

Escuela Técnica Superior de Ingenieros

INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Smart Grids: contexto actual,
comunicaciones y proyectos destacados**

**(Smart Grids: current context,
communications and relevant projects)**

**Para acceder al Título de
Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación**

Diego García de Fuentes Pampín

Septiembre - 2019

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Diego García de Fuentes Pampín

Director del TFG: Jesús Mirapeix Serrano

Título: “Smart Grids: contexto actual, comunicaciones y proyectos destacados”

Title: “Smart Grids: current context, communications and relevant projects”

Presentado a examen el día: 18 de septiembre de 2019

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, Antonio

Secretario (Apellidos, Nombre): Madruga Saavedra, Francisco Javier

Vocal (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar las gracias a mis padres, José Javier y Teresa, que siempre han estado ahí, peleando incluso más que yo en determinadas ocasiones, por mi carrera, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

A mis abuelos, que desde pequeño han estado siempre ahí para lo que hiciese falta. En especial a mi abuelo Manuel, que ya no está, pero sé que le hubiese encantado ver como conseguía llegar hasta aquí.

A mis hermanos, José Javier, Teresa y Eugenia, parte fundamental de mi vida, con los que he crecido hasta convertirme en quien soy hoy.

A mi novia, María, que ha compartido conmigo más horas que nadie de biblioteca y sobre todo que ha estado ahí en los peores momentos de la carrera.

A mis amigos y compañeros, en especial a Simon, por todos esos apuntes y explicaciones de asignaturas intermítales.

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 1.1. | Contexto | 5 |
| 1.2. | Objetivos | 5 |
| 1.3. | Estructura | 6 |
| 2 | ¿Qué es una <i>Smart Grid</i> ?..... | 7 |
| 2.1. | Historia de la red eléctrica | 7 |
| 2.2. | Concepto de <i>Smart Grid</i> | 9 |
| 3 | Energía en las <i>Smart Grids</i> | 11 |
| 3.1. | Producción de energía eléctrica | 11 |
| 3.1.1. | Producción clásica de energía | 11 |
| 3.1.2. | Producción actual de energía..... | 16 |
| 3.1.2.1. | Hidroeléctricas..... | 16 |
| 3.1.2.2. | Térmicas | 18 |
| 3.1.2.3. | Nucleares..... | 20 |
| 3.1.2.4. | Eólicas | 22 |
| 3.1.2.5. | Solares..... | 24 |
| 3.1.2.6. | Biomasa..... | 29 |
| 3.1.2.7. | Mareomotriz..... | 30 |
| 3.2. | Almacenamiento de energía | 32 |
| 3.2.1. | Almacenamiento mecánico..... | 33 |
| 3.2.1.1. | Aire comprimido | 33 |
| 3.2.1.2. | Hidráulica de bombeo..... | 34 |
| 3.2.1.3. | Volantes de inercia | 35 |
| 3.2.2. | Almacenamiento térmico..... | 36 |
| 3.2.3. | Almacenamiento electromagnético | 37 |
| 3.2.3.1. | Supercondensadores | 37 |
| 3.2.3.2. | Imanes superconductores (SMES)..... | 37 |
| 3.2.4. | Almacenamiento electroquímico | 38 |
| 3.2.4.1. | Baterías | 38 |
| 3.2.4.2. | Hidrógeno..... | 39 |
| 4 | Estructura de red y comunicaciones | 43 |
| 4.1. | Estructura de la red..... | 43 |
| 4.1.1. | Estructura física de transporte de energía..... | 44 |
| 4.1.2. | Generación y almacenamiento | 44 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 4.1.3. | Monitorización y automatización de la red eléctrica | 45 |
| 4.1.3.1. | Monitorización de la red eléctrica..... | 45 |
| 4.1.3.2. | Automatización de la red eléctrica..... | 46 |
| 4.1.4. | SCADA..... | 47 |
| 4.2. | Comunicaciones..... | 48 |
| 4.2.1. | Estructura de las redes de comunicación | 48 |
| 4.2.1.1. | Seguridad | 50 |
| 4.2.2. | Tecnologías de comunicación y medios de transmisión | 52 |
| 4.2.2.1. | Medios de transmisión guiados | 52 |
| 4.2.2.2. | Medios de transmisión inalámbricos..... | 55 |
| 4.2.3. | Protocolos de comunicaciones..... | 61 |
| 4.2.3.1. | IEC101 | 61 |
| 4.2.3.2. | IEC104 | 64 |
| 4.2.3.3. | DNP3 | 65 |
| 4.2.3.4. | ModBbus | 66 |
| 4.2.3.5. | DMLS/COSEM | 67 |
| 4.2.3.6. | PRIME..... | 68 |
| 4.2.3.7. | M&M (Meters and More) | 69 |
| 4.2.3.8. | G3..... | 70 |
| 4.2.3.9. | OSGP | 72 |
| 4.2.3.10. | Ethernet junto con TCP/IP | 73 |
| 4.2.3.11. | ZigBee | 74 |
| 5 | PROYECTOS | 76 |
| 5.1. | Proyectos relacionados con la energía | 76 |
| 5.1.1. | ITER | 76 |
| 5.1.2. | Coche eléctrico | 77 |
| 5.2. | Proyectos relacionados con las comunicaciones | 77 |
| 5.2.1. | 5G..... | 77 |
| 5.3. | Proyectos relacionados con las Smart Grids | 78 |
| 5.3.1. | WiseGRID..... | 78 |
| 5.3.2. | MIGRATE | 78 |
| 5.3.3. | STAR | 79 |
| 5.3.4. | Dream-Go..... | 80 |
| 6 | Conclusiones | 82 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA..... | 83 |

| | |
|---|----|
| 7.1. Bibliografía utilizada..... | 83 |
| 7.2. Índice de figuras..... | 87 |
| ANEXOS | 90 |
| Anexo 1: Infografía explicativa del concepto de Smart Grid..... | 90 |
| Anexo 2: Iconografía del funcionamiento de un aerogenerador. | 91 |
| Anexo 3: Esquema de funcionamiento del ITER..... | 92 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

La energía eléctrica se ha convertido en un recurso básico en la sociedad actual, en la cual es usada a diario para fines muy diversos. Esto se debe a que la energía eléctrica se puede transformar con gran facilidad en muchas otras formas de energía, tales como la energía lumínica, energía mecánica y la energía térmica, de donde surgen gran cantidad de aplicaciones.

La gran diversidad de ámbitos en los que se encuentra la energía eléctrica como pieza fundamental, sumado a factores como el continuo aumento de la población mundial y las nuevas tecnologías, tanto de generación como de almacenamiento de energía eléctrica, dan como resultado la necesidad de realizar una actualización de la red eléctrica. A esta necesidad responde la aparición de las *Smart Grid*.

Si se tiene en cuenta que la población mundial no ha dejado nunca de crecer en las últimas décadas y que las previsiones que se tienen no contemplan que deje de hacerlo en un futuro cercano, se llega fácilmente a la conclusión de que cada vez la energía eléctrica es y será más demanda.

En 1950 la población total de la tierra se encontraba entorno a los 2600 millones, en 2015 alcanzó la cifra de 7300 millones, en 2050 se estima que la población sea de 8500 millones y en 2100 de 11200 millones [1]. Estos datos cobran importancia cuando se tiene en cuenta que la primera red eléctrica data de 1886, cuando la población mundial no alcanzaba 1700 millones [2].

Sumado al aumento de población y aumento de demanda eléctrica per cápita, aparece un problema más profundo de raíz, el cambio climático. Uno de los problemas del modelo eléctrico original de generación, es principalmente que no es sostenible en el tiempo, ya que se basa en tecnologías altamente contaminantes y no renovables.

Por tanto, la aparición de nuevas tecnologías, el aumento de demanda y una necesidad de un modelo más sostenible, capaz de satisfacer las necesidades de los usuarios de manera más eficaz y eficiente, explica el surgimiento de las *Smart Grids*.

1.2. Objetivos

Este proyecto pretende dar una visión general de qué son las *Smart Grids* y el porqué de estas, que tecnologías las componen, tanto a nivel energético, como a nivel de telecomunicaciones, y cuáles son los proyectos más relevantes en cuanto a estos puntos.

1.3. Estructura

El proyecto se divide en 6 capítulos teniendo en cuenta la introducción. A continuación, se presenta cómo se distribuyen los contenidos en capítulos sucesivos.

- El segundo capítulo explica más en profundidad que es una *Smart Grid*, porqué es necesaria esta y se da una breve reseña histórica, donde se podrá entender cómo fue concebida la red eléctrica original y cómo ha ido variando hasta la actualidad.
- El tercer capítulo explica las tecnologías existentes de generación de energía, remarcando en este punto las energías renovables y de almacenamiento de energía como pieza fundamental de las *Smart Grid*.
- El cuarto capítulo explica cómo una *Smart Grid* responde al problema de la gestión de la energía y cómo son las comunicaciones dentro de la misma. También, se explica cómo se monitoriza y automatiza la red por medio de diversos dispositivos.
- El quinto capítulo se centra en presentar algunos ejemplos de los proyectos actuales en lo referente a energía, comunicaciones y *Smart Grids*.
- El sexto capítulo recoge las conclusiones obtenidas de los capítulos precedentes.

2 ¿Qué es una *Smart Grid*?

2.1. Historia de la red eléctrica

Antes de poder comprender la transformación a la que la red eléctrica está siendo sometida, se ha de comprender como fue concebida la misma. De hecho, la red eléctrica original se encontraba en su particular guerra debido a las discrepancias existentes entorno a qué tipo de corriente se debía utilizar, finalmente, y como es conocido por todos, la corriente alterna fue la vencedora de esta disputa y la corriente utilizada hasta hoy en día para la distribución de la energía eléctrica.

Esto se debió a que la corriente continua presentaba grandes problemas para elevar el voltaje, y por lo tanto, para transportar la misma a grandes distancias. Por el contrario, la corriente alterna era fácilmente escalable a altos voltajes, facilitando así su suministro a grandes distancias de los lugares de producción de esta.

Como se ha mencionado con anterioridad, la primera red eléctrica, la cual ya utilizaba corriente alterna, data de 1886. Esta fue diseñada y construida con la idea de que fuese una red unidireccional, simplemente utilizada para la distribución de energía.

La red prácticamente no sufrió grandes cambios a nivel de diseño en sus primeras décadas de vida. El cambio más importante al que se sometió la red fue la interconexión entre las distintas redes, debido a que éstas aparecieron como pequeñas redes que alimentaban fábricas, pueblos o ciudades, pero que eran completamente ajenas unas de las otras. Por motivos de económicos y de fiabilidad, estas pequeñas redes fueron interconectándose, hasta que, en la década de 1960, los países desarrollados ya contaban con redes eléctricas maduras, altamente interconectadas y con grandes cantidades de puntos de generación. En este punto de la historia de la red eléctrica, la generación de la energía era llevada a cabo principalmente por medio de centrales de carbón, gas y fuel, aunque poco a poco se iban sumando a éstas las centrales hidroeléctricas y las nucleares.

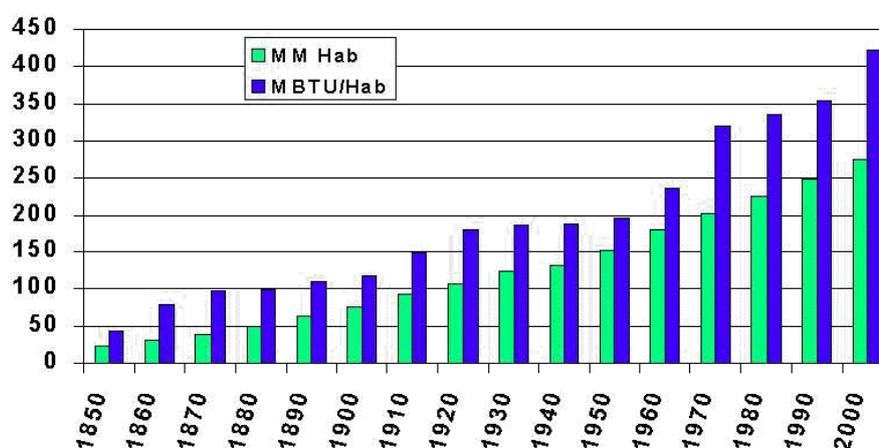


Figura 1. Histórico de población y consumo eléctrico en Estados Unidos.

Fuente: <http://vicentelopez0.tripod.com/>

Uno de los principales problemas a los que tuvo que hacer frente la red en la década de 1960 fue a la medición de consumo por cliente. Esto era necesario para poder realizar una facturación correcta. El principal problema era tecnológico, ya que no existían aparatos capaces de realizar correctamente estas mediciones de manera automática, de tal manera que era un operario el que debía tomar los registros manualmente.

Entre las décadas de 1970 y 1990, el gran aumento de demanda de la electricidad supuso que se construyera una gran cantidad nuevas centrales. Con todo esto, cada vez existía una red más compleja y numerosa. También empiezan a surgir en esta época los primeros dispositivos de monitorización y control de la red, trayendo consigo, los primero sistemas de telecomunicaciones en redes eléctricas. En esta época el principal problema de las redes se centraba en los cortes de luz debido a picos de demanda inasumibles por parte de las centrales.

Para poder suavizar la curva de consumo y evitar así los grandes picos de demanda, llegando al final del siglo 20, se optó por el establecimiento de diferentes tarifas, siendo estas más altas en horas donde los picos de demanda eran mayores.

Entrando en el siglo 21, la creciente complejidad de la red obliga a adoptar nuevas soluciones, y es aquí, donde, conjuntamente con la digitalización de la sociedad, la aparición de nuevas tecnologías de producción de energía y los problemas medioambientales, aparecerán las redes inteligentes o *Smart Grids* [2-4].

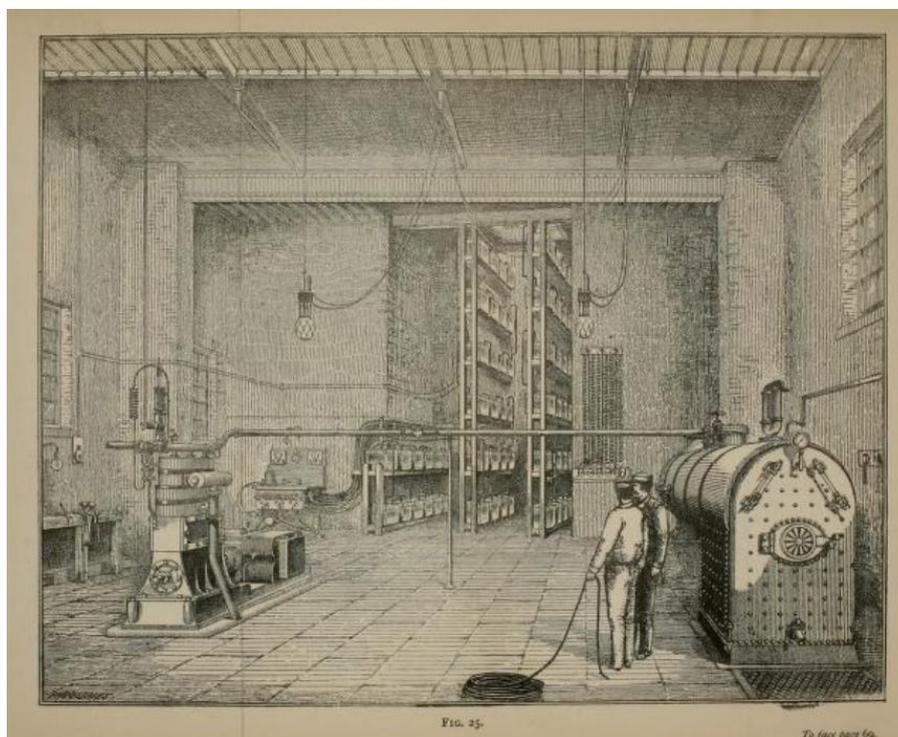


Figura 2. Kensington Court Station: máquina de vapor, dinamo y baterías, 1888.
Fuente: <https://archive.org/>

2.2. Concepto de *Smart Grid*

El término *Smart Grid* es de origen inglés y se puede traducir literalmente al español como Red Inteligente. Como se ha podido ver, la aparición de este tipo de redes responde a la demanda creciente de energía eléctrica y a la incorporación de nuevas tecnologías energéticas en la red. Este tipo de redes tiene como fin poder integrar estas nuevas tecnologías y conseguir una mayor eficiencia energética, consiguiendo así satisfacer la creciente demanda y en cierta manera, con el fin último poder reducir las emisiones para luchar contra el cambio climático.

Por otro lado, cabe destacar que las nuevas tecnologías de generación de energía no solo son más rentables en algunos casos, sino que además han de ser instaladas para poder cumplir objetivos que a nivel mundial han sido marcados para reducir la contaminación.

Se hace referencia con el termino red inteligente porque esta pasa de ser una red unidireccional, como en el modelo clásico, a ser una red bidireccional; estando dotada además de mecanismos de monitorización y automatización.

Desde el momento en el que la red se convierte en bidireccional, se deja de ver a los clientes de una red inteligente como consumidores, pudiendo estos convertirse en momentos determinados en productores de energía, entregando a la red los excedentes producidos.

Por ejemplo, una vivienda que cuenta con una instalación fotovoltaica puede producir y en un momento determinado más energía de la que consume. Esta vivienda podría verter a la red dicho excedente.

