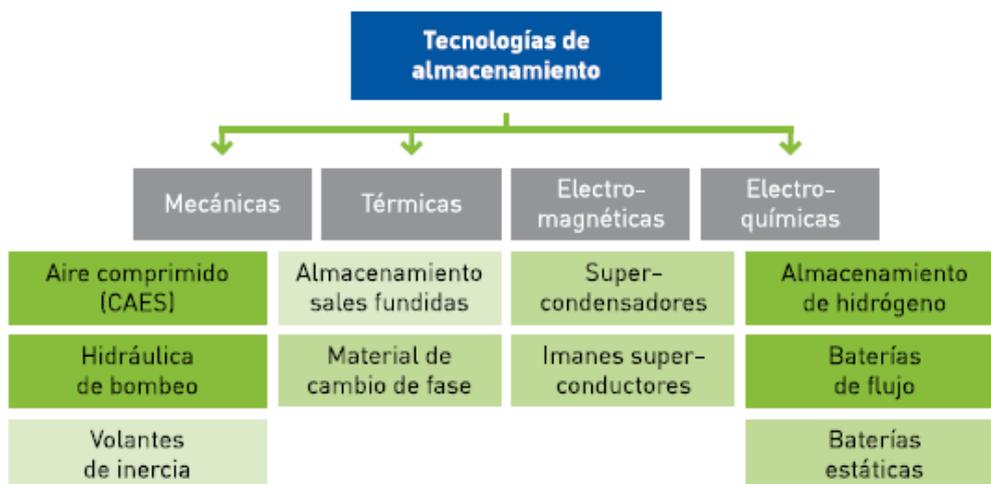


Figura 20. Diferentes tecnologías de almacenamiento de energía [6]

- **CAES** (*Compressed Air Energy Storage*): consiste en almacenar energía por aire comprimido, para ello aprovecha la energía sobrante durante las horas valle (menos demanda de energía) para comprimir aire y almacenarlo en compartimentos subterráneos que posteriormente liberan el aire y alimentan a una turbina generadora de electricidad durante las horas de más demanda.

- **Hidráulica de bombeo:** durante los periodos de poca demanda se utiliza la electricidad sobrante para bombear agua a un depósito situado a una altura superior, para en periodos punta hacer correr el agua hacia el depósito inferior alimentando una turbina para generar la energía. Se considera una tecnología madurada pues lleva muchos años implantada en algunas centrales hidroeléctricas.
- **Volantes de inercia:** se almacena la energía en forma de energía cinética de rotación, aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad de giro del volante. Los volantes giratorios se conectan a un motor que devuelve la energía para ser utilizada.
- **Imanes superconductores:** a través de esta tecnología se almacena energía en forma de campo electromagnético, el cual se crea a partir de la circulación de corriente continua a través de bobinas superconductoras.
- **Supercondensadores:** Almacenan la energía en forma de campo eléctrico al estar formados por grandes láminas separadas por material dieléctrico que, sometidos a una diferencia de potencial, adquieren carga eléctrica. Estos no sufren degradación con los ciclos de uso al no ocurrir reacciones químicas en su interior.
- **Baterías de flujo:** Existen gran variedad, pero su máximo desarrollo se encuentra en las de tipo Redox⁷⁶ de vanadio y las de sodio y azufre.

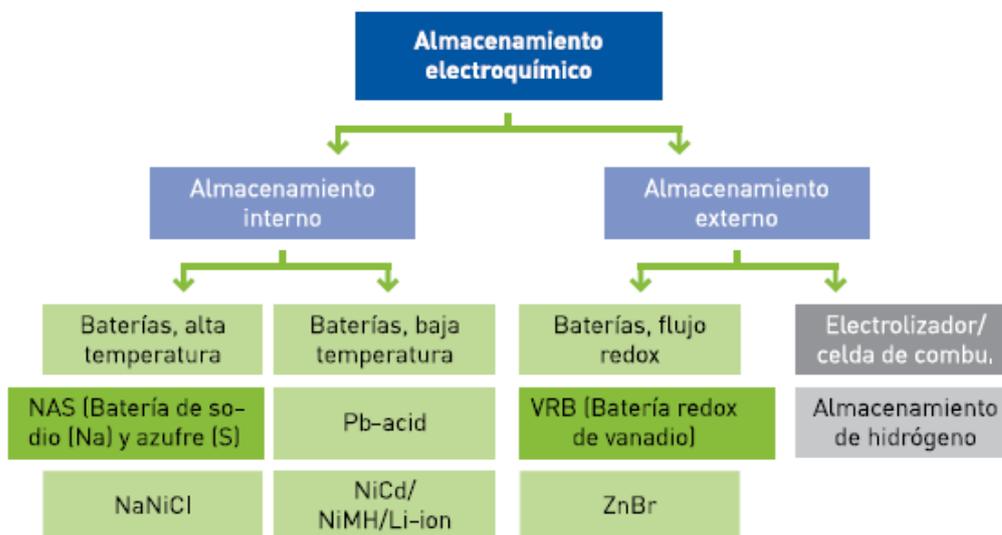


Figura 21. Clasificación baterías de almacenamiento electroquímico [6]

- **Almacenamiento de hidrogeno:** Su funcionamiento consiste en la electrolisis para la generación del H₂ (y O₂) y el posterior almacenamiento del H₂ en emplazamientos, lo que permite una posterior generación eléctrica en turbinas o celdas de combustible.
- **Sales fundidas:** Esta tecnología se basa en la utilización de la energía solar de concentración para calentar tanques de sales fundidas. El calor que se almacena no ha de convertirse inmediatamente a electricidad a través de una turbina de vapor, sino que puede almacenarse durante algún tiempo.

En la actualidad las distintas tecnologías se encuentran en distintas fases de madurez y traen consigo algunas ventajas, desventajas y costes en su implantación y desarrollo que las posicionan como alternativas más o menos viables a gran escala en función de las demandas de generación y las circunstancias.

	Madurez	Coste de la energía	Limitación del emplazamiento	Oposición pública	Apoyo político
CAES	Parcialmente madura	Superior en la mayoría de aplicaciones	En países desarrollados posibilidad de construcción	Leve	Países desarrollados financian I+D
H₂	Debe demostrarse a gran escala	Superior sólo a gran escala y largo plazo	En países desarrollados posibilidad de construcción	Objeciones sobre seguridad	EE.UU.: proyecto de ley presentado al congreso del 20% de créditos fiscales a la inversión
Baterías de flujo	Debe demostrarse a gran escala	Superior sólo a pequeña escala y corto plazo	Sin requisitos geológicos concretos	Poca objeción medioambiental, excepto vertidos de químicos	UE: Alemania elimino la tarifa por uso de la red para instalaciones de almacenamiento
Hidráulica de bombeo	Madura	Competitiva en costes según la ubicación	Europa ya dispone de ellos	Pocas objeciones medioambientales, profundo impacto en el paisaje	OM: sin medidas conocidas

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las principales tecnologías de almacenamiento de energía [6]

4.5. El vehículo eléctrico en la *smart grid*

- La directiva referente a energías renovables 2009/28/CE [39] planteó la necesidad de almacenamiento energético para hacer frente a los picos de demanda e incrementar la integración de energías renovables.
- Según la Estrategia Europa 2020 (2010) [40] para conseguir ahorros en la generación de la energía han de desarrollarse métodos de almacenamiento energético que permitan a las renovables introducirse de forma descentralizada.
- La estrategia de la Unión de la Energía (2015) [41], para reducir los costes de las importaciones energéticas y des-carbonizar la economía se apoya en la eficiencia como primera política energética y en la participación activa y directa en el sistema eléctrico de los consumidores.

En este contexto es donde hace entrada el vehículo eléctrico y su importancia como instrumento para dar más estabilidad a las redes eléctricas, gestionar la demanda, ayudar en la integración de las energías renovables y aportar al consumidor reducciones en su coste energético [42].

Con la introducción del vehículo eléctrico en las redes inteligentes se abre un abanico de posibilidades para conseguir los objetivos anteriormente mencionados, como la posible comunicación entre distintos puntos de carga y los centros de control para gestionar de forma eficiente la carga del vehículo teniendo en cuenta la discriminación horaria, reduciendo el coste energético. Igualmente, el propietario del vehículo podría vender a la red eléctrica la energía que tenga almacenada o utilizarla cuando la necesite dentro de su propio hogar, en momentos de más demanda.

Sin embargo, para conseguir esta mejora en la eficiencia de la red se necesitarán pasos decisivos como:

- Un cambio en la regulación eléctrica que siga la línea de la eficiencia energética, facilitando la generación distribuida, el almacenamiento energético, los contadores inteligentes, que otorgue el derecho al consumidor a usar las tecnologías que le permitan hacer una gestión correcta y económica de la energía.
- Potenciar los puntos de recarga, hacerlos accesibles a los usuarios desarrollando una infraestructura de carga equiparable a la cantidad de vehículos eléctricos en carreteras y núcleos urbanos.

Como se menciona en el capítulo de los aspectos claves de las *smart grids*, la tecnología utilizada para la implantación del vehículo eléctrico dentro de la red eléctrica inteligente es las V2G con sus distinciones en cuanto a si el vehículo se conecta a la red, a una vivienda o a un edificio. Sin embargo, aunque esta tecnología tiene un gran potencial, tiene algunas limitaciones que deben superarse [43].