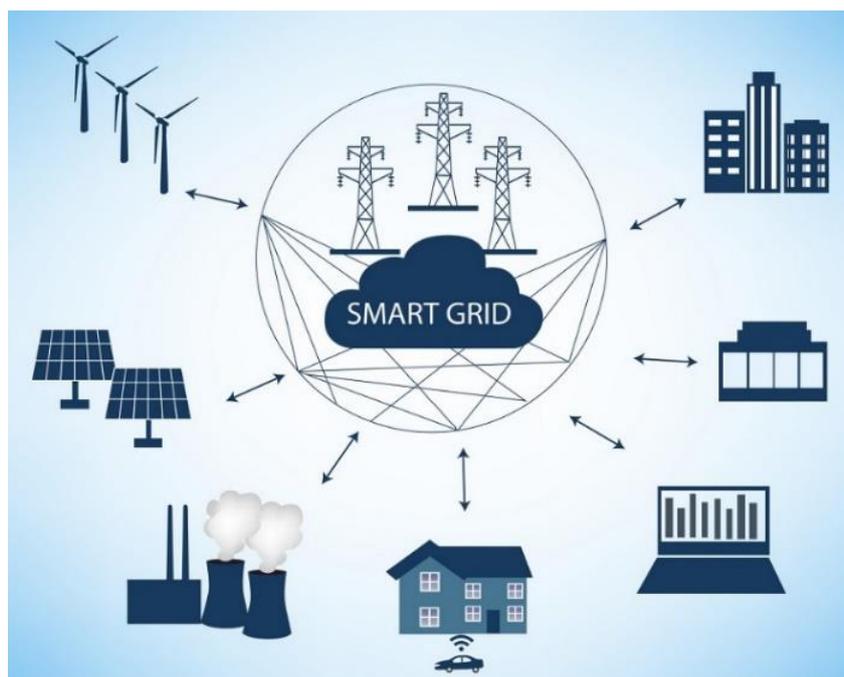


Figura 3. Esquema de una Smart Grid.
Fuente: <https://blog.gruponovelec.com/>

Si este ejemplo en concreto lo abstraemos al conjunto de la red, se obtiene una estructura completamente distinta a la que se conoce como red eléctrica clásica. Estos clientes que suministran a la red los excedentes de energía que producen, no son el único factor a tener en cuenta. Las “*Smart Grid*” tienen que además de gestionar estas pequeñas aportaciones otras más importantes ya que la creciente necesidad de energía conlleva también, combinado con el abaratamiento de las energías renovables, un aumento de puntos de producción.

A todo esto, se le suma la nueva capacidad que adquieren las redes para acumular energía, de tal manera que además la red tiene que decidir si la energía se almacena, se distribuye o por otro lado ha de coger energía almacenada para hacer frente a la demanda. Las tecnologías existentes hoy en día de almacenamiento aun no son lo suficientemente maduras, lo que supone que el almacenamiento a gran escala no sea aún una realidad.

El último factor importante que ha de gestionar una “*Smart Grid*”, son todos los datos que los diferentes actores (generadores, consumidores, redes de transporte y distribución, etc.) generan. Las redes inteligentes traen consigo una gran red de sensores, los cuales recogen información de consumos y de incidencias principalmente (Anexo 1).

Si se tienen en cuenta los principales problemas históricos de la red eléctrica clásica, se puede ver que la red inteligente propone soluciones a todos ellos:

- El problema de la falta de información de la red, principalmente de consumos, se ve resuelto por otra gran red de sensores integrada en la misma.
- El problema de la demanda en horas pico se ve resuelto con grandes almacenadores de energía, capaces de suavizar la curva de producción necesaria de energía.
- El continuo aumento de consumidores y la necesidad de ser menos contaminantes, se ve resuelto con la integración de energías renovables en la red.

3 Energía en las *Smart Grids*

Como se ha visto anteriormente, una Smart Grid contempla dos factores que ha de gestionar muy importantes respecto a la energía. El primero de ellos es la producción de la misma. Y el segundo es el almacenamiento de energía.

La energía eléctrica que las Smart Grids han de gestionar proviene cada vez de más fuentes diversas. Y aquí, entran en juego las energías renovables. Se ha de recordar, que no solo se trata de abastecer una creciente demanda, sino que, además, se ha de hacer de la manera más sostenible y eficiente posible. Por eso, a continuación, se explicarán los diferentes métodos de generación eléctrica.

Por otro lado, la inclusión de las energías renovables trae otro problema asociado: la variabilidad de la producción derivada de la fluctuación de los recursos asociados (radiación solar, velocidad del viento, régimen de lluvias ...). Es decir, en una central clásica, el volumen de electricidad generado se puede controlar mediante la cantidad de combustible utilizado. Sin embargo, un módulo solar generará solo mientras haya radiación solar, y nos es posible que genere electricidad sin luz.

En consecuencia, aparece la necesidad de almacenar la energía excedente producida, para poder satisfacer la demanda en cualquier intervalo de tiempo.

3.1. Producción de energía eléctrica

En este punto se van a explicar los diferentes métodos o tecnologías de producción de electricidad. Por un lado, se explicarán los métodos clásicos. Después se expondrán los problemas de éstos que han concluido en la necesidad de desarrollar e implantar las energías renovables, y, por último, se presentarán las tecnologías de generación de energía renovable.

3.1.1. Producción clásica de energía

Como se mencionaba en la introducción de este punto, la generación de energía en su concepción seguía un principio muy simple. Se utilizaba un combustible, el cual era quemado para transformar la energía del combustible en electricidad. A más demanda, más combustible se utilizaba. Estas centrales se conocen como centrales térmicas clásicas [5].

Con esto no se quiere decir que fuesen las únicas tecnologías para producir electricidad, pero sí que las centrales térmicas eran las principales fuentes de electricidad en el siglo XIX.

Los principales combustibles que usan estas centrales son carbón, gas natural y derivados, como el fuel-oíl. No existe gran diferencia en el esquema de funcionamiento de una central de este tipo según el combustible que se utilice. Principalmente existirían diferencias en el tratamiento previo del combustible, antes de que este pase a la caldera,

y en el diseño utilizado para los quemadores, los cuales se diseñan en función del combustible a utilizar.

Normalmente, estas centrales disponen, además, de sus propios recintos de almacenamiento de combustible, para poder garantizar una producción sin interrupciones.

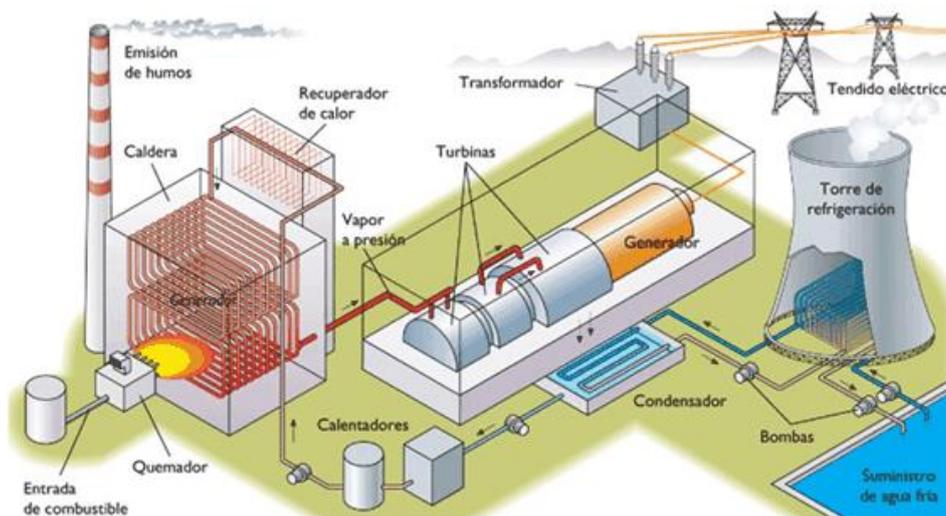


Figura 4. Esquema de una central térmica clásica.
Fuentes: <http://imseingenieria.blogspot.com/>

Una vez se ha visto el esquema general, se va a ver un poco en detalle el funcionamiento de estas centrales. Como se ha comentado, pueden funcionar con distintos combustibles, lo cual solo hará que varíe la primera parte del proceso de producción [6].

El primer paso, es extraer la energía de los combustibles, transformando está en calor.

→ Centrales de carbón

Lo primero que se hace con el carbón, independientemente del tipo que sea, es reducirlo a prácticamente polvo, para que el proceso de quemado sea más sencillo. Una vez es molido, este pasa a la caldera.

→ Centrales de fuel-oíl

En este caso, primero es precalentado el fuel-oíl para que fluidifique. Después, es inyectado directamente en los quemadores.

→ Centrales de gas

En este caso, el gas es inyectado directamente a los quemadores.

→ Centrales mixtas

Las centrales mixtas son aquellas que pueden quemar cualquier combustible de los anteriormente mencionados indistintamente.

En segundo lugar, lo que ocurre es que se calienta el agua que recorre las calderas por miles de tubos, llegando esta a convertirse en vapor. Al convertir el agua en vapor, se consigue una gran presión dentro de los tubos.

La tercera fase del proceso consiste en inyectar este vapor a altas presiones en una turbina, la cual girará gracias al empuje provocado por la presión del vapor, haciendo girar a su vez el eje central, compartido con el generador. Los generadores son en estas centrales, grandes alternadores.

Cabe remarcar que el vapor ha de ser deshumidificado previamente a entrar en la turbina. Si esto no es así, las gotas de agua restantes podrían ser lanzadas a gran velocidad contra la turbina, erosionando la misma.

Como vemos es un proceso relativamente sencillo, pero que aplicado a gran escala trae consigo grandes problemas, principalmente, de contaminación, como se indica en la figura 5.

PRODUCCIÓN DE CONTAMINANTES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS
Miles de toneladas/año (central de 1.000 MW)

| Contaminante | Carbón | Fuelóleo | Gas |
|---------------------|--------|----------|--------------|
| Partículas | 5 | 0,8 | 0,5 |
| Óxidos de azufre | 150 | 60 | 0,015 |
| Óxidos de nitrógeno | 23 | 25 | 13 |
| Monóxido de carbono | 0,25 | 0,009 | Despreciable |
| Hidrocarburos | 0,5 | 0,7 | Despreciable |

*Figura 5. Contaminación de centrales térmicas.
Fuente: <https://2www.foronuclear.org/>*

Este dato, resulta muy importante debido a que, desde hace unos años, desde que somos conscientes del cambio climático, desde las instituciones se han empezado a poner ciertas restricciones de contaminación.

En este punto caben remarcar el protocolo de Kioto y el acuerdo de París, en los cuales se firmaron acuerdos asociados a grandes reducciones de emisiones de gases invernadero.

Estos acuerdos sumados a políticas a nivel europeo conformaron lo que hoy conocemos como objetivo 20/20/20 en 2020. Cada uno de los tres primeros 20, representa una medida concreta [7-11]:

- Reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero en 2020, al menos en un 20%, respecto de los niveles de 1990.
- Ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética, además, en cada país el 10% de las necesidades del transporte deberán cubrirse mediante biocombustibles.
- Promover las energías renovables hasta el 20%



La Unión Europea ha puesto en marcha para el año 2020 su plan 20/20/20

Figura 6. Objetivo 20/20/20.
Fuente: <https://www.eurofred.es/>

En la figura 7 se puede observar cómo era la generación de energía en 1985, donde como se comentaba con anterioridad las centrales térmicas eran la tecnología usada principalmente.

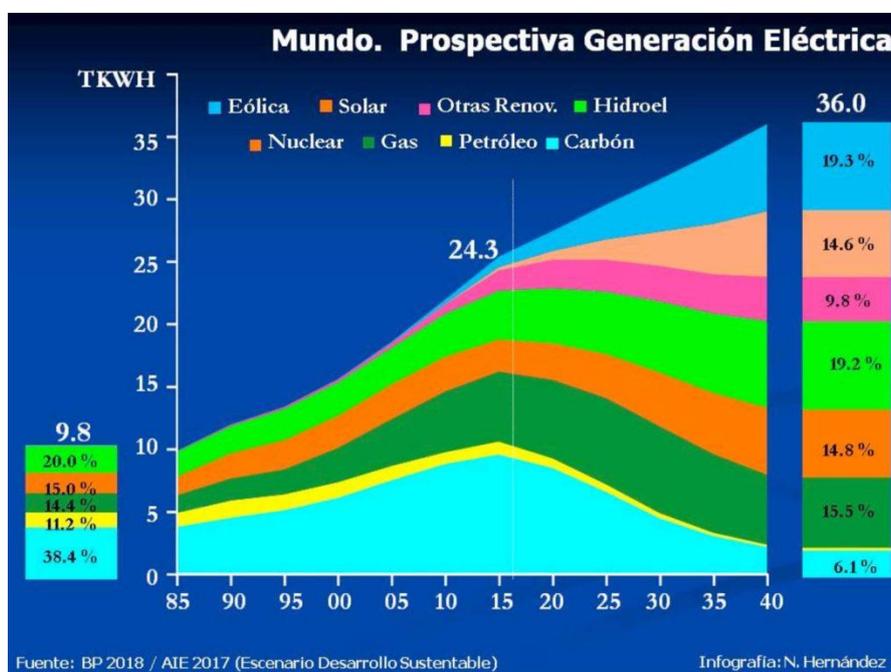


Figura 7. Generación eléctrica a nivel mundial.
Fuente: <http://petroleumag.com/>

Por otro lado, existe otra central clásica, la cual se ha separado de las térmicas porque se trata de una energía renovable. De hecho, se puede considerar a las centrales hidroeléctricas como las primeras centrales de producción de electricidad de manera renovable a gran escala. Mas concretamente, la primera central hidroeléctrica fue construida en las cataratas del Niágara en 1879.

En la figura 8 se puede ver el esquema de una central hidroeléctrica. Si prestamos atención sobre esta figura, veremos que el principio por el cual se genera electricidad es similar al de una central térmica, solo que, en vez de utilizar la presión producida por el vapor para hacer girar una turbina, en este caso se aprovecha la energía potencial que posee el agua [12].

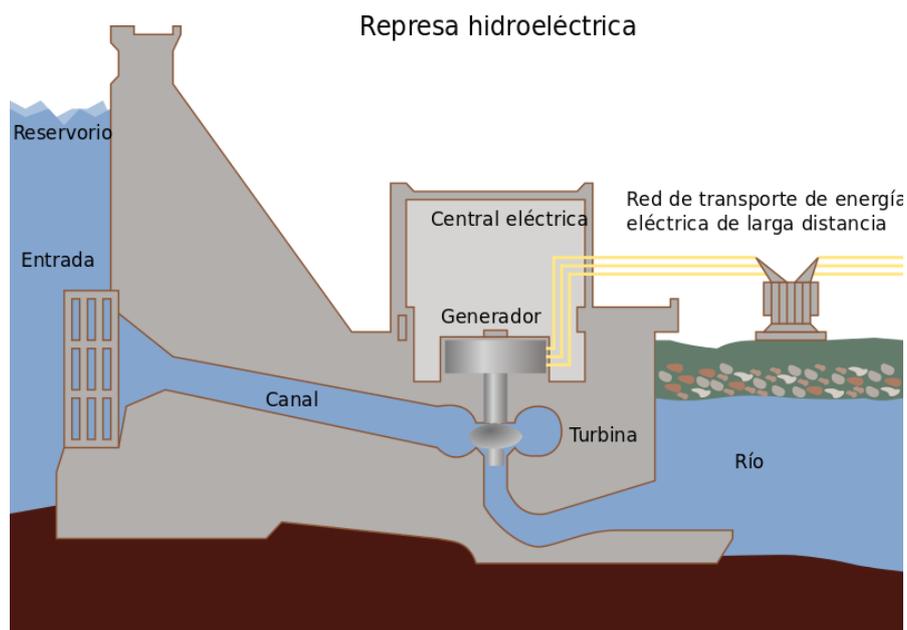


Figura 8. Central hidroeléctrica.
Fuente: <https://commons.wikimedia.org/>

Esta tecnología por su parte presenta grandes ventajas, pero también un importante inconveniente.

En cuanto a sus ventajas, son bastantes evidentes. Al no utilizar procesos de combustión, no emite gases de efecto invernadero y, además, su impacto medioambiental es moderado-bajo. Su principal impacto medioambiental viene derivado del cambio de régimen de los ríos, lo que afecta a la fauna y flora, y el impacto paisajístico que conlleva la creación de presas. Casi no tiene mantenimiento una central de estas características. Por último, al tratarse de una tecnología relativamente básica, es bastante segura.

Por otro lado, el gran inconveniente que presenta es su variabilidad en función del tiempo. Es decir, si se agotan las reservas hidrológicas, no se podrá hacer nada para seguir produciendo energía. Esto puede suceder, por ejemplo, en épocas de sequía. Además, no es posible instalar una central de estas características en cualquier lado, es necesario que exista un salto geodésico.

Aun con estos inconvenientes, esta tecnología está muy extendida. Como se puede ver en la figura 7, en 1985 era responsable de un 20% de la generación mundial de electricidad, y hoy en día sigue suponiendo un rango parecido.

Las centrales hidroeléctricas son la clara evolución de los antiguos molinos hidráulicos, los cuales aparecieron en la antigüedad con el mismo propósito, aprovechar la fuerza del agua. Por esto, es fácil entender que rápidamente, las centrales hidroeléctricas se alzaron como una gran fuente de generación eléctrica, ya que no suponían una nueva tecnología, sino que más bien eran una adaptación de una tecnología ya existente [13-14].

3.1.2. Producción actual de energía

Ya entrados en el siglo XX, comienzan a popularizarse diferentes tecnologías de producción de energía a gran escala. Llegados a este punto, se pueden dividir las centrales eléctricas en 7 tipos [15-16]:

- Hidroeléctricas
- Térmicas
- Nucleares
- Eólicas
- Solares (Fotovoltaicas y Fototérmicas)
- Biomasa
- Mareomotriz

3.1.2.1. Hidroeléctricas

Anteriormente ya se han introducido este tipo de centrales, y como se ha visto, son hoy en día, ampliamente utilizadas alrededor de todo el mundo. Aunque correspondan a lo que podríamos denominar centrales eléctricas clásicas, su funcionamiento no ha variado prácticamente nada con el paso de los años.

En este apartado se verán a dar algunas características técnicas de las centrales hidroeléctricas y se presentarán los diferentes tipos [17].

En cuanto a los tipos de centrales eléctricas, principalmente se puede distinguir entre dos. Por un lado, las centrales hidroeléctricas de pasada y por otro, las centrales hidroeléctricas con embalse de reserva [19].

→ Centrales hidroeléctricas de pasada

En estas centrales se aprovecha únicamente la energía de un caudal de agua. Se toma una parte del caudal de agua, desviando este del caudal original, y se hace pasar por una turbina, instalada en una central. Tras esto, el agua utilizada es devuelta al caudal original [18].

Estas centrales sirven para producir energía a pequeña escala, pudiendo producir hasta un máximo de 20 MW. Cabe destacar que su impacto medioambiental es practicante nulo. Figura 9.

→ Centrales hidroeléctricas con embalse de reserva

En este caso, se hace confluir el caudal en grandes presas o embalses, donde se acumulan grandes cantidades de agua. De esta manera, se puede regular la cantidad de agua que se hace pasar por las turbinas, además de poder usar las presas como reservas (esta cualidad resultará

muy importante en puntos posteriores donde se tratará el tema de almacenamiento de energía) [16]. Figura 10.

Concentrando estos grandes volúmenes de agua se consiguen crear saltos geodésicos artificiales, los cuales dotan al agua de gran energía. Estas centrales pueden llegar a generar hasta más de 1000 MWh.

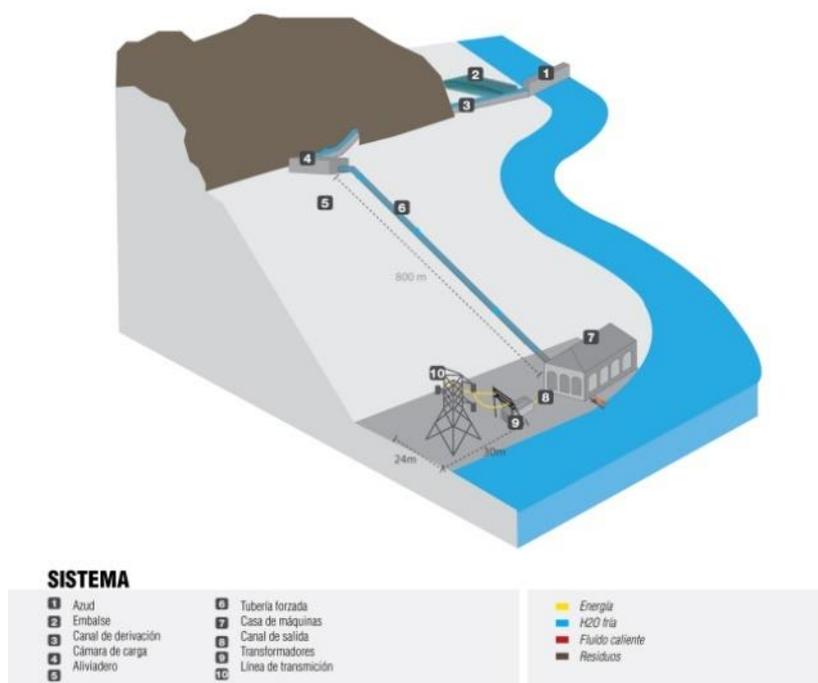


Figura 9. Central hidroeléctrica de pasada.
Fuente: <https://sistemasdelaenergia.wordpress.com/>

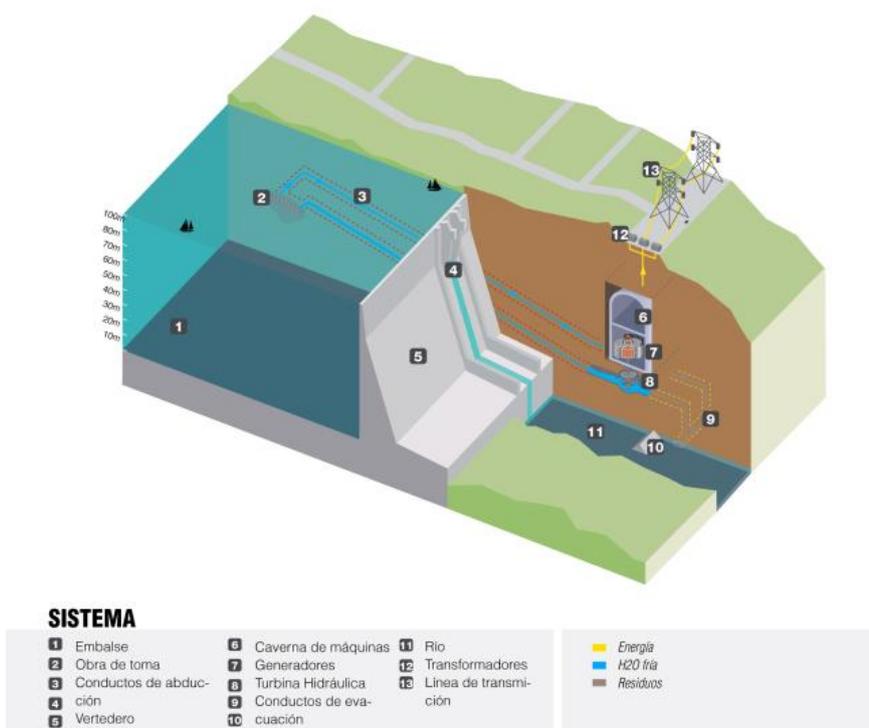


Figura 10. Central hidroeléctrica con embalse de reserva.
Fuente: <https://sistemasdelaenergia.wordpress.com/>

Existe también un tercer tipo de central que sería la central hidroeléctrica de bombeo, aunque esta, como ya se ha mencionado anteriormente, se verá cuando se trate el tema del almacenamiento de energía. El funcionamiento en cuanto a generación eléctrica es similar a las centrales con embalse.

3.1.2.2. Térmicas

Igual que ocurre con las centrales hidroeléctricas, aunque se consideren las térmicas como centrales clásicas, hoy en día, siguen siendo ampliamente utilizadas. Si bien han sufrido un mayor cambio que las hidroeléctricas, no distan mucho de sus modelos originales.

El esquema de una central de este tipo sigue siendo similar al presentado en el punto anterior. Teniendo como piezas centrales la caldera y la turbina [20].

Como se ha visto en el punto anterior, las centrales térmicas clásicas se alimentaban principalmente de carbón, gas natural y fuel-oíl. Las centrales térmicas más “modernas” usan también gas y carbón como base para la combustión. La diferencia radica en cómo se utilizan estos combustibles. Se pueden diferenciar tres nuevos tipos de centrales térmicas:

→ Centrales Térmicas de Ciclo Combinado

Estas centrales usan como principal combustible el gas natural. Su diferencia con las centrales térmicas de gas clásicas es que el gas, antes de ser utilizado para calentar el agua (proceso prácticamente idéntico al que encontramos en una central clásica), se hace pasar por una turbina de gas. Este es quemado dentro de la turbina, lo que genera una corriente por diferencia de presiones, y hace que se mueva la turbina.

El rendimiento comparado con una central clásica puede aumentar desde un 38% hasta incluso un 60%. Además, estas centrales pueden trabajar muchas más horas, una media de unas 7000 horas al año.

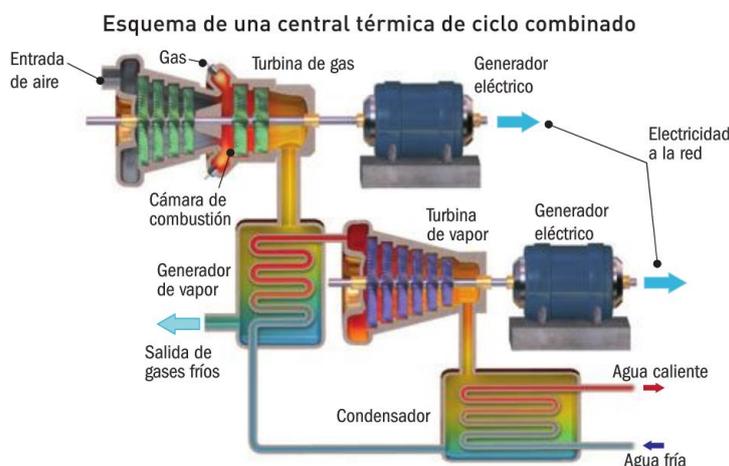


Figura 11. Esquema central térmica de ciclo combinado.
Fuente: <http://pelandintecno.blogspot.com/>

→ Centrales Térmicas de Combustión de Lecho Fluidizado

En este tipo de centrales, el combustible utilizado es el carbón, aunque estas centrales son también utilizadas para la combustión de otros materiales tales como biomasa o basura.

El carbón es quemado sobre un lecho de partículas inertes. A través de este lecho se hace circular una corriente de aire, la cual soporta el peso de las partículas y mantiene estas en suspensión. Esto da la sensación de que el carbón se vea como un líquido en ebullición.

En el lecho utilizado se inserta caliza, lo que permite capturar y extraer el azufre como subproducto seco. Esto, como es obvio, reduce las emisiones directas de gases.

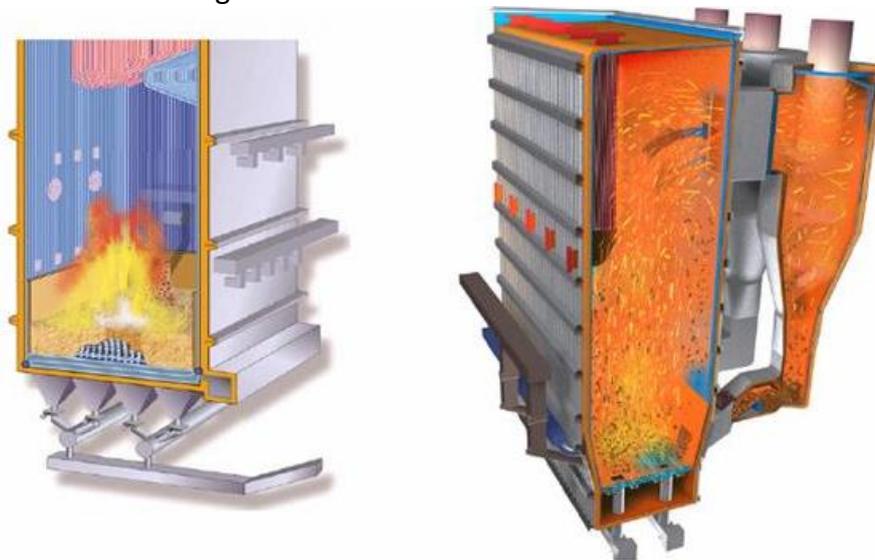


Figura 12. Caldera de una central térmica de lecho fundido.

Fuente: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/>

→ Centrales Térmicas Gicc: Gasificación de Carbón Integrada en ciclo combinado

Estas últimas centrales se basan en la gasificación del carbón, es decir, transformar el carbón en un gas sintético el cual tiene como elementos principales el CO y el H₂. Este tipo de centrales no produce grandes cantidades de energía, pero tiene una gran ventaja, que es que son capaces de reducir de manera muy importante las emisiones. Incluso pueden llegar a emitir un 99% menos de azufre que una central clásica.

Para conseguir gasificar el carbón, primero se reduce a granos y posteriormente es inyectado en un gasificador donde actúa con vapor de agua y oxígeno.

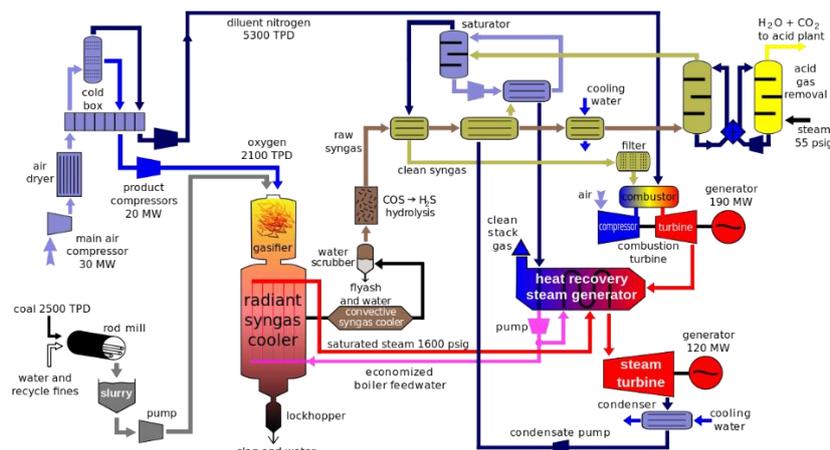


Figura 13. Esquema central térmica Gicc.

Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

3.1.2.3. Nucleares

Antes de pasar a describir el funcionamiento de una central nuclear, se ha aclarar que, si bien es cierto que estas centrales pueden considerarse también centrales térmicas, se ha preferido tratarlas como centrales a parte. También remarcar, que en este apartado solo se trataran las centrales nucleares de fisión. Por su parte, existen proyectos para desarrollar centrales nucleares basadas en fusión, pero hoy en día son tan solo eso, proyectos, por lo cual se verá en el capítulo 5.

Como se ha mencionado, estas centrales se pueden considerar como centrales térmicas, y esto es debido a que su funcionamiento es similar. El esquema de funcionamiento de este tipo de centrales solo cambia con respecto a las térmicas en el modo en que se convierte el agua en vapor [21].

En una central térmica se quema un combustible, esto genera calor y este calor transforma agua en vapor. Pues bien, en este caso, también obtenemos calor, que transforma el agua en vapor, pero no es mediante la quema de ningún combustible, sino mediante al proceso de fisión.

La fisión nuclear es una reacción a nivel atómico, en la cual un sobre átomo pesado, incide un neutrón, lo que provoca que este átomo pesado quede dividido en dos o más núcleos más ligeros. Este proceso emite neutrones, rayos gamma y grandes cantidades de energía. En la figura 14 queda se puede observar más en detalle este proceso [22].

Los materiales usados como “combustibles” en estos tipos de centrales son habitualmente uranio y plutonio. Para ser utilizados en este tipo de centrales, se disponen en barras [23].

En el caso de las centrales nucleares, el agua que se calienta mediante el proceso de fisión, la cual está en contacto directo con el “combustible”, nunca entra en ebullición, ya que se mantiene presurizado el circuito para que esto no suceda. Esto se debe a que el agua que se calienta con la fisión se encuentra en un circuito cerrado, del que no ha de salir, ya que, al estar en contacto con directo con la fisión, esta agua contiene

radioactividad. Por eso, este agua lo que hace es transferir su calor a otro circuito de agua (sin llegar nunca a estar en contacto), que en este caso sí, se transformará en vapor y es conducido una turbina para hacer girar esta. Todo este proceso se lleva a cabo dentro de un edificio de contención, construido de hormigón armado para mitigar cualquier posible fuga de radioactividad.

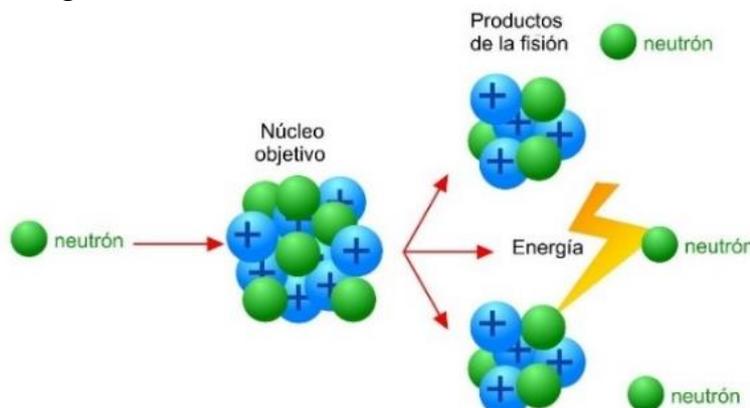


Figura 14. Fisión nuclear.

Fuente: <https://www.planetaincognito.es/>

Este segundo circuito, también será cerrado. Por último, tendremos un tercer circuito de agua, el cual es utilizado para la refrigeración (necesaria para condensar el agua y que vuelva al segundo circuito), que este sí que absorberá el calor restante y lo disipará por las torres de refrigeración.

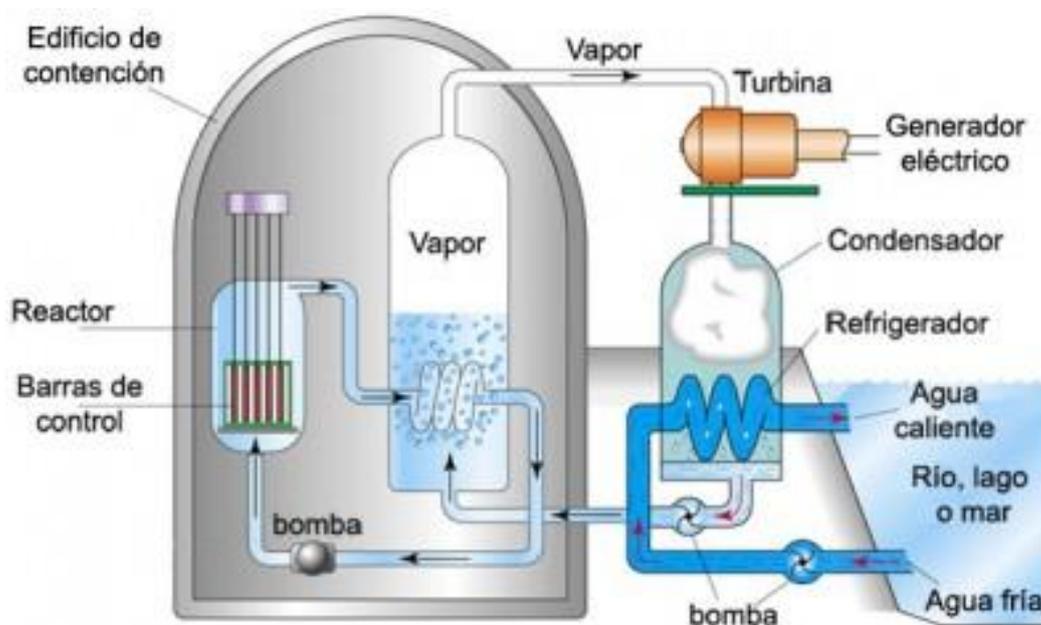


Figura 15. Esquema de una central nuclear.