Uno de los principales inconvenientes es la prematura degradación de sus baterías debido al alto número de cargas y descargas que deben realizar, y los costes que supondría la sustitución de dicha batería. Según el estudio de *Plug In America "EV Battery Amortization Costs and Vehicle To Grid [44]"* los usuarios de vehículos eléctricos deben recibir cantidades de entre 0.17 €/kWh y 0.36 €/kWh por la energía que mandan a la red, para que les salga rentable el uso de la tecnología. Valores que están fuera del mercado.

Otra limitación en la implantación de esta tecnología viene dada por el hecho de que los usuarios deben consentir que el operador del sistema gestione el flujo de energía y para ello la empresa ha de conocer en todo momento si el coche se encuentra conectado, el estado de la batería y la energía almacenada en ella. Es por ello que muchos de los usuarios no están por la labor de dejar a un lado su privacidad y además quieren tener el vehículo con suficiente autonomía ante cualquier imprevisto.

En definitiva, el V2G es una tecnología que posee un gran potencial para complementar a la red eléctrica y contribuir en la consecución de los objetivos marcados por las directivas mencionadas. Pero aún necesita mucha regulación y conocimiento por parte de la sociedad, además de reducir costes.

4.6. Electrónica de potencia

La electrónica de potencia se define como la parte de la electrónica encargada del estudio de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica [45]. En los últimos años el uso de la electrónica de potencia constituye una de las formas mediante las que la red eléctrica se está “volviendo” más inteligente, evolucionando hacia una *smart grid* a través del uso de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) o Sistemas de Transmisión Flexibles de Corriente Alterna. Estos son equipos que ofrecen la posibilidad de regular la transmisión de la corriente alterna, incrementando o disminuyendo el flujo de potencia en líneas específicas.

La red eléctrica necesita entregar potencia a grandes centros de datos y a elementos que requieren la máxima calidad de red y, para lograrlo, tradicionalmente se hacía frente a las congestiones y a los problemas de flujos y capacidad mediante la inversión en nuevas líneas eléctricas. Sin embargo, esta solución cada vez conlleva más costes, limitaciones de presupuesto o permisos medioambientales. Las soluciones FACTS representan una alternativa y han sido consideradas como una de las tecnologías de la década por la IEEE en 2010 [46].

Los objetivos principales que persiguen los FACTS son:

- Incrementar la capacidad de transferencia de potencia de los sistemas de transmisión.
- Mantener los flujos de potencia a lo largo de la red eléctrica para que se adecuen a las distintas condiciones, con el fin de optimizar las condiciones económicas del sistema.

Las tecnologías más comunes de FACTS, representando entre el 80% y el 90% de las aplicaciones [47], son los sistemas SVC (*Static Var Compensator*), compensador estático de reactiva y los STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), compensador estático síncrono.

- **SVC:** facilitan el control de tensión para aumentar la calidad del suministro. Desde el punto de vista del transporte de la energía eléctrica, mejoran la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas y aumentan la capacidad de transferencia de energía y reduce las variaciones de tensión.

- **STATCOM:** su funcionamiento se basa en un convertidor que modula una fuente de tensión de amplitud, fase y frecuencias deseadas. Es un dispositivo capaz de aportar corriente reactiva independientemente del nivel de tensión de la red.
Al contrario que un SVC, un STATCOM es capaz de aportar corriente reactiva a tensiones muy bajas, por lo que es recomendable su utilización en esos casos. Requiere menor inversión y coste de mantenimiento que un SVC.

Los principales beneficios que aportan los FACTS son [48]:

- Mejor control sobre el flujo de potencia, guiándola a través de determinados caminos (menos cargados...).
- Posibilidad de operación con niveles de carga seguros (sin sobrecarga) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia en áreas controladas.
- Aumento de la seguridad del sistema.
- Atenuación de las oscilaciones de potencia del sistema, que son dañinas para los sistemas y equipamientos de la red.
- Rápida actuación ante cambios de condiciones de la red, proporcionando un control del flujo.
- Mayor seguridad en las conexiones entre líneas de distintas compañías y diferentes áreas, así como de generación renovable y distribuida.

Sin embargo, no todo son beneficios, existen algunos aspectos negativos o desventajas en la implantación de estos equipos:

- Coste inicial de instalación: los equipos son muy caros y la inversión inicial es muy elevada.
- Necesidad de ampliar su instalación a la totalidad de la red para aumentar la efectividad del sistema



Figura 22. Construcción de una instalación 132kV *Static Var Compensator* (SVC) [49]

4.7. Redes de comunicación en las *smart grids*

La estructura de telecomunicaciones de las *smart grids* ha de estar preparada para trabajar con grandes cantidades de datos, provenientes de sensores y de todas las aplicaciones y/o dispositivos interconectados en la misma. Por lo tanto, se podría hablar de un sistema ciber-físico, en el que gran cantidad de datos de cientos de miles de contadores inteligentes son adquiridos y procesados.

Esta infraestructura de comunicación debe cumplir ciertos requerimientos de latencia, fiabilidad, escalabilidad, seguridad, interoperabilidad y ubicuidad [36]:

- **Escalabilidad:** las redes de comunicación deben estar diseñadas para permitir su fácil ampliación y diseñadas para hacer frente a futuros cabios.
- **Interoperabilidad:** la red de comunicaciones de una *smart grid* estará integrada por distintas tecnologías que han de ser flexibles para compartir datos y posibilitar el intercambio de información.

- **Ubicuidad:** la red de comunicación tendrá que abarcar todas las ubicaciones que forman parte de la *smart grid* para permitir la comunicación entre dispositivos situados a distancias considerables.
- **Seguridad:** se van a transmitir gran cantidad de datos relevantes, información de consumo de muchos clientes, señales de control para la estabilización de la red eléctrica. La seguridad dentro de la red de comunicaciones ha de abarcar aspectos como la autenticidad y disponibilidad de los datos en momentos determinados y ser capaz de asegurar la privacidad y confidencialidad de la información.
- **Fiabilidad:** la red debe de realizar todas sus tareas correctamente en todo momento.
- **Latencia:** se van a transmitir gran cantidad de datos entre dispositivos que van a determinar el comportamiento de algunos dispositivos en tiempo real, por lo tanto, será necesaria una red en la que se minimicen los retardos en la recepción de la información para gestionarse la respuesta más óptima lo más rápido posible.

Las necesidades para gestionar servicios adicionales a los consumidores se basan en la asociación de las redes de comunicación con la estructura AMI de flujo bidireccional, así estos clientes podrán tener una gama de beneficios como la monitorización del uso de energía, economizar en función del precio de la energía, etc.

Como se comentó anteriormente en las redes de comunicación de una *smart grid*, existen tres segmentos de comunicación entre distintas áreas de la red (HAN, NAN y WAN). Definir la tecnología en cada segmento es un gran desafío al que se enfrenta la implantación de estas nuevas redes inteligentes. Se hace necesario actualizar la red de comunicación del sistema eléctrico mediante la incorporación de las nuevas tecnologías de comunicación, que ofrecen un mayor ancho de banda (fibra óptica, enlaces inalámbricos, etc.).

A nivel HAN los requerimientos de ancho de banda no son tan exigentes, pero se requiere de escalabilidad y buena cobertura. Pueden emplearse tecnologías como Bluetooth para comunicar dispositivos en distancias cortas, tecnologías como ZigBee, PLC (*Power Line Communications*) es decir comunicación a través de suministro eléctrico y WiFi, que pueden emplearse junto a redes de sensores para interconectar distintos dispositivos en los hogares.

El transporte de las lecturas de los medidores de consumo eléctrico requiere un mayor ancho de banda para disminuir la latencia y así proporcionar respuesta en tiempo real. Las tecnologías más redundantes son Red Inalámbrica Móvil 4G LTE/GSM o WiMAX (Red de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), Red Híbrida Fibra–Coaxial (HFC) o Línea de Abonado Digital (DSL). La opción más fiable, robusta y con posibilidades de escalabilidad es el empleo de una Red Óptica Pasiva (*Passive Optical Network*, PON). [50]

Tipo de red	Alcance (m)	Requerimientos de tasa de datos	Tecnologías
HAN	0-50	Baja tasa de bits para control de la información.	Zigbee, Wi-Fi, PLC, Ethernet
NAN	0-700	Capacidades de decenas de cientos de Kbps	Zigbee, Wi-Fi, PLC, 3G
WAN	Decenas de Km	Dispositivos de Alta capacidad tal como es un <i>router / switch</i> de alta velocidad (capacidades entre cientos de Mbps y Gbps por nodo).	Ethernet, Microonda, WiMAX, 3G–4G/LTE, PON

Tabla 3. Requerimientos de potenciales redes de comunicaciones para *smart grid* [36]

Tecnología	Ventaja	Desventaja	Nivel
Zigbee	Muy bajo costo y consumo de energía. Auto-organización red de malla segura y confiable. Puede soportar un gran número los usuarios.	De muy corto alcance. No penetra en estructuras bien. Velocidades de envío de datos bajas.	HAN
WiFi	Bajo costo. Uso y experiencia generalizada. Bajo costo de desarrollo de aplicaciones. Estable y con estándares maduros.	No penetra en los edificios de cemento o sótanos. Problemas de seguridad con múltiples redes que operan en los mismos lugares.	HAN, NAN y WAN
3G celular	Infraestructura costosa ya ampliamente desplegada. Estable, madura y bien estandarizada. Conjuntos de chips de muy bajo coste, y los precios de los equipos siguen cayendo. Conocimiento en implementación. Gran selección de proveedores y prestadores de servicios.	El proveedor de servicio debe alquilar la infraestructura de una compañía, por lo que no posee la infraestructura. La fase de transición a LTE se encuentra en desarrollo. No demasiado estable y segura para aplicaciones de misión crítica. No muy adecuado para aplicaciones de alto ancho de banda.	NAN y WAN