Fuente: <https://energia-nuclear.net/>

Cabe destacar que este tipo de centrales presentan grandes ventajas, como puede ser la alta densidad de energía de los combustibles que utiliza. Para ponernos en contexto, un kilo de uranio equivaldría en energía a 100 toneladas de carbón. Lo que, de manera directa, también hace que el combustible sea más barato (para la misma cantidad de energía).

Son centrales que pueden funcionar de manera ininterrumpida durante todo el año, en parte esto se debe a que el combustible ha de ser sustituido una vez cada 6 meses o cada año, no como en centrales térmicas donde se ha de suministrar combustible de manera continuada [24].

También cabe destacar que su emisión de gases de efecto invernadero es muy inferior a la de las centrales térmicas y el espacio que ocupa una central es relativamente poco.

Si bien es cierto que los residuos que una central de este tipo produce son relativamente pocos, son altamente peligrosos y nocivos, y es aquí donde radica una de sus mayores desventajas. El no tratar los residuos de una manera adecuada podría desencadenar graves problemas medioambientales.

Cabe remarcar que, además, el uranio y el plutonio no son recursos renovables. Por lo que este tipo de centrales no representan una solución real para sustituir a las centrales térmicas, ya que es una tecnología compleja, cara y no renovable.

Para poder eliminar las centrales térmicas a nivel mundial se necesitarían unas 10.000 centrales nucleares, y hoy en día, solo hay en torno a 500 en todo el mundo.

Como gran inconveniente o desventaja, existe la posibilidad de una catástrofe nuclear. Si algo llegase a fallar, podría liberarse la radiactividad de la central y causar grandes daños. Es cierto que estas centrales son altamente seguras, pero existen casos en los que se ha podido comprobar lo que supone un accidente en una central de este tipo. Recientemente encontramos el caso de Fukushima-Daiichi, el cual fue debido a un terremoto que afectó a la central, causa imposible de controlar por la mano humana. Años antes de esto, se puede encontrar el caso de Chernobil, el cual afectó a más de 30.000 personas e hizo de la zona donde antes estaba la central una zona inhabitable. Esto sucedió en 1986, pero aun así, hoy en día, siguen existiendo en la zona altos niveles de radioactividad los cuales no son compatibles con la vida humana.

Por último, cabe destacar, que al igual que ha sucedido con otro tipo de centrales, las centrales nucleares también han sido modernizadas y mejoradas con el tiempo. Actualmente, los últimos reactores instalados pertenecen a lo que se conoce como reactores de generación III+. Son reactores más eficientes, por lo que generan menos residuos a la vez, y además son más seguros ya que están diseñados para garantizar la estabilidad del núcleo.

3.1.2.4. Eólicas

Igual que sucede con las centrales hidráulicas, los molinos eólicos son la clara evolución de una tecnología utilizada durante cientos de años por los seres humanos para obtener energía del aire. Estos primeros molinos, tomaban la fuerza del viento y la convertían en energía mecánica.

Los aerogeneradores que se utilizan hoy en día siguen el mismo principio, solo que en vez de usar la energía mecánica para moler grano (función original de los molinos), se

utilizan para hacer girar un alternador, y así, generar electricidad. Por esto, también se hace referencia a un molino con el termino aerogenerador.

Estos aerogeneradores funcionan basándose en el mismo principio que hace volar a un avión, el principio de sustentación. Principio basado en la diferencia de presiones que se crea en la pala cuando el viento la atraviesa [25,26].

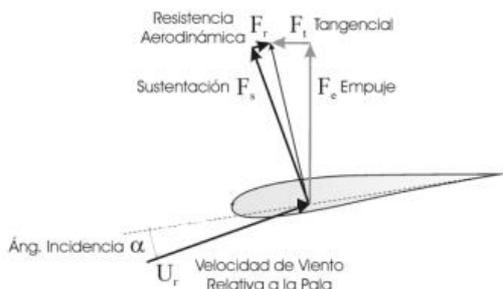


Figura 16. Principio de sustentación en la pala de un aerogenerador.

Fuente: <https://grupo15fluidos.wordpress.com/>

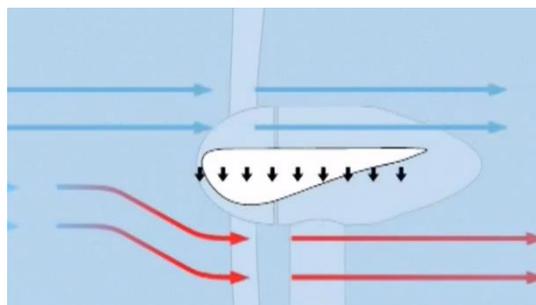


Figura 17. Principio de sustentación en la pala de un aerogenerador.

Fuente: <https://grupo15fluidos.wordpress.com/>

En este caso se está haciendo referencia al modelo de aerogenerador más ampliamente utilizado, eje horizontal y 3 palas, debido a que es el que mejor funciona a la hora de aprovechar el viento. Este aerogenerador presenta el esquema mostrado en la figura 18 (Anexo 2).

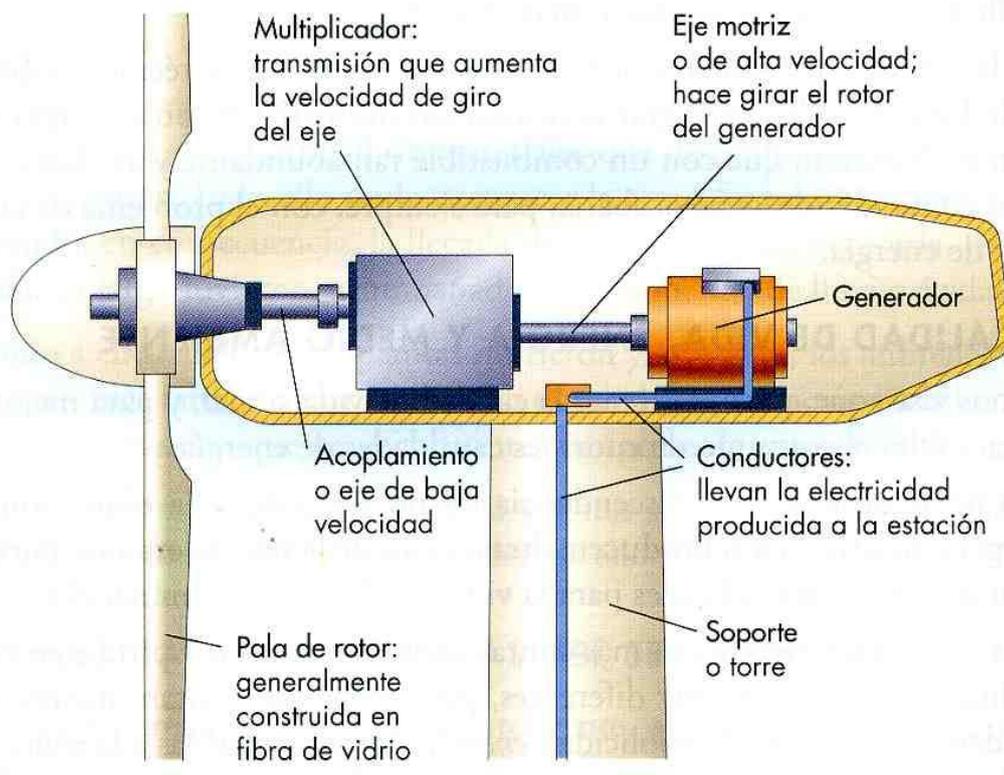


Figura 18. Esquema aerogenerador.

Fuente: <https://eolicaunionhidalgo.wordpress.com/>

Es el modelo más ampliamente utilizado para la generación de electricidad a gran escala. Solemos encontrarlos agrupados en parques eólicos, los cuales pueden encontrarse en tierra (*onshore*) o en el mar (*offshore*).

Estos molinos, pueden ser escalados para usos domésticos, o pueden hacerse incluso muy grandes para poder aprovechar localizaciones privilegiadas. Algunos pueden incluso llegar a alcanzar los 220 metros de altura, con aspas de 80 metros, como es el caso del V164, el cual logró generar 216.000kwh en 24 horas.

Cuando se agrupan en parque eólicos, estos podrán albergar la cantidad de molinos que el entorno pueda contener [27]. Esta es su única limitación. Se puede encontrar molinos solos o encontrar parques de hasta eólicos que ocupen superficies de hasta 3.800km², como es el caso de Base de Energía Eólica Ulanqab, en china, que cuando se finalice, será el parque eólico más grande del mundo.

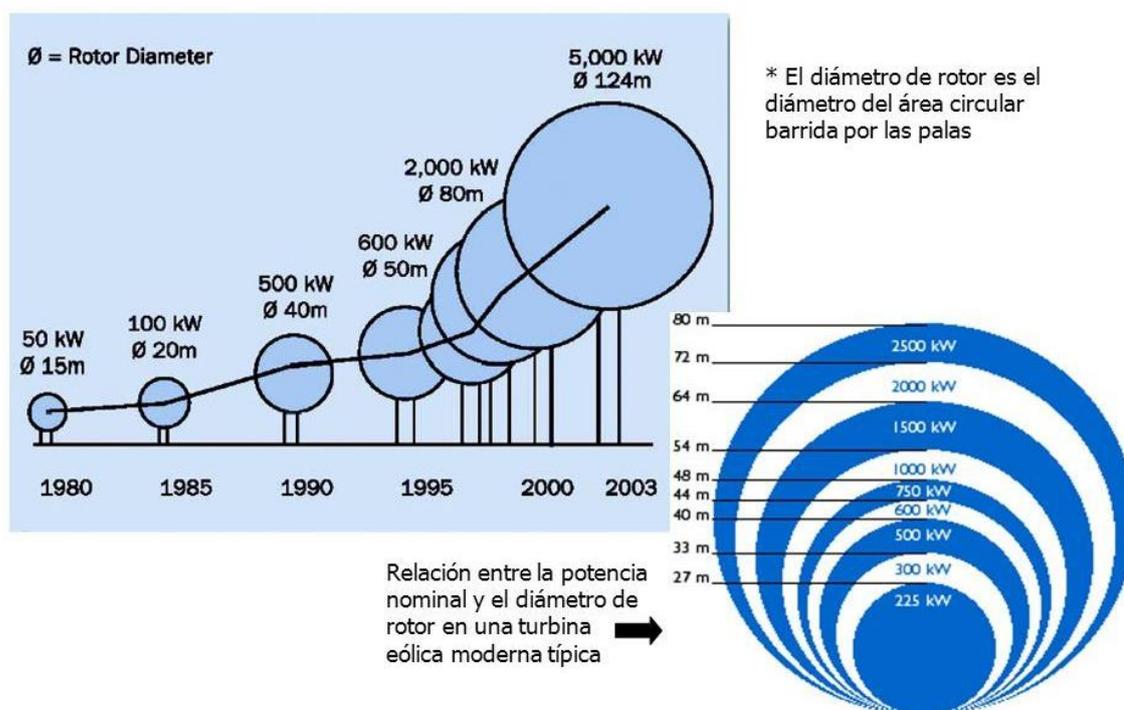


Figura 19. Potencia de un aerogenerador en relación con su tamaño.
Fuente: <https://slideplayer.es/>

3.1.2.5. Solares

En cuanto a las centrales solares, como su nombre indica, son centrales que transforman directamente la energía solar en electricidad. Para este cometido distinguimos entre dos tipos de centrales. Por un lado, centrales solares térmicas, las cuales concentran el calor del sol para usarlo como “combustible” de una central térmica, y por otro lado, las centrales basadas en el efecto fotoeléctrico, las cuales transforman la luz directamente en electricidad.

3.1.2.5.1. Centrales solares térmicas

En primer lugar, se tratarán las centrales térmicas solares. En este caso, igual que con el caso de las nucleares, aunque el principio sea transformar calor en electricidad, está separado debido a que al principio empleado para generar el calor es muy distante del de las centrales térmicas vistas [28].

En las centrales nucleares se veía sustituido el “combustible” por reacciones nucleares que producían calor. En este caso el “combustible” a utilizar será la propia luz solar, la cual contiene altas cantidades de energía.

Dentro de las centrales térmicas solares se pueden distinguir 4 tipos distintos, estos son adaptaciones de la misma tecnología a diferentes escalas, posibilidades del terreno y necesidades. Los 4 tipos quedan recogidos en la siguiente figura.

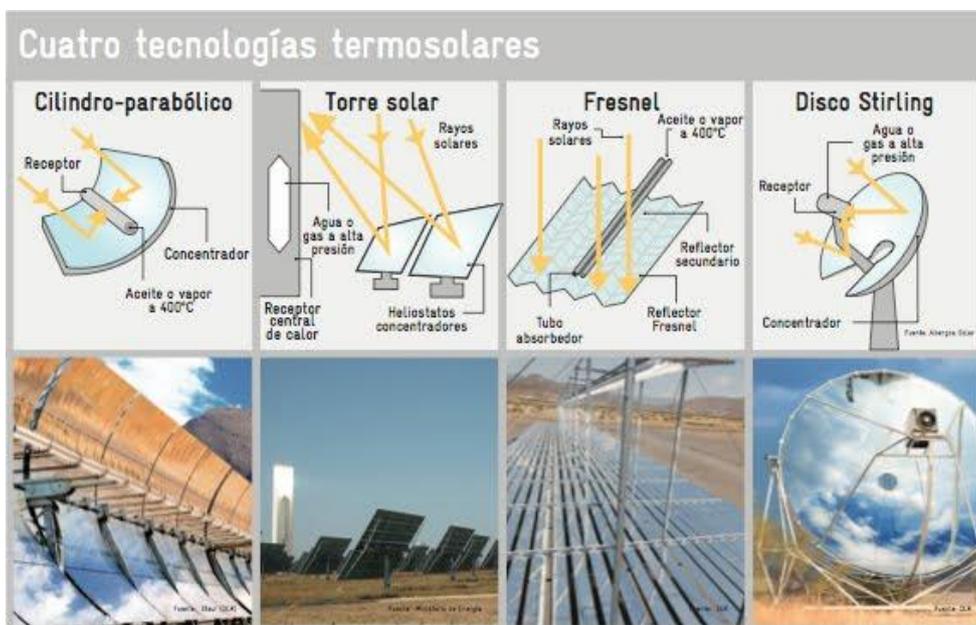


Figura 20. Tipos de centrales térmicas solares.
Fuente: <https://sites.google.com/>

Como se mencionaba, los 4 tipos se basan en un principio único. Concentrar toda la radiación solar incidentes sobre una superficie reflectora (espejos), sobre un punto o un tubo. De esta manera, se concentra también todo el calor de los rayos solares, haciendo posible que se sume suficiente calor como para posteriormente poder generar electricidad.

→ Cilindro-parabólico

La forma del reflector da nombre a este tipo de centrales. Este diseño facilita la contracción de toda la energía sobre un tubo absorbedor, el cual se sitúa en el foco de la parábola [30,31].

Este tubo a su vez está formado por dos tubos concéntricos, los cuales están separados entre sí por una capa de vacío. Normalmente, el líquido utilizado circula por el tubo metálico interior, y el exterior suele ser de cristal.

Dependiendo de las temperaturas que se vayan a alcanzar dentro del tubo, se pueden utilizar diferentes líquidos. Si las temperaturas son bajas, es decir por debajo de 200°C, se utiliza agua desmineralizada con Etileno-Glicol. Por otro lado, si las temperaturas se encuentran entre 200°C y 450°C el líquido utilizado será aceite sintético.

El líquido que circula por la línea focal de los reflectores, una vez ya caliente, es transportado por las tuberías de la central hasta un intercambiador de calor, donde pasa el calor del líquido de los tubos a agua, la cual se transforma en vapor y hace girar una turbina. Como en el caso de las nucleares, el circuito de líquido que absorbe el calor está aislado del que luego alimenta la central. Otra característica que más adelante será altamente importante es su capacidad de almacenar energía en forma de calor en sales.

→ Torre solar

Estas centrales están divididas en dos partes principalmente. La primera un campo de heliostatos o espejos direccionales, y la segunda, una torre, en la cual en la parte superior se encuentra la caldera, y en la parte inferior la turbina y el generador de vapor.

En este caso, todos los reflectores concentran su energía en el mismo punto, el cual corresponde con la parte alta de la torre, donde se encuentra la caldera. Por dentro de esta caldera circula líquido, el cual absorbe todo es calor, tras esto desciende, e igual que en el caso anterior, transfiere su calor a un segundo fluido, normalmente agua, la cual se evapora y hace girar una turbina, generando así electricidad. Estas centrales también admiten la posibilidad de almacenamiento térmico [29].

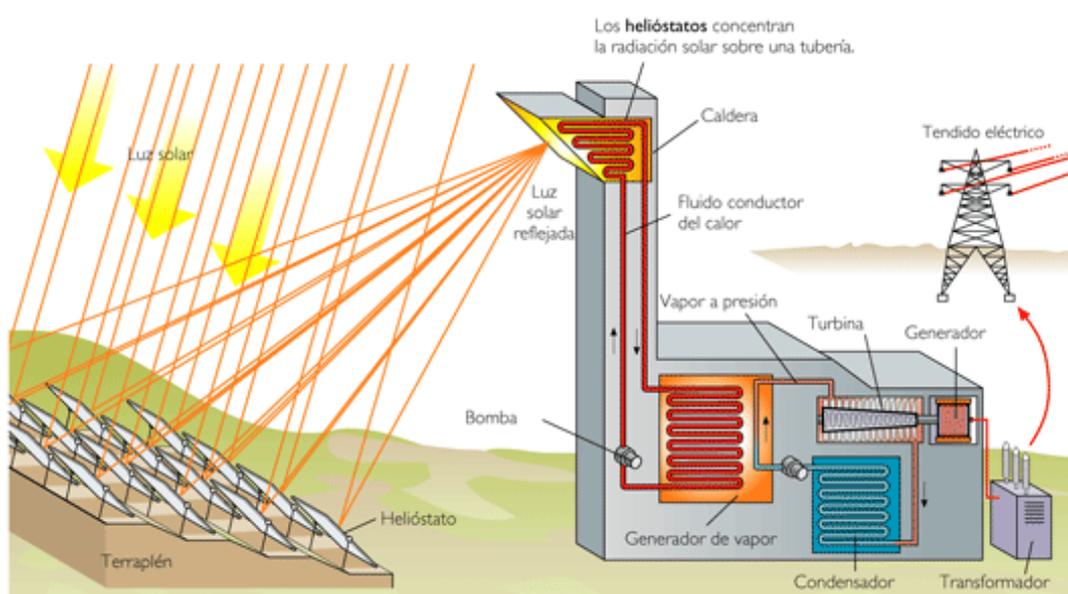


Figura 21. Central térmica solar de torre.
Fuente: <https://sites.google.com/>

→ Fresnel

Presentan un funcionamiento similar al de las centrales de cilindro-parabólico. La principal diferencia es la forma de los reflectores. Lo que sucede en este caso es que al resultar más económico y sencillo, aunque menos eficiente que las centrales de cilindro-parabólico, pueda ser preferible en diversas ocasiones [32].

→ Disco de Stirling

El disco de Stirling una gran diferencia con los casos anteriores, y es que no hay líquidos circulantes para transportar el calor. En este caso hay un disco parabólico, usado como reflector, y en su foco, se encuentra un motor de Stirling. El motor de Stirling es un motor que transforma el calor en movimiento directamente, y en este caso concreto, en electricidad. El disco parabólico concentra todo el calor que recibe en su foco, donde se sitúa el motor de Stirling [33].

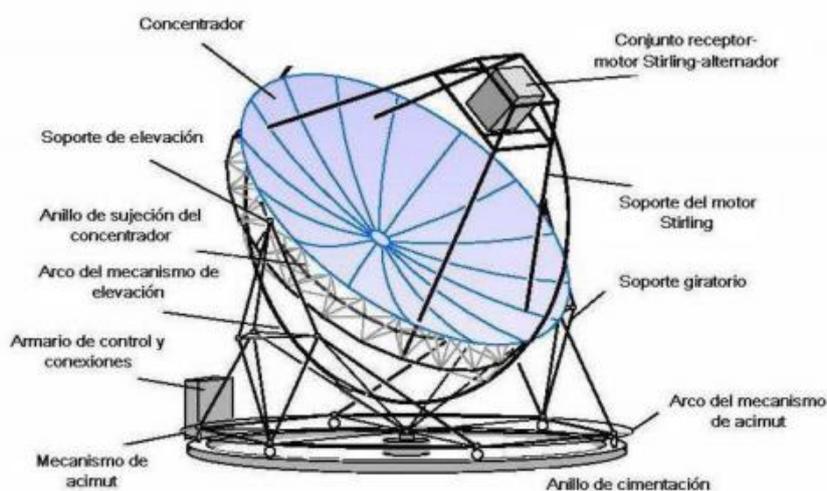


Figura 22. Disco de Stirling.
Fuente: <http://bibing.us.es/>

3.1.2.5.2. Centrales fotovoltaicas

Por otro lado, se encuentran las centrales solares basadas en el efecto fotoeléctrico. Estas son posiblemente la tecnología solar más conocida. Este se debe a su gran versatilidad y facilidad de uso. También cabe remarcar que es la única tecnología de generación en la cual la electricidad no se obtiene por la transformación de energía cinética en eléctrica, sino que en este caso se transforma directamente la radiación solar en electricidad.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887, aunque no fue hasta 1905 cuando Albert Einstein formuló una explicación teórica para el mismo. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un material cuando sobre este incide una radiación electromagnética, como por ejemplo la radiación solar [34].

Si bien es cierto que existen grandes “centrales” de generación compuestas por paneles fotovoltaicos, la situación es similar a la eólica, se pueden escalar a prácticamente cualquier necesidad, convirtiendo así la fotovoltaica en la tecnología más versátil de todas.

En este caso vale con comprender el funcionamiento de un único panel para comprender como funcionaría una “central” de este tipo, ya que solo sería la suma de muchos paneles.

Dentro de la generación fotovoltaica se pueden encontrar tres generaciones de células.

1. Primera generación: Son células de gran superficie, alta calidad y fácil unión. Están fabricadas usando un proceso de difusión con obleas de silicio. Llegan hasta una eficiencia teórica del 31%. Debido a su buen rendimiento y bajo coste, es la tecnología dominante en el mercado.
2. Segunda generación: Se basa en el método de producción epitaxial, con el cual se consiguen crear laminas muy delgadas y flexibles. El problema de esta generación es que el proceso es muy costoso y, por ende, las células también. Para estas células se utilizan principalmente: al silicio amorfo, silicio monocristalino, silicio policristalino, telururo de cadmio y sulfuros y seleniuros de indio. Ofrece eficiencia de hasta el 30%.
3. Tercera generación: Esta generación tiene como objetivo mayores eficiencias, intentando alcanzar valores de hasta el 60%. No se basan en semiconductores tradicionales como las dos primeras generaciones, sino que se basan dispositivos de huecos cuánticos, dispositivos que incorporan nanotubos de carbono o nanoestructuras de óxido de titanio.

Nos centraremos en los paneles de primera generación ya que actualmente son los más utilizados. Primero de todo, el panel está dividido en celdas, que a su vez se dividen en células fotovoltaicas, las cuales son las unidades mínimas de funcionamiento de un panel. Así como se hacía referencia a que una central estaría formada por muchos paneles dependiendo de la necesidad, cada panel puede contener el número de celdas deseado. Pudiendo adaptarse mejor a las necesidades. Son estas células las encargadas de la producción de electricidad [35-37].

Existen paneles solares compuestos de arseniuro de galio, pero nos centraremos en los de silicio ya que son ampliamente más utilizados. Además, cabe destacar que tanto el arseniuro de galio como el silicio se mezclan con otros materiales como son el fósforo y el boro para poder obtener cargas positivas y negativas.

En cuanto a las células, están formadas por una o más capas de material de material semiconductor, y cuentan con un recubrimiento de vidrio transparente. La ventaja que presenta este recubrimiento de vidrio es que permite el paso de la radiación, pero actuando como aislante térmico y protección contra los agentes ambientales [38].

En lo referido a la generación eléctrica primero cabe destacar que es la luz la que está cargada de energía. En las células de los paneles lo que ocurre es que estos fotones inciden contra el material semiconductor provocando que algunos electrones de este material se liberen. El movimiento de electrones liberados genera corriente eléctrica.

Una característica de esta tecnología es que genera corriente continua, la cual normalmente es necesario transformar a alterna para su transporte o utilización.

En la imagen de la derecha podemos observar la estructura más común de un panel fotovoltaico.

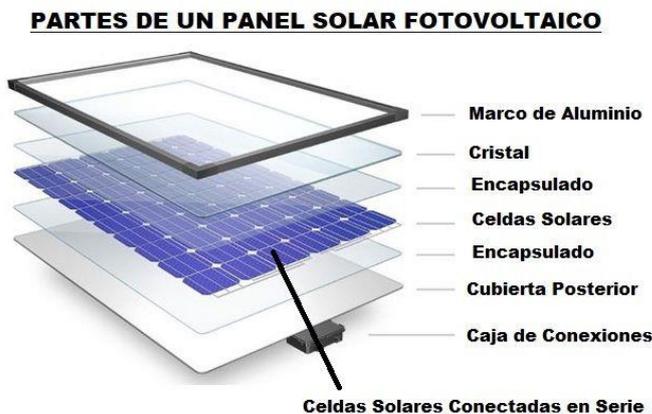


Figura 23. Estructura de un panel fotovoltaico.
Fuente: <https://www.areatecnologia.com/>

3.1.2.6. Biomasa

Antes incluso de explicar cómo funciona la producción de electricidad utilizando biomasa, es importante entender que es la biomasa como tal. El termino biomasa hace referencia, según La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), a:

“Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”

Es decir, hace referencia a todo deshecho o residuo de origen biológico que no ha sufrido un proceso de mineralización. En la definición se excluyen los combustibles fósiles como carbón gas y petróleo.

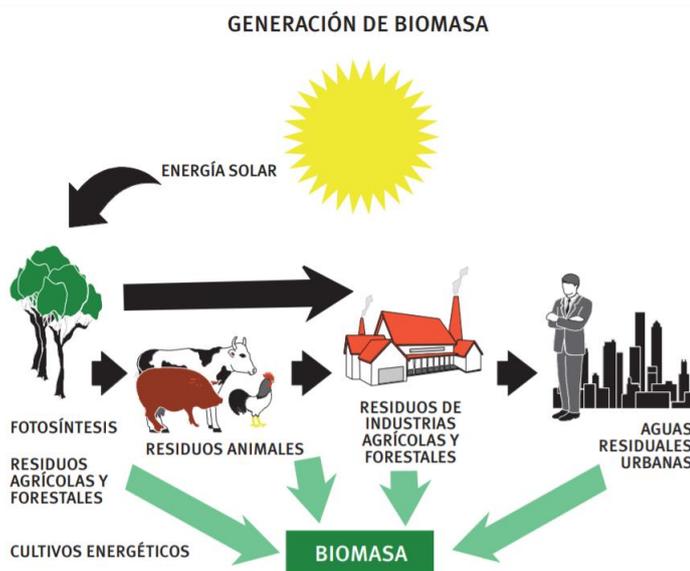


Figura 24. Compuesto de la biomasa.
Fuente: <http://nol.infocentre.es/>

Aunque es considerada por muchos como una energía renovable porque el carbono que expulsa a la atmósfera forma parte de la atmósfera presente, y no procede del capturado en otras épocas, como el que se expulsa a quemar combustibles fósiles, esta tecnología sí que contribuye al aumento del efecto invernadero. Esto se debe a que el carbono que se está expulsando a la atmósfera podría no expulsarse si la biomasa no fuese utilizada como combustible.

La energía proveniente de la biomasa tiene dos principales usos, el calor y la electricidad. Al fin y al cabo, ambos fines son muy similares ya que la biomasa se usa como el resto de los combustibles fósiles vistos anteriormente, se quema de donde se obtiene calor, el cual es aprovechado como tal, o para generar electricidad en centrales térmicas.

Se ha separado de las centrales térmicas convencionales ya que su impacto ambiental es radicalmente distinto al usar un combustible diferente, como se ha explicado anteriormente.

En las centrales de biomasa se necesitan calderas de mayor tamaño debido a poco poder calorífico de la biomasa, lo que conlleva a su vez un menor rendimiento.

Es común encontrar este tipo de centrales situadas al lado de industrias como la papelera, la forestal o la agroalimentaria. Situándolas junto a estas industrias se tiene el combustible prácticamente asegurado.

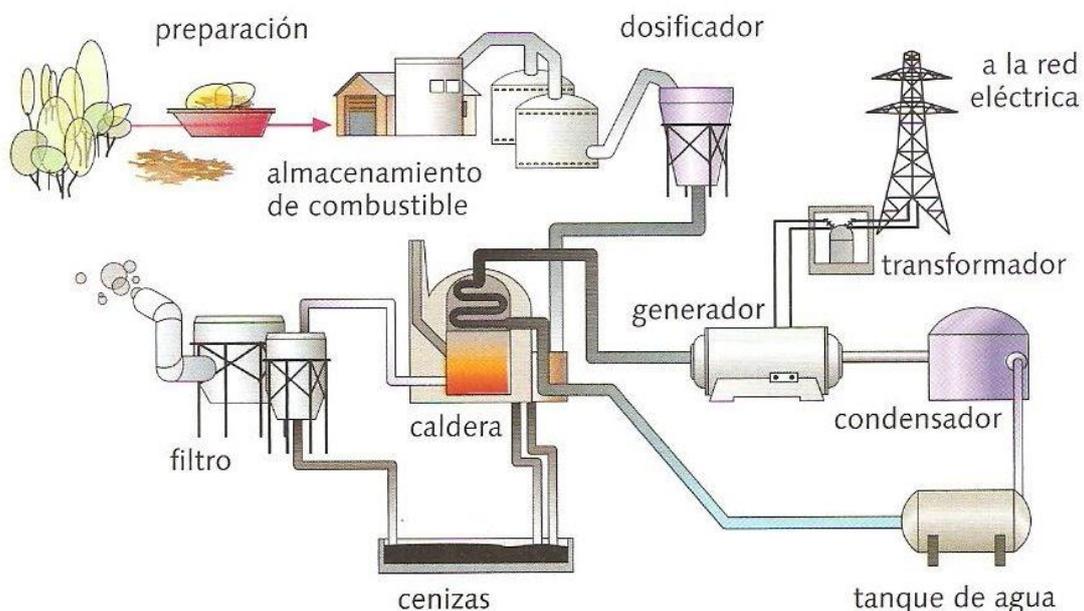


Figura 25. Estructura de una central de biomasa.
Fuente: <http://technology-alex.blogspot.com/>

3.1.2.7. Mareomotriz

La energía mareomotriz es la principal forma de obtención de energía del mar. Como su nombre indica, la energía se obtiene de las mareas, las cuales crean corrientes de agua

de gran poder y, además, lo que es más importante, de manera muy constante, ya que las mareas son cíclicas [40].

Existe una pleamar y una bajamar cada 6 horas. Se hace referencia con el término pleamar a la máxima altura que alcanza el mar en ese ciclo y con el término baja mar al nivel más bajo, son los puntos de inflexión de acaba de subir y comienza a bajar el nivel y viceversa.

La forma de aprovechar estas corrientes es colocar turbinas en los puntos donde más corriente se concentra. Estas turbinas pueden ser verticales u horizontales, y, además existe dos modelos de central distintos. Los primeros son los más sencillos ya que no cuentan con ninguna estructura extra al generador, simplemente son turbinas colocadas en el agua. El segundo modelo, está compuesto por una cuenca, la cual se llena de agua mientras sube la marea y cuando esta la marea baja, se abren las compuertas y sale el agua pasando por una turbina y un salto de agua debido a la diferencia de nivel.

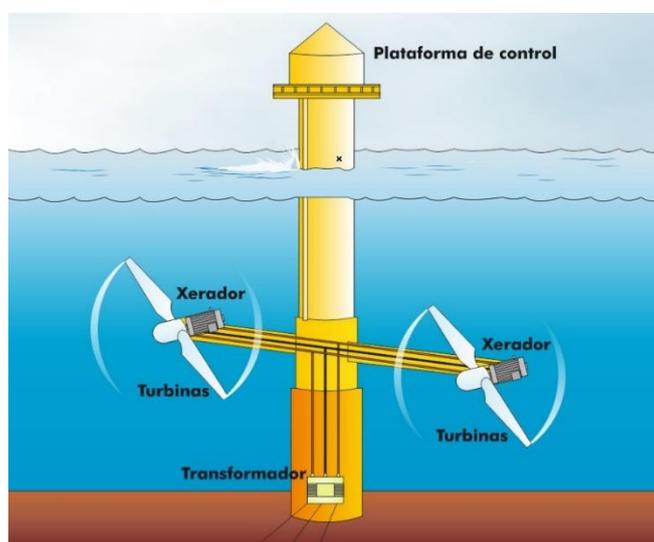


Figura 26. Central mareomotriz sin dique.
Fuente: <http://www.sotaventogalicia.com/>

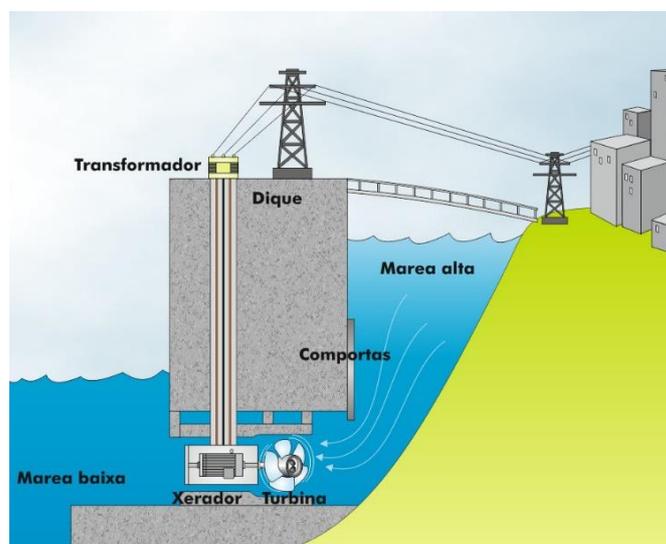


Figura 27. Central mareomotriz con dique.
Fuente: <http://www.sotaventogalicia.com/>

Por otro lado, existe otra forma algo menos común, pero también utilizada de obtener energía del mar. No se le dedicara un apartado debido a que su aportación a la energía generada a día de hoy es mínima. Se trata de la energía undimotriz, la cual aprovecha la energía de las olas para generar energía, lo hace gracias a objetos flotantes que cambia de posición con las olas, transformando después esta energía mecánica en electricidad [41].

3.2. Almacenamiento de energía

Finalizado el apartado anterior, quedarían recogidas las principales tecnologías o formas de producción eléctrica. Si bien es cierto que podrían existir algunas otras, no se han incluido debido a no ser especialmente relevantes en el cómputo general de producción actual.

En este apartado se expondrán las principales tecnologías de almacenamiento de energía, parte clave de una Smart Grid. Cabe recordar que resulta muy interesante la capacidad de almacenar energía por diversos motivos y a su vez, también existen distintas soluciones. Todo esto es lo que se presentara a continuación.

Hay tres puntos en los que se puede almacenar la energía:

- En las centrales: Algunas centrales como se ha mencionado anteriormente tienen la capacidad de almacenar energía en caso de ser necesario (p.ej. en las solares térmicas mediante tanques de sales fundidas).
- En la red: Dentro de la red se pueden instalar elemento de almacenaje de energía como baterías, centrales hidroeléctricas de bombeo, imanes superconductores o volantes de inercia.
- En los puntos de consumidor: Los consumidores finales tienen la capacidad de instalar elementos parecidos a los instalados en la red, pero a pequeña escala, como baterías.