LTE	<p>Baja latencia y alta capacidad.</p> <p>Totalmente integrado con 3GPP, (grupo de asociaciones de telecomunicaciones que asientan las especificaciones y estándares para un sistema de comunicación global 3G).</p> <p>Movilidad total para más y mejores servicios multimedia.</p> <p>Bajo consumo de energía.</p>	<p>El proveedor de servicio debe alquilar la infraestructura de una compañía.</p> <p>Difícilmente disponible en muchos mercados.</p> <p>Alto coste de los equipos.</p> <p>Falta de experiencia en el diseño de redes.</p>	<p>NAN y WAN</p>
WiMAX	<p>Backhaul (usado para interconectar redes entre sí) eficiente de los datos.</p> <p>Soportes QoS da garantía de servicio.</p> <p>Mejora la fiabilidad y la seguridad.</p> <p>Red simple, escalable y con despliegue de equipos locales del cliente (CPE).</p> <p>Velocidades más rápidas que 3G celular.</p> <p>Gran variedad de CPE</p>	<p>El acceso limitado a las licencias de espectro en Estados Unidos.</p> <p>Velocidades de carga y descarga asimétricas.</p> <p>Varios usuarios comparten ancho de banda. Compitiendo contra 4G y su desarrollo.</p> <p>Estándares de celulares para alta capacidad y redes IP.</p>	<p>NAN y WAN</p>

Tabla 4. Diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica [30]

5.SITUACIÓN DE LAS SMART GRIDS EN LA ACTUALIDAD

5.1. Normativa y regulación española

En el marco normativo español no existe una ley específica que regule la integración de las redes inteligentes en el sistema eléctrico, sin embargo, existen algunas normativas que regulan algunos aspectos relacionados con los conceptos que las *smart grids* manejan. Las más importantes, y las que ayudarán relativamente a implantar el nuevo sistema de red eléctrica inteligente son los siguientes [51]:

- Real decreto 1110/2007 del 24 de agosto. [52]
En él se aprueba el reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico obligando a implantar un sistema homogéneo y efectivo que registre valores como el consumo eléctrico, la generación activa/reactiva y la potencia. Establece los derechos y obligaciones básicos para los diferentes sujetos en relación con la medición de suministro, así como el control de la calidad del suministro eléctrico. También menciona aspectos relacionados con las aplicaciones como que se deberá disponer de capacidad de gestión de cargas, con el objetivo de reducir la demanda en momentos críticos.
- Orden ITC/3860/2007 del 28 de diciembre. [53]
Consiste en una orden en la que se revisan las tarifas eléctricas y se define el plan de sustitución de los equipos de medición. Estipula que *“Todos los contadores de medida en suministros de energía eléctrica con una potencia contratada de hasta 15 kW deberán ser sustituidos por nuevos equipos que permitan la discriminación horaria y la telegestión antes del 31 de diciembre de 2018.”* Adecuándose al siguiente plan de instalación:

a. 2008- 2010: 30%	c. 2015: + 20%
b. 2012: + 20%	d. 2018: + 30%

En España Iberdrola lidera la sustitución de contadores, habiendo sustituido ya un 76% de su parque actual (10,5 millones de dispositivos), con un total de 8 millones de contadores inteligentes. Se estima que esta iniciativa finalizará en el año 2018 y supondrá una inversión global (adaptar unos 80.000 centros de transformación y sustituir los 10,5 millones de contadores) de 2000 millones de euros [54].

Endesa ha sustituido el 69% de su parque de 11,6 millones de dispositivos, superando los 8 millones de contadores instalados [55]. Acelerando el plan de sustitución, en el que trabajan más de mil operarios, la compañía prevé acabar el año 2016 cerca de los 9,2 millones, lo que supondría un 80% del total.



Figura 23. Un técnico instala los nuevos contadores inteligentes. [56]

Como se comentó, una de las mayores barreras que presenta la evolución e implantación de las *smart grids* es la creación de leyes, normativas y políticas energéticas que se adecuen a los cambios en el sistema de red eléctrico que persigue el modelo de *smart grid*.

Las *smart grids* permiten la creación de nuevos servicios y modelos de negocio que requieren una nueva legislación que regule de forma más adecuada este mercado y la creación de políticas de incentivos.

5.2. Políticas energéticas en la UE y distintos países

Las políticas energéticas en los distintos países muestran una tendencia convergente hacia un marco que facilite el desarrollo y el despliegue de las redes inteligentes [36].

5.2.1. Estados Unidos (EE.UU.)

La política energética del gobierno de Estados Unidos tiene como objetivo proporcionar un suministro seguro de energía, mantener los costes de la energía bajos y proteger el medio ambiente reduciendo el consumo, a través de una mayor eficiencia energética y a través del desarrollo de nuevas fuentes de energía, en particular la energía renovable.

EE.UU. ha invertido en recursos energéticos de energías renovables y ha iniciado la modernización de su infraestructura energética. Aunque EE.UU. no es un miembro del tratado de París (2015) que tiene un objetivo de reducción de emisiones de carbono. El Informe de la Federación Mundial de redes inteligentes (*The Global Smart Grid Federation*) de 2012 menciona que los EE.UU. tienen el objetivo de establecer los niveles de emisión de CO₂ alrededor del 17 % por debajo de los de 2005 para el año 2020. Se ha observado también que, en 2010, 663 compañías de electricidad de Estados Unidos habían instalado 20.334.525 infraestructuras de medición inteligente y que la tasa de penetración nacional de contadores inteligentes ya es del 14%. Además, gran parte del costo de la implementación de estos medidores se recupera a través de los consumidores (razón por la que algunos consumidores reaccionaron negativamente).

Con la formación de *Smart Grid Consumer Collaborative*, (una organización sin ánimo de lucro creada para facilitar la cooperación entre los consumidores, defensores, servicios públicos y los proveedores de tecnología), los beneficios sostenibles de la red inteligente pueden ser manejados apropiadamente. El Departamento de Energía de Estados Unidos formó la Oficina de Suministro de Electricidad para la fiabilidad de la energía y la modernización de la red eléctrica. Esta oficina ha diseñado la "GRID 2030", que articula una visión nacional para los siguientes 100 años de electricidad.

5.2.2. Unión Europea (UE)

Opera a través de las instituciones supranacionales y acuerdos intergubernamentales. En 2007 el Consejo Europeo adoptó el objetivo 20/20/20, en el que se pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 %, conseguir que el 20% de la energía primaria provenga de recursos renovables y ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética para el año 2020 [57].

La Directiva de la electricidad 2009/752 /CE, exige que los miembros de la UE han de poner en práctica la medición inteligente en el 80 % de los hogares en 2020. Sin embargo, esto está sujeto a un análisis de coste-beneficio positivo. Los sectores de electricidad de los Estados miembros varían, por lo que el despliegue y sus costes tienen que ser tratados de forma individual.

5.2.3 Japón

El plan de la energía estratégica de Japón 2010 hace hincapié en la seguridad energética, la protección del medio ambiente, el suministro eficiente, el crecimiento económico y la reforma de la estructura industrial de la red de energía. Entre sus ambiciosos objetivos para el año 2030 están: elevar su independencia energética al 70 %, reducir a la mitad las emisiones de CO₂ del sector residencial y el mantenimiento y la mejora de la eficiencia energética en el sector industrial colocándola en el nivel más alto del mundo.

El Gobierno japonés ha adoptado la medición inteligente después del desastre nuclear de Fukushima como una ayuda en la gestión de la demanda. La instalación de Tokyo *Electric Power Co.* (TEPCO), la mayor compañía eléctrica de Japón, impulsada por el gobierno, anunció la instalación de alrededor de 27 millones de contadores inteligentes para los clientes residenciales en el 2014. Los servicios que utilizan medidores inteligentes se pusieron en marcha en julio de 2015 para permitir la medición remota y para proporcionar a los usuarios datos detallados sobre su gestión de la energía.

5.2.4 China

Los contenidos básicos de las políticas energéticas de China se basan en dar prioridad a la conservación, basándose en los recursos nacionales, la protección del medio ambiente, la promoción de la innovación científica y tecnológica, profundización de la reforma, la ampliación de la cooperación internacional y en mejorar la vida de las personas.

El desarrollo de las redes inteligentes en China es una de las prioridades energéticas. Estas incluyen la mejora de la eficiencia energética, aumento en la introducción de las energías renovables y la reducción de las emisiones de carbono.

El gobierno chino ha encargado a organismos como La Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (NDRC) la misión de supervisar los planes de desarrollo de redes inteligentes, el control de los precios de la electricidad y la revisión y aprobación de los proyectos de redes inteligentes. Otros organismos como la Agencia Nacional de Energía (NEA) se encargan de formular e implementar planes de política energética y de desarrollo nacionales, la Comisión Estatal Reguladora de Electricidad (SERC) supervisa la operaciones diarias de las empresas de generación de energía y de las empresas de servicios públicos de energía, el Consejo de Electricidad de china (CEC) ayuda en la formulación de políticas de energía y planes nacionales sobre *smart grids*, y el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) se hace cargo de la investigación y el desarrollo de tecnologías de redes inteligentes.

Puede concluirse, por tanto, que China está prestando una atención considerable al desarrollo y la aparición de las redes inteligentes.

5.3. Proyectos de desarrollo en España

Existen numerosos proyectos o iniciativas que se están desarrollando en España o que se han llevado a cabo en los últimos años. En este apartado se destacarán algunos de ellos debido a su relación directa con las *smart grids*.



5.3.1. Proyecto STAR

El proyecto STAR (Sistemas de Telegestión y Automatización de la Red) es una ambiciosa iniciativa promovida por el Grupo Iberdrola, cuyo objetivo es llevar a cabo una transformación tecnológica en el campo de las redes inteligentes. Este proyecto implicará la sustitución de más de 10,5 millones de contadores para instalar medidores inteligentes. A su vez irá adaptando su red de distribución mediante la incorporación de la supervisión en tiempo real y la automatización, adaptando aproximadamente 80.000 centros de transformación.

Supondrá una inversión global por parte de la compañía en España superior a 2.000 millones de euros, y finalizará en el año 2018 [58].

El proyecto STAR comenzó con un plan piloto en la ciudad de Castellón, para después extenderse al resto de comunidades autónomas del país. A día de hoy se ha completado el proyecto de Castellón, convirtiéndose en la primera ciudad dotada de una red inteligente en agosto de este año cuando se completó la renovación total de sus contadores: 447.615 [59]. Esta innovación permite mejorar la calidad del suministro, atender a las necesidades en términos de energía eléctrica que va a demandar la sociedad en el futuro y gestionar la distribución de energía de la forma más óptima.

Como se comentó con anterioridad, a nivel nacional la empresa ya ha sustituido un total de 8 millones de contadores de su parque eléctrico y ha adaptado alrededor de 48.000 centros de transformación, lo que ha incorporado capacidades de telegestión, supervisión y automatización [60].

Dentro de este proceso de implantación de las redes inteligentes en España, Iberdrola ha adjudicado, durante los últimos años, contratos relacionados con el proyecto STAR a diferentes fabricantes y proveedores, como Indra, AEG, Artech, Elecnor, GE, Gobesa, Ibérica Aparellajes, Premium, Fanox, Ingeteam, Landis&Gyr, Mesa, Orbis, Ormazábal, Sagemcom, Schneider, Siemens, Sogecam, Teldat, Zigor o ZIV, por un importe cercano a los 800 millones de euros. [60]

5.3.2. Proyecto PRICE

Proyecto Conjunto de redes en el corredor de Henares, PRICE, es una iniciativa de Iberdrola junto a Unión Fenosa para afrontar los retos tecnológicos que presentan a nivel mundial los sistemas eléctricos:

- Envejecimiento de los sistemas e infraestructuras eléctricas.
- Crecimiento de la demanda de suministro energético.
- Integración activa en la operación del sistema.
- Aumento de la presencia de fuentes de energía renovables.
- Integración del vehículo eléctrico en la red.
- Necesidad de mejorar la seguridad de suministro eléctrico.
- Necesidad de reducir la dependencia de fuentes de energía de origen no renovable.

Los socios de PRICE (Iberdrola Distribución, Gas Natural Fenosa, Red Eléctrica de España, Indra Sistemas, Indra Software Labs, Ericson, ZIV Metering Solutions, ZIV I+D, Ormazábal, SAC, Current Iberia, FAGOR, Ingeteam, Universidad de Alcalá, CIRCE, Instituto de Investigación Tecnológica, Ikerlan, ITE, Universidad Carlos III, Universidad de Sevilla y Tecnalia) implantaron la primera *smart grid* en la comunidad de Madrid y la provincia de Guadalajara, en el Corredor de Henares.

El objetivo principal del proyecto PRICE era diseñar y desarrollar una nueva plataforma de red inteligente e interoperable mediante la integración de sistemas y equipos en la red de centros de transformación que permitan la supervisión y automatización de la red completa de distribución [61]

La iniciativa iba a beneficiar a las más de 500.000 personas a las que dan servicio ambas compañías en esta zona, conllevaría la instalación de unos 200.000 contadores inteligentes y la modificación de 1.600 centros de transformación para adaptarlos a este nuevo modelo de distribución de electricidad. Respaldado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del programa INNPACTO, PRICE contaría con una inversión de 34 millones €. Su desarrollo se prolongaría hasta finales de 2014 [62]



El proyecto PRICE finalizó en febrero de 2015 no solo cumpliendo los objetivos antes mencionados, si no que ha asentado las bases de otros proyectos europeos como DISCERN (*Distributed Intelligence for Cost-effective and Reliable Solutions*) o IGREENGrid (*Integrating Renewables in the European Electricity Grid*) [63].

5.3.3. Proyecto OSIRIS

OSIRIS (Optimización de la Supervisión Inteligente de la Red de Distribución) se creó en 2014 y es un proyecto de I+D en el que se desarrollan conocimientos, herramientas y equipos que permite optimizar la supervisión de la infraestructura de red inteligente que se está desplegando con la finalidad de maximizar la comunicación entre los elementos que la integran.

Persigue los siguientes objetivos [64]:

- Asegurar el correcto funcionamiento de las comunicaciones en la infraestructura de telegestión, lo cual permitirá conocer el estado en que se encuentra la infraestructura eléctrica.
- Determinar las causas y agentes externos que provocan que las comunicaciones de los contadores con el sistema de telegestión no sea la adecuada.
- Minimizar la falta de información en el equipamiento desplegado en la red de baja tensión, aprovechando así al máximo las funcionalidades que proporciona el hecho de disponer de esta información para la gestión activa de la demanda, la generación distribuida y la eficiencia energética.
- Detección anticipada de averías en la red, o comprobación de la misma en caso de aviso, mejorando así la calidad del suministro eléctrico.

El consorcio lo forman:

- Líder: Unión Fenosa Distribución S.A.
- Coordinación Técnica: Tecnalía.
- Industria: ORBIS Tecnología Eléctrica, NEORIS España, ZIV *Metering Solutions*.
- PYME: Telecontrol STM.
- Centro de Investigación: Tecnalía.
- Universidades: Universidad Carlos III de Madrid.



5.3.4 Proyecto BIDELEK



Bidelek Sareak es una iniciativa del Gobierno Vasco a través del Ente Vasco de la Energía y de Iberdrola Distribución Eléctrica para dotar de redes inteligentes a zonas urbanas y rurales con el objetivo de incrementar la eficiencia y seguridad del suministro eléctrico.

La iniciativa pretende desplegar una red inteligente con vocación de convertirse en un referente internacional y con capacidad para adecuarse a despliegues en cualquier región del mundo [65]. El proyecto supondría una inversión conjunta de aproximadamente 60 millones de euros durante los años 2012, 2013 y 2014.

Para el despliegue de la red se procedió de la siguiente manera:

Sustitución de contadores inteligentes a una población de 410.000 habitantes en las poblaciones de Bilbao y Portugalete. Configuración de todos los centros de transformación con servicios de telegestión, supervisión y automatización. Implantación de un nuevo concepto de subestación eléctrica modular y compacta en los municipios de Aulesti y Lekeitio-Gardata y de nuevas funciones de subestación y red inteligente en Ondarroa. Integración en la red de plantas de cogeneración en media tensión y plantas de generación en baja tensión. Facilitación del uso de herramientas de información por parte de usuario que permitan una mejor gestión de su consumo. Entre estas herramientas de información al usuario se encuentra el portal de BIDELEK SAREAK que le permite conocer cómo consume energía y qué posibilidades tiene de mejorar ese consumo.

5.3.5 Proyecto MONICA

Endesa ha iniciado en abril de 2016 el proyecto MONICA (Monitorización y control Avanzado) con el objetivo de desarrollar tecnologías que permitan la monitorización y el diagnóstico en tiempo real de las redes de distribución de media y baja tensión, persiguiendo los siguientes objetivos:

- Desarrollar una tecnología por la que se pueda determinar al instante y con precisión la situación real en que se encuentra la red de distribución, algo que solo era posible hasta ahora para las líneas de alta tensión.
- Detectar cualquier incidencia de los clientes inmediatamente, lo que redundará en una mejor calidad y seguridad del suministro.

El Proyecto MONICA desarrollará un sistema capaz de determinar con precisión la situación real en que se encuentra la red de distribución en cada momento (Estimador de Estado), con información real e inmediata sobre el impacto en la calidad y seguridad del suministro. Desarrollará y desplegará una red de sensores en media y baja tensión que tomarán medidas sobre todas las variables eléctricas. El nuevo Estimador de Estado de la red recibirá en tiempo real todos los datos captados tanto por los sensores desplegados como por los nuevos contadores inteligentes y realizará un diagnóstico de los distintos problemas existentes en la red para poder evitarlos o resolverlos, según corresponda.

El consorcio que ha desarrollado el proyecto está liderado por Endesa y cuenta con la participación de *Ayesa Advanced Technologies*, *Ingelectus Innovative Electrical Solutions*, Ormazábal Media Tensión y el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ETSII de la Universidad de Sevilla a través de la fundación AICIA. El presupuesto total es superior a los 3 millones de euros, de los que cerca de 1,3 millones serán financiados por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) a través del programa Feder-interconnecta [66].