Pero ¿por qué almacenar energía en la red? Se podría pensar que es más sencillo generar acorde a la necesidad de consumo y evitar así tener que almacenar energía. Esto por desgracia es mucho más complejo de lo que podría parecer.

Aún siendo cierto que los modelos de consumo existentes hoy en día tienen una alta fiabilidad, no llegan a ser exactos. Y en muchos casos, además, tampoco se puede lograr con una producción exactamente igual a la producción.

Aquí entran en juego dos factores muy importantes:

1. El precio de los combustibles: En el caso de utilizar centrales que consumen combustible, se puede generar electricidad bajo demanda. Aun así, el precio de los combustibles es variable, y el hecho de poder generar con un combustible más barato da una rentabilidad mayor. No se ha de olvidar, que la generación y distribución de electricidad al fin y al cabo es un negocio, y que las empresas que forman parte de él siempre buscarán el máximo

beneficio de este. Así pues, la capacidad de generar con combustibles cuando estos son más baratos resulta poco ventajosa si no se dispone de un sistema de almacenado de energía donde poder guardar los excesos de energía y utilizar esta cuando el combustible es más caro.

2. La variabilidad de las energías renovables: En lo relativo a energía renovables, la incertidumbre de generación es siempre mayor. Por ejemplo, en el caso de la generación en las distintas plantas solares no se producirá lo mismo un día soleado que un día nublado. Por este motivo es posible que algunos momentos produzcamos en exceso y en otros casos de manera insuficiente con respecto a la demanda. Por ello, la capacidad de almacenar energía hace que con el correcto dimensionamiento se puede ofrecer un servicio eléctrico más constante.

Por otro lado, cabe remarcar que una de las ventajas que ofrece el hecho de poder almacenar energía es que, en caso de no ser capaces de generar suficiente electricidad en un pico de demanda, siempre se podría recurrir a la energía almacenada [42,43].

En cuanto a las soluciones actuales para almacenar energía, se pueden dividir de la siguiente manera:

3.2.1. Almacenamiento mecánico

3.2.1.1. Aire comprimido

También conocida esta técnica como CAES, por su denominación en inglés "*Compressed Air Energy Storage*", es una de las técnicas más eficientes para almacenar energía. Estas instalaciones están formadas normalmente por un motor usado tanto para comprimir aire como para generar electricidad conectado a una turbina dependiendo de la necesidad.

Cuando existe en la red un exceso de energía, ésta se aprovecha para hacer funcionar los motores, los cuales comprimen aire y lo envían a cavernas subterráneas donde se almacena comprimido.

Por otro lado, cuando existe demanda eléctrica, el aire a presión almacenado bajo tierra es calentado mediante un foco, normalmente este foco de calor viene dado por un combustible fósil. El aplicar calor hace que este aire previamente comprimido se expanda. Debido a esto aumenta la presión en el espacio de almacenamiento, utilizando esta alta presión se hace circular el aire hasta una turbina, aquí hace la girar la misma, la cual está conectada a los motores, generando así electricidad.

El aire comprimido se calienta al comprimirlo, y en ese estado no puede conservarse. Por ello, se ha de enfriar, inicialmente este calor se expulsaba a la atmosfera, provocando con ello una pérdida de energía. Hoy en día, gracias un nuevo sistema, es posible almacenar este calor para posteriormente utilizar para calentar el aire y no

necesitar usar foco de calor de origen fósil. Es conocido como AA-CAES, nombre también proveniente del inglés “Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage”.

Cabe resaltar que este tipo de instalaciones precisan de una geología concreta, ya que necesitan que las cavernas subterráneas utilizadas para almacenar el aire sean de sal, roca dura o roca porosa [45,46].

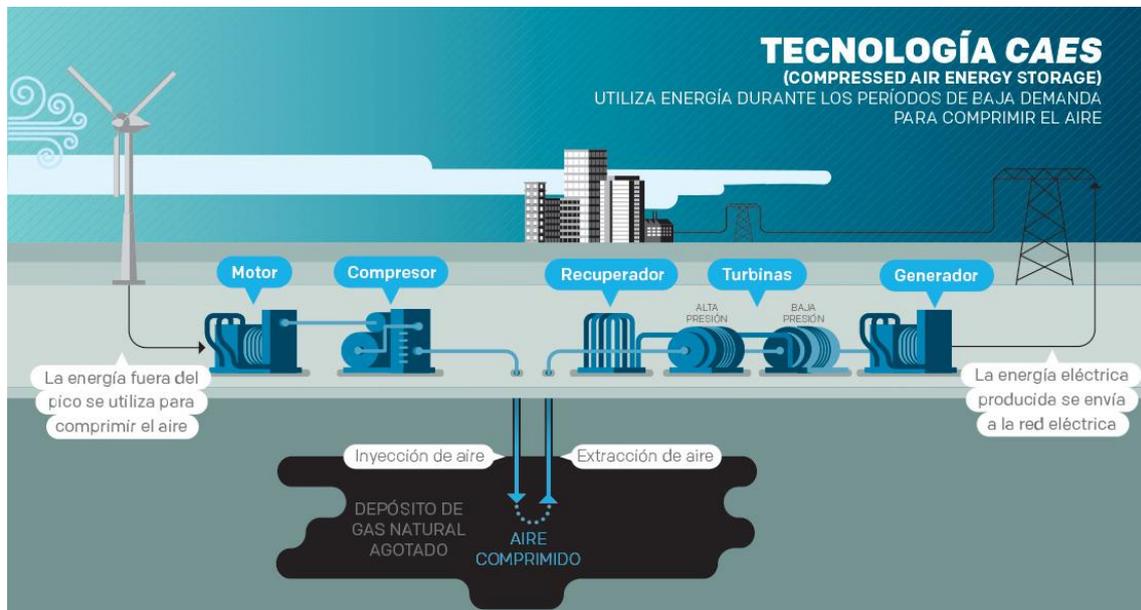


Figura 28. Almacenamiento de energía en forma de aire comprimido.
Fuente: <http://www.proyectofse.mx/>

3.2.1.2. Hidráulica de bombeo

Previamente se veía que la hidráulica era una de las energías renovables más antiguas y más extendida, dejando en el aire su otra cara: la capacidad de almacenar energía. Realmente, al construir una presa, ya se está creando almacenamiento de energía, reteniendo el agua en un punto hasta que se desee utilizar. Cuanta más agua almacenemos, más energía podremos generar posteriormente en caso de necesidad.

La idea de la hidráulica de bombeo es utilizar la energía sobrante de la red para conducir agua a presas o depósitos, de tal forma que se le dota a la misma de energía potencial que después se convierte en las centrales hidroeléctricas en energía eléctrica de una manera sencilla [45].



Figura 29. Funcionamiento de una central hidroeléctrica de bombeo.
Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/>

3.2.1.3. Volantes de inercia

Como su propio nombre indica, se trata de una volante inercia, el cual es impulsado por un motor reversible cuando se desea almacenar energía, haciendo que acelere, y es frenado cuando el motor en vez de acelerarlo lo decelera para poder producir electricidad [45].

Normalmente los volantes de inercia se encuentran dentro de cámaras de vacío para evitar el rozamiento con el aire y así lograr una mayor eficiencia. Dentro de los volantes de inercia, se puede distinguir dos grupos:

- De baja velocidad: se encuentran girando por debajo de las 6×10^3 rpm. Son utilizados para aplicaciones de baja y media potencia.
- De alta velocidad: pueden llegar a girar hasta por encima de las 10^5 rpm. Se utilizan en aplicaciones de alta potencia.

Son capaces de almacenar incluso en el orden de varios MW de potencia.

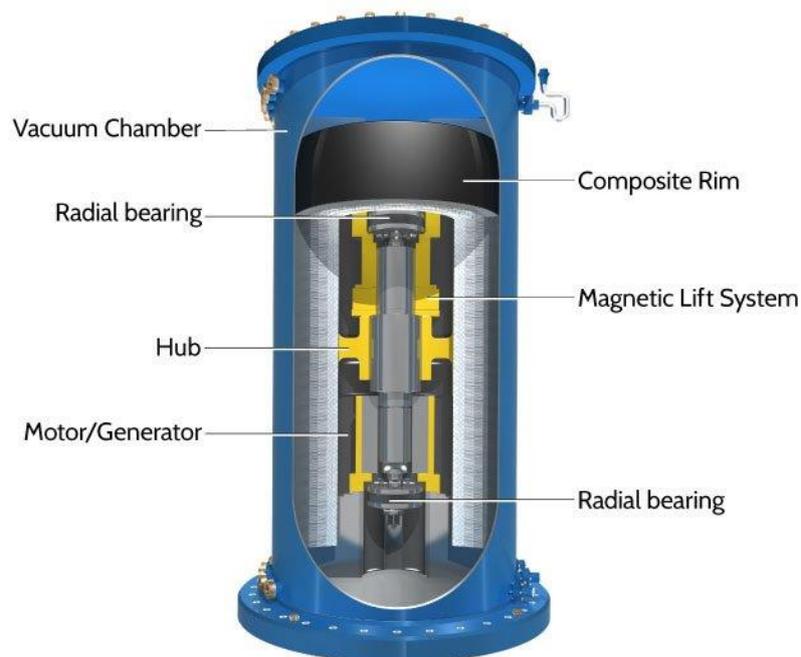


Figura 30. Volante de inercia para almacenamiento de energía.
Fuente: <https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/>

3.2.2. Almacenamiento térmico

Si bien es cierto que existen otras tecnologías de almacenamiento de energía en formato térmico, la única relevante a nivel de ser después convertida en electricidad es la basada en sales fundidas.

La tecnología basada en sales fundidas consiste en utilizar estas para almacenar calor, normalmente proveniente de centrales solares. Esto permite que este tipo de centrales pueda llegar incluso a funcionar durante 24 horas seguidas sin radiación solar.

Las sales absorben el calor sobrante recogido en estas centrales y una vez es necesario generar electricidad las sales entran en contacto con agua para generar vapor y hacer que la turbina gire.

Las mezclas utilizadas en este tipo de almacenamientos son de nitratos de sodio, potasio y calcio, y llegan a alcanzar temperaturas superiores a los 500°C. Son almacenadas en tanques aislados. Las principales ventajas de utilizar este tipo de sales para el almacenamiento de energía son su bajo precio, no toxicidad ni inflamabilidad, rango de temperaturas de operación compatible con las temperaturas de una turbina de vapor.

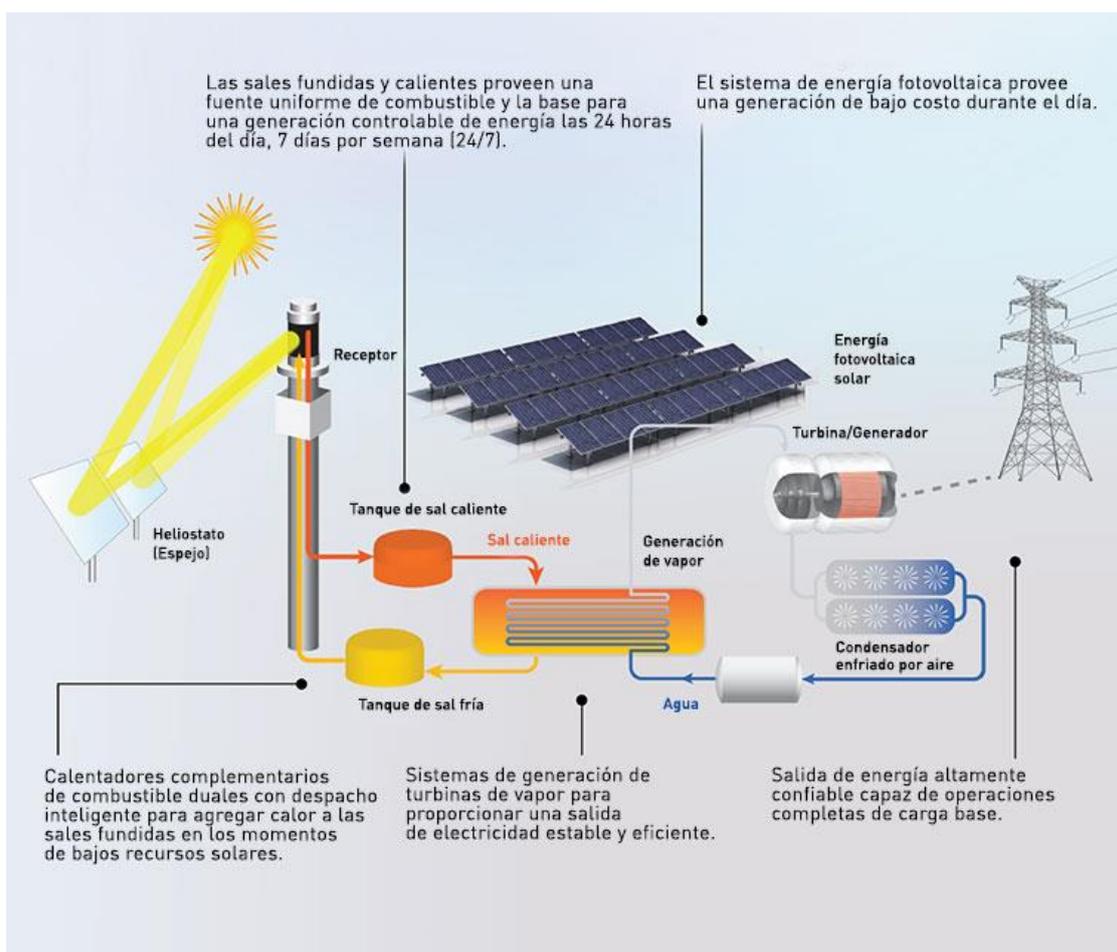


Figura 31. Sales fundidas en una central solar.
Fuente: <https://www.solarreserve.com/>

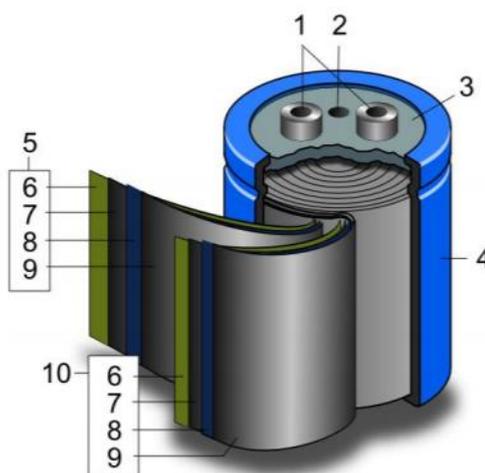
3.2.3. Almacenamiento electromagnético

3.2.3.1. Supercondensadores

En este punto caben destacar los supercondensadores. Se trata de sistemas que se basan en el almacenamiento de cargas electrostáticas.

Su funcionamiento es similar al de un condensador, la principal diferencia es el orden en el que trabaja. Mientras que un condensador normal puede funcionar en el orden de mili Faradios, un supercondensador puede alcanzar el orden de miles de Faradios.

La estructura de estos dispositivos está formada por pares de electrodos, un medio dieléctrico y una membrana porosa situada en el centro del dieléctrico, como se puede ver en la siguiente figura. La capacidad de carga de los supercondensadores tiene dependencia directa con la superficie de los electrodos. A mayor superficie, mayor capacidad [45].



Detalles de construcción de un supercondensador. 1. Terminales. 2. Ventilación. 3. Disco de sellado hermético. 4. Lata de aluminio. 5. Polo positivo. 6. Separador. 7. Electrodo. 8. Colector. 9. Electrodo. 10. Polo negativo.

Figura 32. Estructura de un supercondensador.

Fuente: <http://bibing.us.es/>

Ahora bien, aunque los supercondensadores sean almacenadores de energía, realmente, a la hora de instalarlos en la red cumplen otra función. Al ser capaces de cargarse en muy poco tiempo y descargarse igualmente en tiempos muy pequeños, su principal función es la de estabilizar la red, almacenando la energía en periodos muy cortos de tiempo, suavizando tanto los picos de demanda como de producción.

3.2.3.2. Imanes superconductores (SMES)

Por otro lado, en cuanto al almacenamiento electromagnético, podemos encontrar sistemas basados en imanes superconductores. Al igual que ocurre con los superconductores, una de sus principales ventajas es que es capaz de entregar toda su energía almacenada en un periodo de tiempo muy corto [45,47].

En este caso, la energía se almacena en forma de campo magnético. Este es muy contenido gracias a la geometría de las bobinas superconductoras. Una vez se tiene el campo magnético, mantenerlo tiene un coste energético muy pequeño. La liberación de la energía se hace mediante la descarga de las bobinas.

Una de sus principales ventajas es que la energía en esta forma puede almacenarse por periodos muy largos de tiempo.

3.2.4. Almacenamiento electroquímico

3.2.4.1. Baterías

En cuanto al almacenamiento electroquímico, cabe destacar la importancia que tienen las baterías en las diferentes escalas. Son la tecnología más asequible de almacenamiento a más pequeña escala y además pueden estar compuestas por diversas tecnologías. A continuación, se exponen las principales tecnologías de baterías [45].

→ Baterías de sodio-azufre (NaS)

Las baterías de sodio-azufre presentan la iniciativa, en cuanto a almacenamiento a gran escala en baterías, con mayor potencial. Si bien es cierto que es una tecnología aun en pleno desarrollo, los resultados obtenidos hasta la fecha son realmente buenos.

Son baterías que utilizan sales fundidas, las cuales necesitan altas temperaturas, en torno a 300°C, para que se produzcan reacciones redox (oxidación-reducción). Los electrodos de estas baterías están compuestos uno por sodio (Na) y otro por azufre(S), los cuales se encuentran fundidos en un electrolito sólido de beta alúmina [50].