El Proyecto MONICA se desarrollará en el área de la Smart City Málaga. Este entorno, cuenta en la actualidad con más de 15.000 clientes telegestionados, 40 km de líneas de media tensión comunicados con tecnología PLC, 70 centros de transformación MT/BT, instalaciones de generación de energía renovable y de almacenamiento distribuidos y alumbrado público eficiente [66].

5.3.6. Proyecto REDES 2025

El proyecto Redes 2025 se llevó a cabo en entre los años 2009 y 2012 constituyendo la primera iniciativa de I+D+i impulsada por la Plataforma Tecnológica Española de redes eléctricas FUTURED [67].



Consistía en diseñar y desarrollar progresivamente la red eléctrica del año 2025, una red capaz de satisfacer y garantizar el suministro de las nuevas necesidades eléctricas de todos los usuarios de una forma eficiente fiable y sostenible. Liderado por Gas Natural Fenosa, Red Eléctrica de España, Endesa, HC Energía e Iberdrola, correspondiendo la coordinación general a TecNALIA, el proyecto contó con un presupuesto de casi 40 millones de euros y ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciado con fondos FEDER.

Contaba con la participación de 25 empresas fabricantes de equipos e ingenierías, 6 Centros Tecnológicos e institutos de investigación, y 9 Universidades y Organismos públicos de investigación, que formaron un consorcio de 45 socios.

La ejecución de este proyecto estaba articulada en varios sub-proyectos:

- Aplicaciones de electrónica de potencia para el control de la red.
- Integración óptima de recursos distribuidos.
- Almacenamiento de energía eléctrica.
- Nuevas aplicaciones de red basadas en materiales superconductores.
- Gestión de la información en las redes inteligentes

Y perseguía obtener los siguientes beneficios:

- Otorgar más servicios y opciones de valor añadido para los usuarios y consumidores, como el acceso a precios en tiempo real.
- Mejorar la eficiencia y transparencia del sector eléctrico.
- Realizar una gestión de la red más efectiva por parte de los operadores de redes eléctricas, a partir de la respuesta activa de los recursos, proporcionada por los propios consumidores, aumentando los niveles de fiabilidad y de calidad de las redes.
- Ampliar el catálogo de productos y servicios de los generadores de energía con la utilización de otros recursos energéticos distribuidos.

5.3.7 Proyecto ENERGOS



El proyecto de investigación tecnológica EnergOS tenía como principal objetivo la investigación para el desarrollo de conocimientos y tecnologías que permitieran avanzar en la implantación de redes inteligentes de distribución de energía eléctrica.

Los principales objetivos se han centrado en:

- Estudios de adquisición y tratamiento de información en tiempo real.
- Desarrollo de una herramienta que permita predecir y simular el comportamiento de la red frente a diferentes escenarios de demanda y generación.

Ha estado liderado por Gas Natural Fenosa, a través de Unión Fenosa Distribución con una participación relevante de Indra, e integra 39 entidades (17 empresas y 22 organismos públicos y privados de Investigación). El presupuesto del proyecto ha sido de 24,3 M€, de los cuales el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) ha subvencionado la mitad, para la ejecución de actividades en el período comprendido entre los años 2009 y 2013 [68-69]. Muchos de los resultados del proyecto han asentado las bases del proyecto PRICE comentado anteriormente.

5.3.8 Proyecto I-SARE



El objetivo de este proyecto es crear una micro-red interoperable en el País Vasco, concretamente en la comunidad de Guipúzcoa, cuya finalidad es proporcionar una red de energía más eficiente y fiable, para mejorar la seguridad y calidad del suministro conforme a los requisitos de la era digital.

La implementación de esta micro-red inteligente servirá como banco de pruebas para desarrollar y validar el estado de los diferentes generadores distribuidos de fuentes renovables y de las tecnologías de almacenamiento.

Se han establecido los siguientes objetivos temporales [70]:

- A corto plazo: generación de nuevos productos.
- A medio plazo: generación de riqueza y empleo.
- A largo plazo: mejorar la eficiencia energética.

El proyecto comenzó en enero de 2014 y tiene prevista su finalización en diciembre de 2019. El consorcio está liderado por Jema y lo componen 6 promotores, 6 socios y cuenta con la colaboración del centro tecnológico CEIT.



Figura 24. Consorcio del proyecto I-Sare [70]

5.4. Proyectos de desarrollo en la Unión Europea

Al igual que ocurre en nuestro país, en la UE, con la colaboración de diferentes países, se llevan desarrollando numerosos proyectos relacionados con las redes inteligentes en los últimos años. En la actualidad otros siguen en desarrollo o se van a iniciar en un futuro próximo. Según un informe publicado por el ente europeo JRC (*Joint Research Centre*) en el que se analizan las prioridades energéticas, las *smart grids* están entre los principales intereses energéticos de Europa [71].

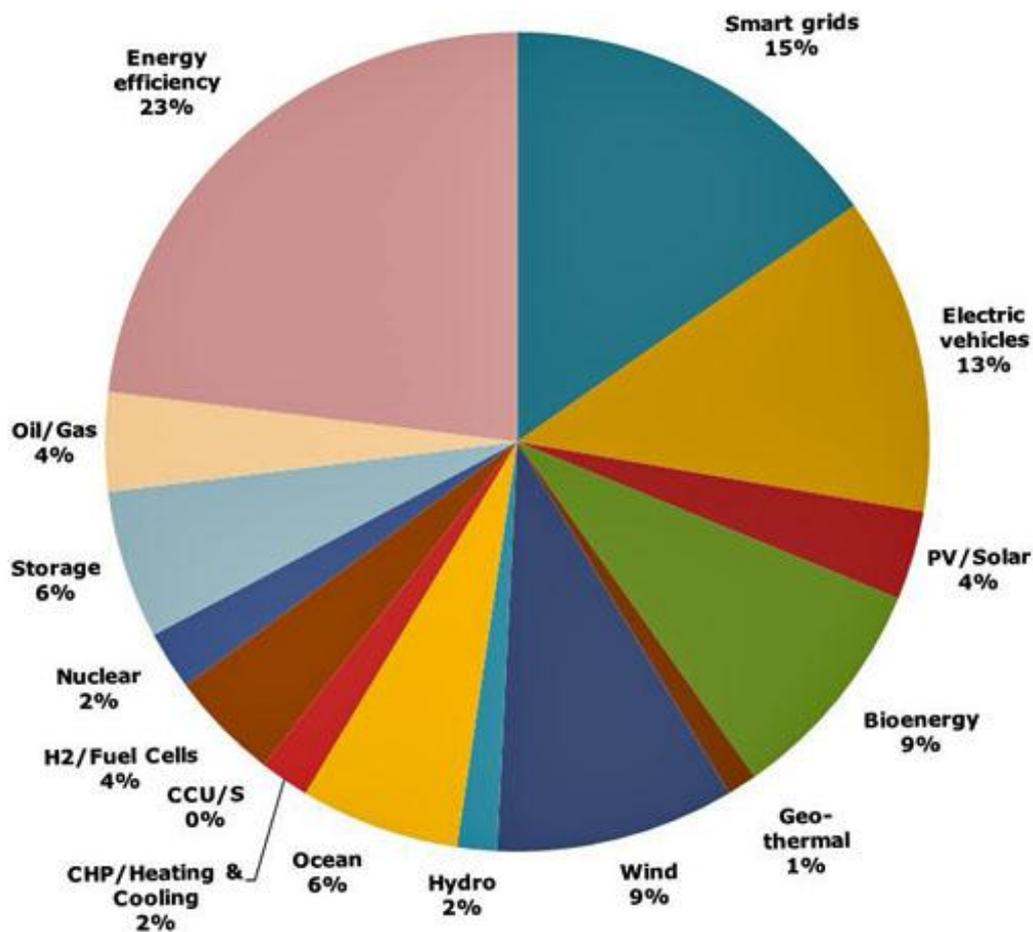


Figura 25. Mapeado ilustrativo de los intereses energéticos en Europa [71]

El mismo ente JRC hacía un análisis de los proyectos relacionados con las *smart grids* donde se muestran las iniciativas que se encuentran en fase de investigación y desarrollo (azul en la figura 26) y las que están en fase de demostración (rojo).

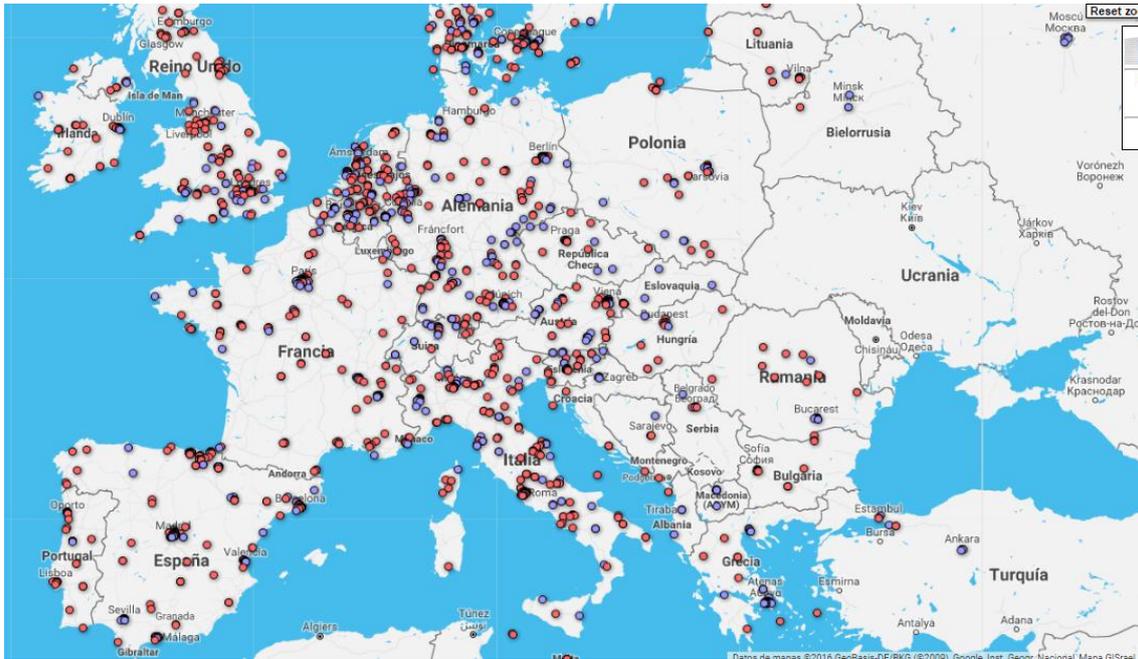


Figura 26. Mapa de los numerosos proyectos de *smart grids* en la UE [77]

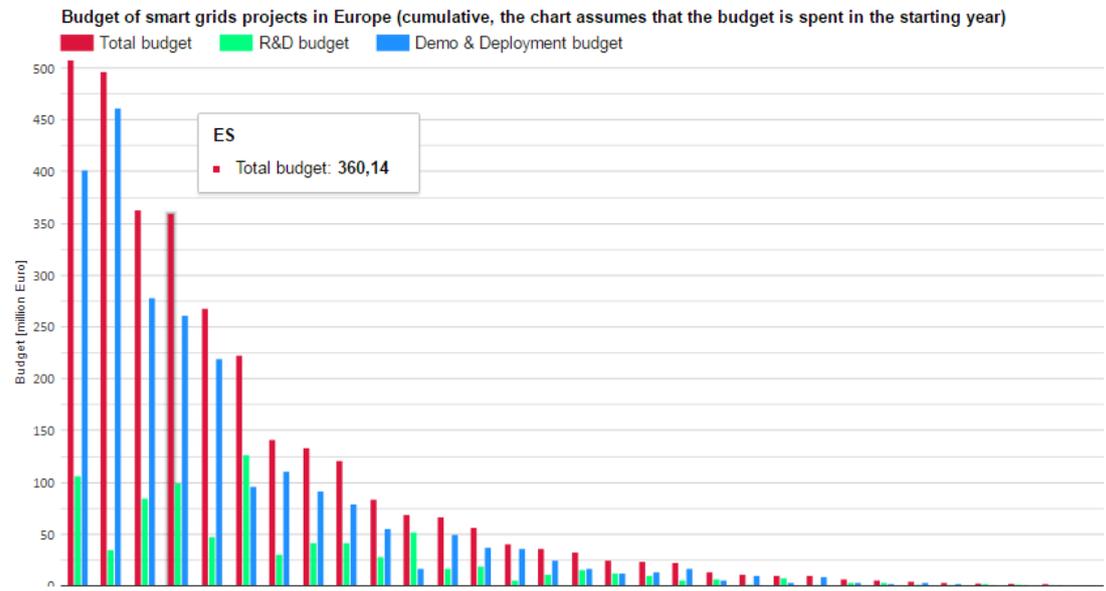


Figura 27. Inversión en proyectos de *smart grids* en la UE [78]

De todos los proyectos e iniciativas de I+D en los que participan varios países de la Unión Europea se destacarán algunos en los que participa España, con el fin de hacer un filtro para su posterior análisis.

5.4.1 Proyecto WISEGRID



La comisión europea ha adjudicado a ETRA+D el proyecto WISEGRID, que tiene como objetivos principales [72]:

- Desarrollar nuevos servicios de valor añadido para las *smart grids* en Europa.
- Aumentar el porcentaje de energías renovables en el mix eléctrico europeo.
- Acelerar el despliegue de la electro-movilidad en Europa.

Se estima que el proyecto tome comienzo en el 4º trimestre de 2016 y se prolongará durante 4 años. En él, participan 21 entidades de España, Bélgica Francia, Italia, Alemania, Grecia, Rumanía y Reino Unido; con un presupuesto de 17,6 millones de euros.

Los resultados se mostrarán a través de cuatro pilotos, uno de ellos en España.

5.4.2 Proyecto DISCERN



Distributed Intelligence for Cost-effective and Reliable Solutions. El Proyecto DISCERN [73], el cual se cerró a mediados de este año tras tres años de trabajo, es un proyecto que tenía como objetivo medir las mejoras que suponen la aplicación de las soluciones de *smart grids* a través de indicadores de eficiencia, para poder determinar el nivel óptimo de inteligencia necesario en una red de distribución.

Basó su análisis en 5 proyectos europeos de demostración desarrollados por distintas empresas distribuidoras de electricidad europeas, todos ellos relacionados con la automatización de la red MT/BT, y así podría analizar también la aplicabilidad de las soluciones implementadas en cada uno de los proyectos analizados.

Unión Fenosa Distribución, S.A. participó en el proyecto basándose en el proyecto PRICE ya comentado anteriormente; aportando supervisión de la red de MT, mediante medidas en MT, y reconfiguración óptima de la red con celdas tele-controladas. De igual manera se han considerado en el proyecto: análisis de calidad y continuidad de suministro en la BT de la subestación, con generación de señales y alarmas; instalación de concentradores físicos y concentradores virtuales para recolección de medidas.

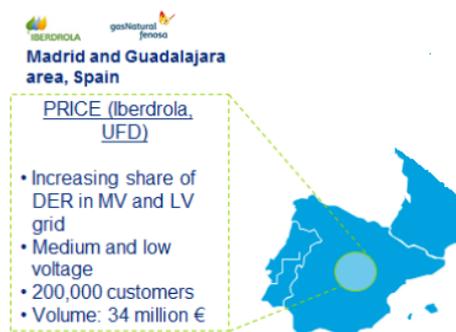


Figura 28. PRICE [74]

5.4.3 Proyecto SiNGULAR

La iniciativa SiNGULAR (*Smart and Sustainable Insular Electricity Grids Under Large-Scale Renewable Integration*) integra tecnología de sensores avanzada, métodos de control inteligente y comunicaciones bidireccionales en las redes eléctricas contemporáneas, lo que da la oportunidad de mejorar la integración de la generación distribuida, incluyendo fuentes de energía renovables, como sistemas eólicos y fotovoltaicos, con unidades de generación centralizada [75].

El proyecto tuvo su puesta en marcha en el año 2012, y durante 3 años han sido investigados los efectos de la integración de fuentes de energía renovables a gran escala, de sistemas de almacenamiento energético y la gestión de la demanda en la planificación y operación de redes eléctricas insulares no interconectadas. De entre los cinco emplazamientos elegidos para el proyecto está La Graciosa, en las islas canarias.

Algunos de los retos de esta iniciativa fueron:

- Obtener procedimientos y códigos para el futuro de las *smart grids*, proporcionando recomendaciones y soluciones para superar las barreras regulatorias, técnicas y económicas de la integración masiva de energías renovables, manteniendo la seguridad y calidad del suministro en las islas.
- Involucrar al consumidor con su participación activa, suministrándole más y mejor información, incentivos (precios dinámicos) y herramientas TIC adecuadas.

El Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) participó, junto a otros 16 socios en un consorcio formado por 5 universidades y 11 empresas del sector energético pertenecientes a 7 países europeos, contó con un presupuesto de más de 5 millones de euros y estuvo coordinado por la Universidad de Beira Interior (Portugal), que lideró el consorcio.

El proyecto SiNGULAR finaliza el 30 de noviembre de 2015.



5.4.4 Proyecto DC4CITIES

Un proyecto que podría traducirse como “centros de datos ambientales sostenibles para las *smart cities*”, el cual finalizó en marzo de 2016. En él participaba un consorcio formado por empresas, universidades y administraciones públicas de Alemania, Bélgica, Francia, Italia y España.

En el caso de España participaron el *Consorti de Serveis Universitaris de Catalunya* (CSUC) y el Instituto Municipal de Informática (IMI), perteneciente al Ayuntamiento de Barcelona y Gas Natural Fenosa, que ejecutaron los proyectos de demostración situados en Barcelona.

Este proyecto se centraba en conseguir la optimización energética de Centros de Datos (CDs) y maximizar su consumo de energías renovables, implementando mecanismos de gestión de demanda en función de la disponibilidad de energía de origen renovable u otras restricciones.

Este objetivo, se alinea con los marcados por la Unión Europea respecto a la energía y cambio climático, conocidas como objetivos “20-20-20” comentados anteriormente. Además, se buscaba disminuir del consumo eléctrico total a partir de una gestión de la energía más eficiente. Un mayor uso de renovables y una disminución del consumo eléctrico acarrearían a su vez una disminución de emisiones de CO₂.