Este tipo de baterías presenta 3 grandes ventajas:

- Elevada densidad de energía
- Muy alta capacidad
- Pérdida casi nula de energía con el tiempo

En contraposición, estas baterías tienen muy mala adaptación a pequeña escala, debido a sus grandes tamaños y pesos. Siendo únicamente destacables en el almacenamiento a gran escala.

→ Baterías níquel-cadmio (NiCd)

Las baterías de níquel-cadmio están compuestas por electrodos de hidróxido de níquel (Ni(OH)_2) y cadmio (Cd) en una disolución alcalina que actúa como electrolito.

Son baterías que, pese a su buen funcionamiento y poco mantenimiento, cada vez son menos usadas. El motivo principal de esto es que los componentes que utiliza son altamente contaminantes. También son baterías con un marcado efecto memoria, el cual hace que una batería pierda capacidad si la batería es cargada sin ser descargada el todo.

→ Baterías plomo-ácido

A pesar de ser las baterías más antiguas que existen, siguen estando presentes en numerosas aplicaciones. Sus cátodos están formados por dióxido de plomo (PbO_2), sus ánodos de plomo (Pb) y el electrolito que utilizan es ácido sulfúrico (H_2SO_4).

En cuanto al almacenamiento de energía, no se presentan como una buena solución a gran escala debido a su baja densidad de energía y energía específica, además el rendimiento decrece a temperaturas bajas, lo que convierte a este tipo de baterías en caras para almacenar grandes cantidades de energía.

→ Baterías de iones de litio (Li-ion)

Las baterías de litio gozan de una gran popularidad hoy en día debido a sus altas prestaciones. Esto se debe a que son capaces de almacenar grandes cantidades de energía en tamaños y pesos reducidos. Esta alta densidad energética hace de estas baterías una buena solución para el almacenamiento a pequeña y mediana escala.

A la hora de ser utilizadas a gran escala, el principal problema que presentan es su limitación temporal para almacenar energía.

Estas baterías de Li-ion están formadas por cátodos de óxidos metálicos de litio ($LiCoO_2$ ó $LiMO_2$), ánodos de grafito y electrolitos de disoluciones de sales de litio.

3.2.4.2. Hidrógeno

El hidrógeno, pese a ser el elemento más sencillo y abundante del universo, es difícil de encontrar aislado en nuestro planeta. Por otro lado, se presenta como una excelente forma de almacenar energía.

La principal técnica que existe para la obtención de hidrógeno es conocida como electrólisis. Esta consiste en aplicar electricidad a agua, rompiendo esta manera los enlaces entre el hidrogeno y el oxígeno, obteniendo como resultado ambos elementos en forma de gas.

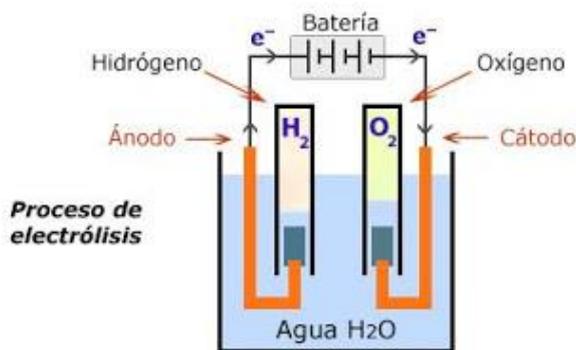


Figura 33. Electrólisis.

Fuente: <http://glosariofisicayquimica.blogspot.com/>

En cuanto al almacenamiento en hidrogeno, existen dos técnicas principalmente, las pilas de hidrogeno y el power-to-gas.

→ Pilas de hidrogeno

En cierta manera funcionan de una manera muy similar a una batería, solo que en este caso la energía se almacena en forma de hidrogeno.

La pila de hidrogeno por su parte lo único que necesita para funcionar, es que se le suministre hidrogeno y oxígeno. Pudiendo tomar el primero de un depósito donde se encuentra almacenado y el segundo mismamente del aire.

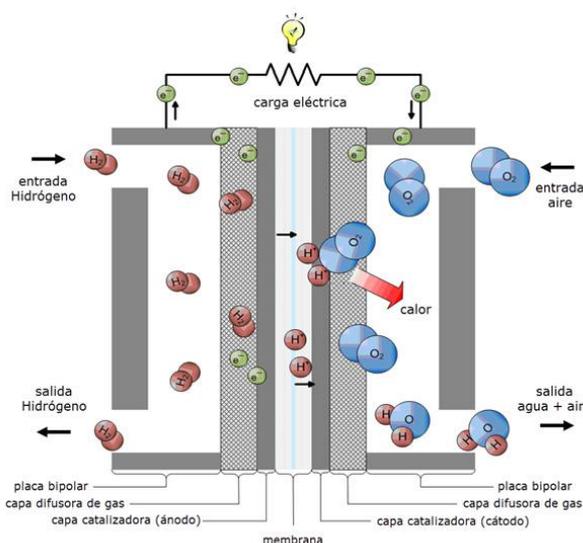


Figura 34. Estructura de una pila de hidrogeno.

Fuente: <http://www.lhusurbil.eus/>

El hidrogeno se introduce por el ánodo, y al entrar en contacto con el catalizador se disocia en electrones y protones, atravesando los protones la membrana y dirigiéndose al cátodo. Los electrones, al encontrarse con una membrana que actúa como aislante eléctrico, son obligados a pasar por un circuito externo, generando así corriente eléctrica. Al llegar al cátodo, el oxígeno reacciona junto con los protones y electrones, obtenido como resultado agua.

→ Power-to-gas

Mientras que en el caso anterior el hidrogeno que se utiliza podría venir de cualquier otro proceso, en el caso del power-to-gas el hidrogeno generado vendrá siempre extraído de agua por medio de la hidrolisis.

Este proceso comienza absorbiendo la electricidad sobrante y usándola para por medio de la electrólisis obtener hidrogeno. De aquí su nombre power-to-gas. Una vez se tiene el hidrogeno libre, se puede almacenar tal cual y usarlo a posteriori, se puede inyectar

en los conductos de gas natural, o bien se le puede someter a un proceso de metanización.

Inyectando el hidrogeno en los sistemas de gas natural se consigue enriquecer el gas natural dotándolo de un mayor poder calorífico.

El proceso de metanización presenta una gran ventaja, y es que al utilizar CO_2 para el proceso, se deja de emitir el mismo a la atmosfera directamente. Mediante este proceso se combina el hidrogeno y el dióxido de carbono para obtener metano CH_4 y agua. El metano por su parte también puede ser inyectado directamente en los sistemas de gas natural o utilizarse por separado [44,48,49].

Tanto el hidrogeno, como el gas y el metano, pueden usarse conjunta o individualmente para generar electricidad. También pueden ser utilizado para alimentar vehículos o como para calefactar.

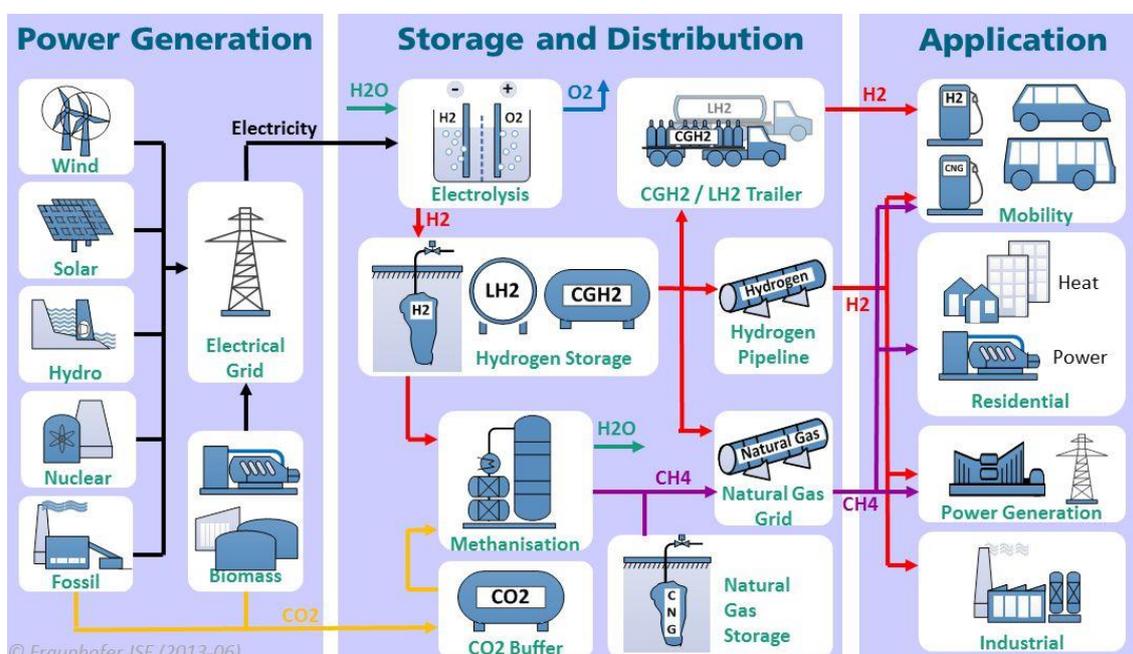


Figura 35. Esquema del power-to-gas.
Fuente: <https://www.ise.fraunhofer.de/>

Por último, se presentan en las dos siguientes figuras algunas comparaciones entre las diferentes tecnologías presentadas.

| Tecnología | Capacidad | Densidad de energía | Energía específica | Eficiencia de cada ciclo | Eficiencia de la descarga | Tiempo de respuesta | Autodescarga | Flexibilidad en el diseño | Duración del almacenamiento |
|------------------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| Bombeo hidroeléctrico (PHS) | MUY ALTA | MUY BAJA | MUY BAJA | ALTA | ALTA | ALTO | MUY BAJA | BAJA | ALTO |
| Aire comprimido (CAES) | ALTA | MUY BAJA | MEDIA | BAJA | BAJA | MEDIO | MUY BAJA | BAJA | ALTO |
| Volante de inercia (FES) | BAJA | MEDIA | ALTA | MUY ALTA | ALTA | BAJO | MUY ALTA | BAJA | BAJO |
| Supercondensador | MUY BAJA | BAJA | BAJA | MUY ALTA | MUY ALTA | MUY BAJO | ALTA | BAJA | BAJO |
| Pila de hidrógeno | MEDIA | MUY ALTA | MUY ALTA | BAJA | MUY BAJA | BAJO | MUY BAJA | BAJA | ALTO |
| Almacenamiento térmico (TES) | ND* | ALTA | ALTA | BAJA | ND* | MUY ALTO | BAJA | BAJA | MEDIO |
| Batería plomo-ácido | MEDIA | MEDIA | MEDIA | ALTA | MEDIA | MUY BAJO | BAJA | BAJA | MEDIO |
| Batería ión-litio | BAJA | ALTA | ALTA | MUY ALTA | MEDIA | MUY BAJO | BAJA | BAJA | MEDIO |
| Batería NaS | ALTA | ALTA | ALTA | ALTA | MEDIA | ND* | MUY BAJA | BAJA | ALTO |
| Batería NiCd | BAJA | ALTA | MEDIA | MEDIA | MEDIA | MUY BAJO | MUY BAJA | BAJA | MEDIO |

Figura 36. Comparación de las tecnologías de almacenamiento de energía.

Figura: <https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/>

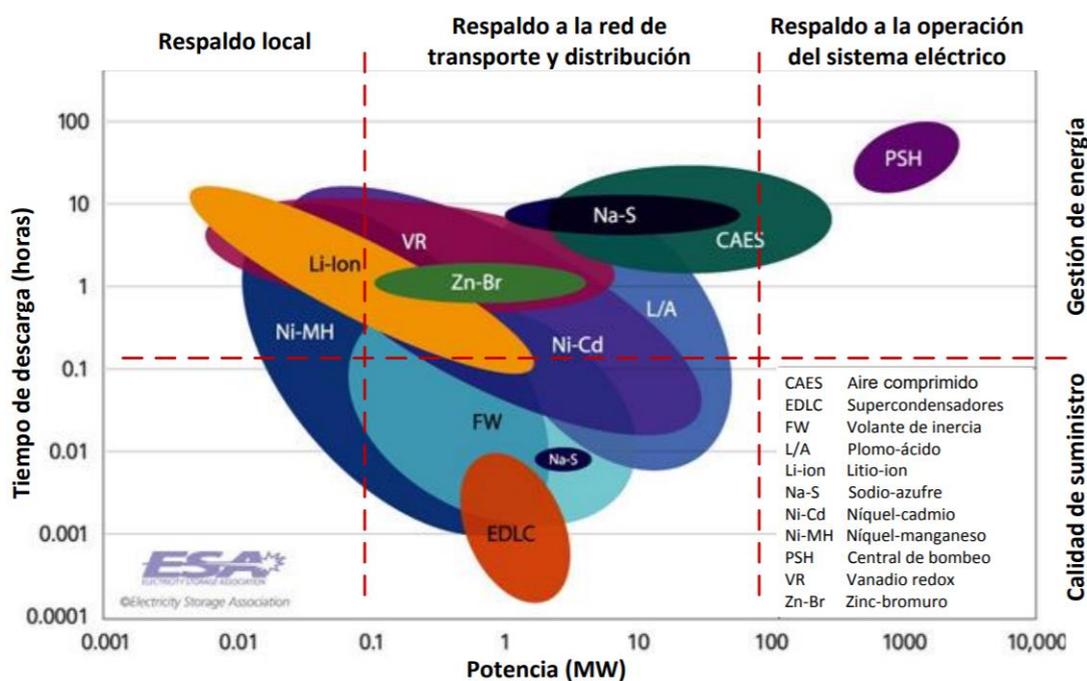


Figura 37. Comparación de las tecnologías de almacenamiento de energía.

Fuente: <http://www.funseam.com/>

4 Estructura de red y comunicaciones

En este capítulo se define primero la estructura existente hoy en día de red eléctrica, explicando brevemente el resto de los sistemas que entraran en juego en el concepto de Smart Grid, a parte la de generación y almacenamiento, explicados previamente.

En segundo lugar, se verá como son las comunicaciones utilizadas para interconectar, monitorizar y controlar todos los sistemas vistos.

4.1. Estructura de la red

Como se mencionaba en capítulos anteriores, la red fue concebida como un sistema unidireccional, pensado para transportar energía eléctrica de un punto a otro. Esta solución fue válida durante mucho tiempo, pero el creciente florecimiento de nuevas tecnologías y aumento de la demanda, sumado a una mayor conciencia ecológica y la necesidad de nuevas prestaciones, hizo cambiar paulatinamente la idea original de red hasta lo que hoy en día se conoce como red eléctrica [51,56].

Como también se explicó en capítulos precedentes, el objetivo de una Smart Grid es conseguir una red eléctrica completamente automatizada, que consiga altos niveles de seguridad y eficiencia, así como hacer de todo esto un proceso lo más económico posible.

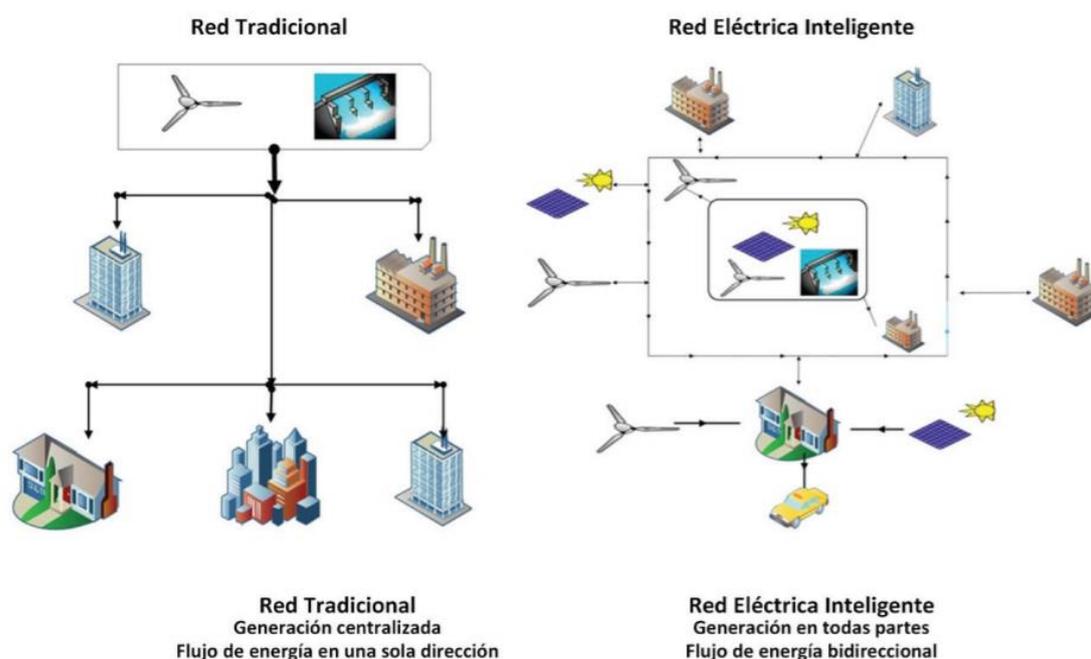


Figura 38. Diferencias entre la red eléctrica clásica y la Smart Grid.

Fuente: <http://www.revistaingenieria.unam.mx/>

4.1.1. Estructura física de transporte de energía

El motivo de utilizar corriente alterna para el transporte de electricidad, es su fácil escalado en voltaje. Esto permite hacer un transporte más eficiente de la electricidad. El inconveniente que presenta esto es que los niveles de voltaje con los que se transporta la electricidad hacen que sea inutilizable por los usuarios finales. Tampoco se produce electricidad con estos niveles de voltaje. Esto obliga a instalar distintos puntos donde se escala mediante transformadores la electricidad a los voltajes adecuados. En la siguiente figura se puede observar cómo varían los niveles de voltaje para su distribución.