La participación española obtuvo los siguientes resultados [76]:

- Los resultados de las pruebas realizadas en los centros de datos del Consorti de Serveis Universitaris de Catalunya (CSUC) y del Instituto Municipal de Informática (IMI) perteneciente al Ayuntamiento de Barcelona, han resultado positivos. Se ha conseguido una buena adaptación del consumo a la disponibilidad de energías renovables locales y de la red, y mejoras significativas en eficiencia energética desconectando aquellos equipos que no son necesarios en cada momento.
- En el caso del centro del CSUC se ha alcanzado un incremento del 64% en el uso de renovables y se ha reducido el consumo eléctrico en un 70%, obteniendo ahorros económicos y de CO₂ aún mayores.
- En el caso del DC del IMI, se han obtenido mejoras similares (>50%), acordes con el potencial existente.

6. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha estudiado el concepto de *smart grid*, habiendo analizado para ello, la estructura de las redes de distribución y transporte convencionales, las motivaciones por las cuales surge la idea de la red inteligente, las principales características y elementos más importantes que éstas engloban, así como sus beneficios y barreras y se ha estudiado como se encuentra su progreso de integración a día de hoy. Obteniendo las siguientes conclusiones:

La infraestructura actual de la red eléctrica necesita una evolución y una modernización para mejorar su funcionalidad y seguridad con el fin de proporcionar una energía de forma eficaz, fiable y sostenible.

Esta necesidad de modernización surge por el incremento de la demanda energética debido a las nuevas necesidades de la sociedad, el crecimiento global de la población y la masiva industrialización. Por otro lado, los compromisos que se han establecido para el año 2020 en la Unión Europea para preservar el medio ambiente se centran en una mayor integración de energías limpias y renovables, así como de fuentes de generación distribuida, que suponen menor impacto ecológico, ambiental y paisajístico que las grandes centrales eléctricas tradicionales. Otro de los motores que ha impulsado esta revolución es la alta dependencia que se tiene de los combustibles importados: la integración de fuentes de recursos renovables ayudará y significará una garantía de independencia energética.

Estos hechos han llevado a buscar tecnologías innovadoras que ayuden a evolucionar la red eléctrica convencional a un sistema inteligente que aporte grandes beneficios a los consumidores y a las empresas de electricidad. Para ello, se han formado distintas plataformas de investigación tecnológica y se han creado actividades estratégicas en algunos países para investigar y promover el despliegue de las *smart grids*.

Gracias a la integración de las *smart grids* las empresas del sector eléctrico podrán reducir sus pérdidas controlando y monitorizando los dispositivos y elementos implicados en la generación y transporte de energía. Y, gracias a los datos aportados por los medidores inteligente instalados en los puestos de consumo se mejorará la eficiencia energética. De esta manera las compañías podrán ofrecer mejores servicios a sus clientes, como la autogestión de incidencias evaluando en tiempo real el suministro.

Con estas redes inteligentes los consumidores o usuarios finales pasarán de ser pasivos a actores activos del sistema eléctrico gracias a la introducción de nuevos servicios que permiten al consumidor participar activamente, con el fin de fomentar un uso más responsable de la energía y modificar conductas de comportamiento para reducir el consumo.

En cierto modo, los usuarios se verán obligados a entender el nuevo entramado eléctrico, y aunque a priori pueda parecer algo negativo, posteriormente afectará de un modo positivo, reduciendo sus tarifas eléctricas y siendo participes en la generación mediante sistemas de generación particulares, donde la energía sobrante pueda ser vendida o almacenada para su posterior utilización en periodos donde el precio de la energía sea mayor.

Se han estudiado las *smart grids* como un conjunto formado por micro-redes, que combinadas con las diferentes tecnologías como sensores, contadores inteligentes, energías renovables, sistemas de almacenamiento de energía y el vehículo eléctrico forman los cimientos sobre los que se sustenta la nueva red inteligente. Pero para que todo cobre sentido, todas estas tecnologías han de estar en comunicación constante entre ellas y han de ser capaces de comunicarse con los usuarios y las centrales de generación. Es aquí donde las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) van a ser protagonistas pues serán las encargadas de gestionar la información, la infraestructura de monitorización, la interoperabilidad, gestionar los datos de los medidores de los consumidores en tiempo real y permitir la comunicación entre distintos puntos de la red.

Cuando se analizaron las normativas en nuestro país se pudo ver que, aunque existan políticas procedentes de la UE como la sustitución total de los contadores tradicionales por contadores inteligentes en 2018, que España como país miembro está obligado a cumplir, no existen normativas que regulen de alguna manera la implantación progresiva de los distintos elementos de las *smart grids*. Se hace necesario que las instituciones públicas creen nuevas políticas energéticas mediante normativas que aseguren una serie de incentivos para que el cambio se produzca de forma completa.

Como se ha podido ver las *smart grids* son uno de los principales intereses energéticos europeos. En los últimos años y en la actualidad se han creado multitud de consorcios que están desarrollando muchos y muy diversos proyectos de investigación tecnológica y de implantación en pequeños escenarios piloto con la intención de obtener resultados concluyentes para una integración a mayor escala, que a día de hoy resulta muy difícil económicamente.

Tras la realización de este proyecto, se ha entendido el concepto que engloba a la *smart grid*, se ha visto cómo han evolucionado durante los últimos años, en los que han pasado de ser una idea o concepto a convertirse en una apuesta de futuro cada vez más real a la que aún le quedan aspectos en los que profundizar para que el conjunto sea “un todo”, en el que cada elemento sea una pieza que haga funcionar a la siguiente y se consiga un funcionamiento óptimo.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. Bibliografía utilizada

- [1] https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Alva_Edison
- [2] Instituto tecnológico de canarias, (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Recuperado de <http://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
- [3] <http://www.energiaysociedad.es/ficha/1-1-aspectos-basicos-de-la-electricidad>
- [4] <http://www.ree.es>
- [5] <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/infografias-y-mapas/como-funciona-el-sistema-electrico>
- [6] IDAE, (2011). Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e2_tecnologia_y_costes_7d24f737.pdf
- [7] IRENA, (2015). Renewable Power Generation Costs in 2014. Recuperado de http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf
- [8] <http://elperiodicodelaenergia.com/los-costes-de-generacion-de-las-renovables-son-iguales-o-mas-baratos-que-los-de-combustibles-fosiles/>
- [9] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015SC0239&from=EN>
- [10] <http://impulsobelenus.blogspot.com.es/2014/11/situacion-del-sector-energetico-en.html>
- [11] <http://www.elmundo.es/ciencia/2016/02/18/56c61418ca47410f338b457c.html>
- [12] Observatorio de la sostenibilidad, (2016). Cambio climático evidencias, emisiones y políticas. Recuperado de http://www.observatoriosostenibilidad.com/RESUMEN%20EJECUTIVO%20CAMBIO_CLIMATICO_v17_redux.pdf
- [13] <http://weather.mailasail.com/Franks-Weather/Climate-Data>
- [14] European Technology Platform, (2010). SmartGrids. Recuperado de http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf
- [15] <https://constructorelectrico.com/redes-inteligentes-smart-grid/>
- [16] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1422&tip=9>

- [17] Díaz Andrade, C.A. y Hernández, J.C. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica. *Sistemas & telemática*, 9(18), 53-81. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534385004>
- [18] http://www.gridwise.org/smartgrid_choice.asp
- [19] http://www.gridwise.org/smartgrid_security.asp
- [20] http://www.gridwise.org/smartgrid_energyeffi.asp
- [21] <http://forococheselectricos.com/2016/08/el-coche-electrico-y-las-smart-grids-i-v2g-v2b-y-v2h.html>
- [22] <http://www.sel.cs.sunykorea.ac.kr/projects.html>
- [23] Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones, (2011). Smart Grids y la evolución de la red eléctrica. Recuperado de http://www.minetur.gob.es/industria/observatorios/SectorElectronica/Actividades/2010/Federaci%C3%B3n%20de%20Entidades%20de%20Innovaci%C3%B3n%20y%20Tecnolog%C3%ADa/SMART_GRIDS_Y_EVOLUCION_DE_LA_RED_ELECTRICA.pdf
- [24] Cárcel Carrasco, F.J. y Teruel Avinent, P. (2015). Edificación y smart grids: factores a tener en cuenta. *3c Tecnología*, 14 (2), 54-66. Recuperado de <http://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2015/06/Edificaci%C3%B3n-y-Smart-Grids.pdf>
- [25] <https://www.etsisi.upm.es/sites/default/files/estudios/smart%20grids.pdf>
- [26] <https://smartgridawareness.org/privacy-and-data-security/how-smart-meters-invade-individual-privacy/>
- [27] Markovic D.S. Branovic I. y Popovic R. (2014). Smart Grid and nanotechnologies: a solution for clean and sustainable energy. *Browse Journals*, 2015(3), 1-13. Recuperado de <https://www.dovepress.com/smart-grid-and-nanotechnologies-a-solution-for-clean-and-sustainable-e-peer-reviewed-fulltext-article-EECT>
- [28] https://es.wikipedia.org/wiki/Lectura_de_medic%C3%B3n_autom%C3%A1tica
- [29] Farhangi, H. (2010). The Path of the Smart Grid. *IEEE power & energy magazine*, 18-28. Recuperado de <http://sci-hub.cc/10.1109/MPE.2009.934876>
- [30] Quang-dung Ho, Yue Gao, Y Tho Le-Ngoc, McGill university, (2013). Challenges and research opportunities in wireless communication networks for smart grid. *IEEE Wireless Communications*. Recuperado de <http://sci-hub.cc/10.1109/MWC.2013.6549287>
- [31] Departamento de Difusión del instituto de Investigaciones Eléctricas, (2010). Red eléctrica inteligente (Smart Grid). *Boletín IIE*, 34(3). Recuperado de <http://www.ineel.mx/boletin032010/biie-todo.pdf>
- [32] <http://www.gridautomation.ziv.es/data/smartgrids/FAMI0911A.pdf>