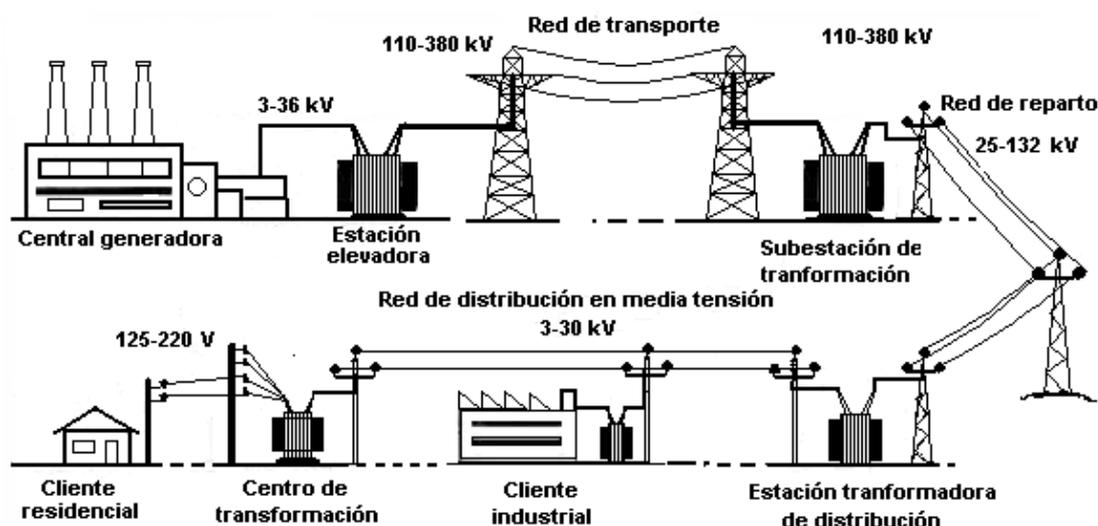


Figura 39. Escalado de voltajes para la distribución de electricidad.
Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

La razón principal para no usar los altos voltajes en centrales y en puntos de consumo es la seguridad, tanto de los equipos como de los consumidores.

4.1.2. Generación y almacenamiento

En el capítulo 3 se explican las diferentes tecnologías existentes para el almacenamiento y generación de energía eléctrica, pero en este caso, cabe destacar la introducción de un nuevo concepto. El término DER (*Distributed Energy Resources*) hace referencia a trasladar la generación de electricidad a la última etapa de la distribución.

Es decir, en vez de que existan grandes centrales de generación, las tecnologías explicadas permiten la generación a pequeña escala (generación distribuida), haciendo posible la generación cerca de los consumidores. Esto que conlleva un aumento de eficiencia y una disminución de coste.

En resumen, en cuanto a la generación, el problema que debe afrontar la Smart Grid no es solo la gestión de diversos grandes puntos de producción, si no que a eso ha de sumar gran cantidad de pequeños puntos de generación, a los que se han de añadir los puntos de almacenamiento a pequeña-mediana escala, también capaces de suministrar ciertas cantidades de energía en momentos determinados.

4.1.3. Monitorización y automatización de la red eléctrica

Es igual de importante tener una red monitorizada como automatizada para poder hacer una gestión eficiente de todos los recursos. En caso de tener una buena monitorización de las redes, pero una mala automatización de esta, se podrían ver necesidades e incidencias de esta en tiempo real, pero no se podría hacer nada como esta información si el tiempo de respuesta es muy elevado. Y viceversa, si existe un alto grado de automatización, pero no de monitorización, se podría dar una rápida respuesta, pero se desconocerían las necesidades e incidencias, por lo que no se sabría la respuesta que se tiene que dar.

4.1.3.1. Monitorización de la red eléctrica

Esta parte de la estructura de la red también es conocida como AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), infraestructura de medición avanzada. La monitorización de la red eléctrica se lleva a cabo mediante la superposición de la red eléctrica y una red de sensores. Dentro de estos, podemos distinguir dos categorías, los encargados de monitorizar el estado de la red, y los encargados de monitorizar los consumos [54].

→ Monitorización del estado de la red

Estos sensores están enfocados a poder tener una visión en tiempo real de la red completa, de tal manera que, en caso de existir cualquier incidencia, se pueda conocer prácticamente en el momento. Su función es transformar magnitudes físicas en señales eléctricas, que una vez procesadas se convierten en datos que nutren a las aplicaciones que dotaran de “inteligencia” a la red.

En este ámbito, presentan gran ventaja los sensores capaces de enviar sus mediciones de manera inalámbrica debido a su facilidad de instalación y por consiguiente bajo coste.

Los principales puntos que son monitorizados dentro de las redes de distribución de energía son los transformadores, grandes generadores, cables subterráneos y subestaciones. Esto se debe a que son puntos de gran importancia y alto coste para la red eléctrica. Además, en el caso de las subestaciones son muy importantes los interruptores y seccionadores los cuales permiten un control sobre la línea eléctrica.

Los principales sensores instalados son:

- FRA (*Frequency Response Analysis*): instalado en los transformadores de potencia, permite realizar una evaluación del estado de éste. El problema que presentan es que es necesario un descargo para poder realizar la evaluación.
- TOGA (Analizadores de gas del aceite del transformador): al igual que los FRA son utilizados para la evaluación del estado del transformador eléctrico, solo que en este caso presenta la ventaja de no ser necesario un descargo para la obtención de la evaluación. Además, estos analizadores permiten prevenir fallos ya que gracias a los datos aportados

puede saberse cuando un transformador está cerca de dar lugar a uno [52].

- PMU (*Phasor Measurement Units*): también conocidos como sincrofasores, en este caso son utilizados para monitorizar la red de transporte. Miden fasores de tensión y corriente, además, estas medidas contienen una marca de tiempo absoluto. Esto permite, midiendo en diferentes puntos de la red, tener un dato en tiempo real del estado de la red de transporte, pudiendo detectar puntos de la red no sincronizados. Permiten detectar con antelación y prevenir problemas en la red, dando información sobre si la red se encuentra cerca de sus límites operativos tanto térmicos como de estabilidad.

También se ha comentado que son muy importantes las subestaciones, y dentro de estas los seccionadores e interruptores, pero para la monitorización de estos se emplean principalmente técnicas de video por su sencillez y funcionalidad. Por otro lado, serán una de las partes más importantes en cuanto a la automatización de la red [61].

→ Monitorización del consumo

Aquí entra en juego una de las piezas claves de las redes eléctricas inteligentes, los contadores inteligentes o *Smart Meters*. Antiguamente un empleado de la compañía eléctrica tenía que ir recorriendo los contadores y apuntando manualmente el consumo. Este proceso resultaba muy lento y poco preciso. Debido a esto, la producción energética se hacía siguiendo modelos matemáticos creados a partir de la estadística y los datos históricos.

El no tener datos sobre el consumo instantáneo no permite administrar la energía de manera eficiente y pudiendo desembocar en pérdida de esta o incluso en los peores casos en desabastecimiento. Es decir, puede que existan momentos donde se produce de más y otros donde la producción es insuficiente, y como no se tiene el detalle del consumo en tiempo real, es muy difícil reaccionar.

El contador inteligente envía los datos en tiempo real un concentrador. El concentrador es el encargado de recopilar datos de todos los contadores inteligentes que tenga asociados y posteriormente transmitirlos al centro de control. También en el puente entre centro de control y los contadores para la tele gestión de los contadores. Posteriormente se verá cómo se realizan estas comunicaciones.

4.1.3.2. Automatización de la red eléctrica

En cuanto a las partes que se pueden automatizar dentro de la red destacan dos principalmente. Por un lado, como se ha visto antes, los seccionadores e interruptores de una subestación y los contadores inteligentes.

Tanto el seccionador como el interruptor tiene una función similar, la cual es separar físicamente redes, aunque son utilizadas en situaciones distintas. El seccionador por su parte es un elemento mecánico lento, sin protección al arco eléctrico, por lo cual debe

utilizarse sin carga en el circuito. Por otro lado, el interruptor es rápido y sí que cuenta con protección contra el arco eléctrico, lo que permite utilizarlo con carga en el circuito.

La parte de automatización con la que se dota a estos componentes es la capacidad de poder ser manejados desde el centro de control de la empresa propietaria de esa red. Esto sumado a que pueden ser monitorizados con simples cámaras de video, evita el desplazamiento de operarios a una subestación, dando como resultado respuestas casi en tiempo real.

En cuanto a los contadores inteligentes, cumplen otra función muy importante que es la tele gestión. Al disponer de módulo de comunicaciones pueden tanto enviar como recibir información. Esto permite actuar sobre ellos de manera remota, pudiendo cortar la electricidad que pasa por un contador en un momento determinado. Esto podría ser debido a un impago o a una saturación de la red.

4.1.4. SCADA

El sistema SCADA (Sistema de adquisición, supervisión y control de datos) es el encargado de la gestión de toda la información obtenida anteriormente. Además, es el encargado de interactuar con la red. Es una interfaz entre los sensores y actuadores de la red, y los operarios de esta, lo que se conoce como HMI (*Human Machine Interface*).

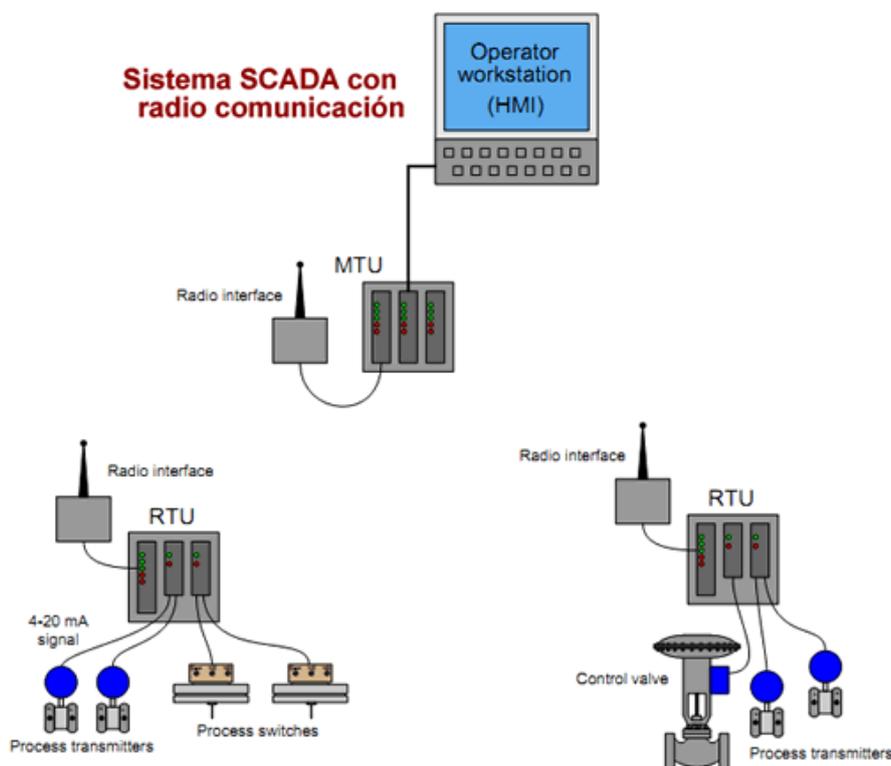


Figura 40. Ejemplo de un sistema SCADA.
Fuente: <https://instrumentacionycontrol.net/>

4.2. Comunicaciones

Como se ha podido observar en el punto previo la red está compuesta básicamente de elementos que suministran energía, otros que la transportan, otros que la consumen y algunas que la almacenan. Debido a los avances tecnológicos también existen elementos que pueden ser generadores, almacenadores y consumidores al mismo tiempo. También se ha presentado qué sistemas existen para poder monitorizar y actuar sobre todos estos elementos. En este punto se verá cómo se comunican entre si todos estos elementos para poder trabajar de manera conjunta.

Por un lado, está **el control de la oferta y la demanda de electricidad**. Esto depende de dos factores, un modelo estadístico realizado a partir de consumos históricos y diferentes variables aplicadas sobre el mismo, y los datos obtenidos de los contadores inteligentes sobre el consumo en tiempo real. Con esta información se ha de intentar generar la electricidad suficiente para abastecer a todos los clientes y además no generar en exceso mediante métodos contaminantes (capítulo 3) para reducir al máximo posible las emisiones. Como se ha visto, producir en exceso con fuentes limpias no supone un problema si se cuenta con elementos capaces de almacenar energía, si no se dispone de este tipo de elementos se está desperdiciando.

Por otro lado, una vez se conoce cuanta energía se va a generar, ésta se ha de distribuir y hacer llegar a los clientes. Para ello, se ha de trabajar sobre la red para hacer llegar la energía a todos los puntos de la red, asegurando la mejor calidad de suministro posible.

Se ha de recordar, que los principales objetivos de una Smart Grid son la eficiencia y la seguridad. Estos dos puntos se ven muy bien reflejados en los puntos anteriores. Eficiencia al generar la energía justa y necesaria y seguridad dando una calidad de suministro lo más alta posible.

A continuación, se van a presentar los principales métodos de comunicación entre los diferentes elementos para lograr lo mencionado con anterioridad. Primero se va a explicar las diferentes redes que existen para estas aplicaciones y después, los principales protocolos usados en estas redes.

4.2.1. Estructura de las redes de comunicación

Es importante remarcar las diferentes estructuras utilizadas para las comunicaciones en las Smart Grid ya que dependiendo del tipo de estructura se utilizarán unas tecnologías y protocolos u otros.

Se pueden destacar tres tipos diferentes de estructura de red:

- WAN: *Wide Area Network*.
- NAN: *Neighbourhood Area Network*.
- HAN: *Home Area Network*.

Estas denominaciones pueden variar dependiendo de la fuente utilizada, pero será la utilizada de aquí en adelante. En las siguientes figuras podemos ver más en detalle a que se hace referencia con estas denominaciones de estructura de red [85,90].

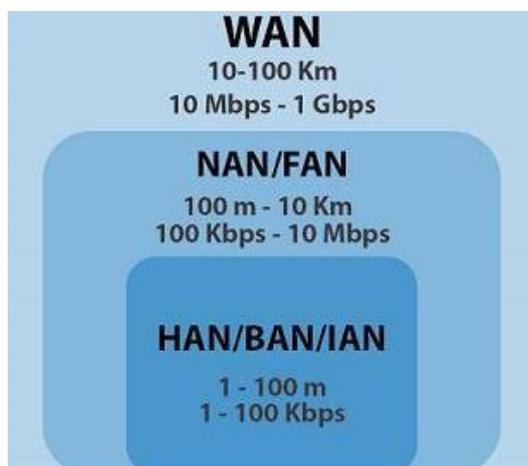


Figura 41. Estructuras de red WAN, NAN y HAN con detalles.
Fuente: <https://www.researchgate.net/f>

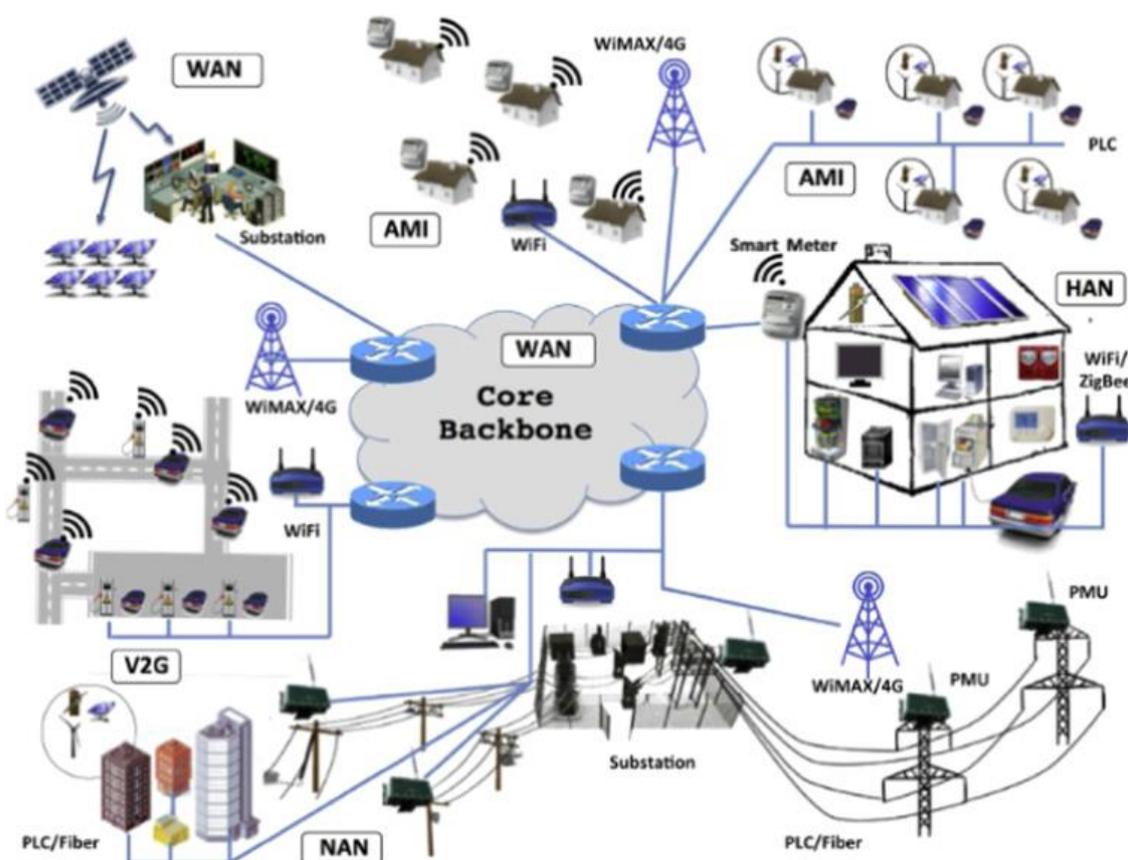


Figura 42. Estructura de red de comunicaciones superpuesta a red eléctrica.
Fuente: <https://www.sciencedirect.com/>