- [33] CITCEA_UPC (2013). Smart Grids: Tecnologías prioritarias. *Fundación para la sostenibilidad energética y ambiental, FUNSEAM*. Recuperado de <http://www.funseam.com/phocadownload/smart%20grids.%20tecnologas%20prioritarias.pdf>
- [34] <http://www.tatung.com/Site/Detail/354>
- [35] Tuballa, M., y Lochinvar, M. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 710-725. Recuperado de <http://dx.doi.org.sci-hub.cc/10.1016/j.rser.2016.01.011>
- [36] Peralta Sevilla, G. y Amaya Fernández, F. (2012). Evolución de las redes eléctricas hacia *smart grid* en países de la región andina. *Educación en ingeniería*, 8(15), 48-61. Recuperado de <http://www.educacioneningeneria.org/index.php/edi/article/viewFile/285/165>
- [37] <http://slideplayer.com/slide/3921605/>
- [38] United States Department of Energy Washington, (2014). 2014 Smart Grid System Report. Recuperado de <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/SmartGrid-SystemReport2014.pdf>
- [39] <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2009-81013>
- [40] http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/index_es.htm
- [41] Recuperado de [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/documents/com/com_com\(2015\)0080/com_com\(2015\)0080_es.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/documents/com/com_com(2015)0080/com_com(2015)0080_es.pdf)
- [42] <http://www.tendenciasenenergia.es/vehiculo-electrico-2/3918>
- [43] <http://forococheelectricos.com/2016/08/el-coche-electrico-y-las-smart-grids-ii-limitaciones.html>
- [44] <https://pluginamerica.org/ev-battery-amortization-costs-and-vehicle-grid/>
- [45] Recuperado de http://www.iuma.ulpgc.es/~roberto/asignaturas/EI/transparencias/EI_Tema_2.Intro_E_P.pdf
- [46] <http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/flexible-ac-transmission-the-facts-machine>
- [47] De Palacio Rodríguez, C. (2014). Cómo hacemos avanzar a la red eléctrica hacia una red inteligente mediante el uso de electrónica de potencia. *Energética XXI*, 144. 60-61. Recuperado de <http://www.energetica21.com/revistas-digitales/octubre-2014>
- [48] Olabarriera Rubio, J.L. (2008). Aplicaciones de los dispositivos FACTS en generadores eólicos. *Térmica industrial*, 276. 36-41. Recuperado de <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/36/38/a38.pdf>
- [49] <http://dmbengineering.com.au/projects/blackwater-static-var-compensators-svcs-%E2%80%93-qld-siemens-powerlink/>

- [50] Inga Ortega, E. M. (2012). Redes de comunicación en smart grid. *Ingenius revista de ciencia y tecnología* 7. 36-55. Recuperado de <http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/7.2012.05/254>
- [51] Recuperado de <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/385/Elisa%20Iba%C3%B1es%20del%20Agua.pdf>
- [52] <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-16478>
- [53] <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-22458>
- [54] <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-supera-los-ocho-millones-de-contadores-inteligentes-instalados-en-espana-3512764720160826>
- [55] <http://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/7714180/07/16/Endesa-alcanza-los-ocho-millones-de-contadores-inteligentes-instalados-en-espana.html>
- [56] Recuperado de http://economia.elpais.com/economia/2015/06/23/actualidad/1435058440_635673.html
- [57] <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy>
- [58] Recuperado de <https://www.iberdroladistribucionelctrica.com/webibd/corporativa/iberdrola?IDPAG=ESSOCDISRED>
- [59] http://www.elperiodicomediterraneo.com/noticias/castellon/iberdrola-completa-castellon-primera-red-contadores-digitales_1012031.html
- [60] <http://www.eleconomista.es/economia/noticias/7786619/08/16/iberdrola-supera-los-8-millones-de-contadores-inteligentes-instalados-en-Espana.html>
- [61] <http://www.indracompany.com/es/proyecto-price-proyecto-conjunto-redes-inteligentes-corredor-henares>
- [62] <http://www.futured.es/2012/05/22/price-proyecto-de-redes-inteligentes-en-el-corredor-de-henares/>
- [63] Recuperado de http://www.gasnaturalfenosa.com/servlet/ficheros/1297148812775/Galardon_proyecto_Price.pdf
- [64] Recuperado de <http://www.unionfenosadistribucion.com/es/redes+inteligentes/investigacion+y+desarrollo/nacionales/1297262412251/osiris.html>
- [65] <http://bidelek.com/objetivo/>
- [66] <http://www.endesa.com/es/saladeprensa/noticias/El-proyecto-MONICA-de-Endesa-permitira-controlar-lineas-de-baja-y-media-tension>
- [67] http://www.ingeteam.com/portals/0/pdfs/redes_2025.pdf

- [68] Recuperado de http://innovationenergy.org/energoss/index.php?option=com_content&view=article&id=42:i-jornadas-clausura-energoss&catid=8:noticias-generales&Itemid=7
- [69] Recuperado de http://innovationenergy.org/energoss/index.php?option=com_content&view=article&id=3%3Ael-proyecto-energoss&catid=7%3Aprincipal&showall=1
- [70] <http://www.i-sare.net/pages/promotores.html>
- [71] <https://www.smartgridsinfo.es/articulos/las-smart-grids-entre-los-principales-intereses-energeticos-europeos>
- [72] <http://www.grupoetra.com/noticias/la-comision-europea-ha-adjudicado-a-grupoetra-el-proyecto-wisegrid-un-proyecto-con-21-socios-de-8-p.aspx>
- [73] Recuperado de <http://www.unionfenosadistribucion.com/es/redes+inteligentes/investigacion+y+desarrollo/internacionales/1297157608486/discern.html>
- [74] <http://www.discern.eu/project/demonstration-projects.html>
- [75] <https://www.smartgridsinfo.es/articulos/singular-integracion-de-renovables-en-smart-grids-insulares>
- [76] <http://www.dc4cities.eu/en/>
- [77] Recuperado de http://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/u24/2014/project_maps_28_april_2014.html
- [78] <http://ses.jrc.ec.europa.eu/european-smart-grid-projects-budget>

7.2. Índice de figuras

- Figura 1 Pág. 8. Esquema de la red eléctrica convencional en España.
- Figura 2 Pág. 10. Subestación de transformación (red eléctrica española).
- Figura 3 Pág. 12. Escenarios del precio del crudo hasta 2030.
- Figura 4 Pág. 13. Escenarios del precio de emisiones CO₂ hasta 2030.
- Figura 5 Pág. 14. Evolución de la dependencia energética en España.
- Figura 6 Pág. 15. Evolución de emisiones de CO₂ en España.
- Figura 7 Pág. 16. Anomalías de la temperatura en el último siglo.
- Figura 8 Pág. 17. Esquema de una *smart grid*.
- Figura 9 Pág. 20. Sistemas de energía tradicional frente distribución.
- Figura 10 Pág. 23. Esquema de implantación del vehículo eléctrico en *smart grids*.

Figura 11	Pág. 30. Perfil de consumo eléctrico de un hogar.
Figura 12	Pág. 31. Esquema conceptual de agentes involucrados en las <i>smart grids</i> .
Figura 13	Pág. 33. Evolución de sistemas de medición <i>smart grid</i> .
Figura 14	Pág. 34. Arquitectura general de una <i>smart grid</i> .
Figura 15	Pág. 35. Arquitectura de comunicaciones de una <i>smart grid</i> .
Figura 16	Pág. 39. Diferencias entre medidores.
Figura 17	Pág. 40. Diferencias entre sensores PMU y sensores SCADA.
Figura 18	Pág. 41. PMUs instalados en 2007 en EE.UU.
Figura 19	Pág. 41. PMUs instalados en 2013 en EE.UU.
Figura 20	Pág. 42. Diferentes tecnologías de almacenamiento de energía.
Figura 21	Pág. 43. Clasificación de baterías de almacenamiento electroquímico.
Figura 22	Pág. 50. Construcción de una instalación 132 kV SVC.
Figura 23	Pág. 56. Un técnico instala los nuevos contadores inteligentes.
Figura 24	Pág. 66. Consorcio del proyecto I-Sare.
Figura 25	Pág. 67. Mapeado ilustrativo de los intereses energéticos en Europa.
Figura 26	Pág. 68. Mapa de los numerosos proyectos de <i>smart grids</i> en la UE.
Figura 27	Pág. 68. Inversión en proyectos de <i>smart grids</i> en la UE.
Figura 28	Pág. 69. PRICE.

7.3 Índice de tablas

Tabla 1	Pág.24. Diferentes características entre las redes convencionales y la <i>smart grid</i> .
Tabla 2	Pág.45. Ventajas y desventajas de tecnologías de almacenamiento de energía.
Tabla 3	Pág. 52. Requerimientos de potenciales redes de comunicación para <i>smart grids</i> .
Tabla 4	Pág. 53. Diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica.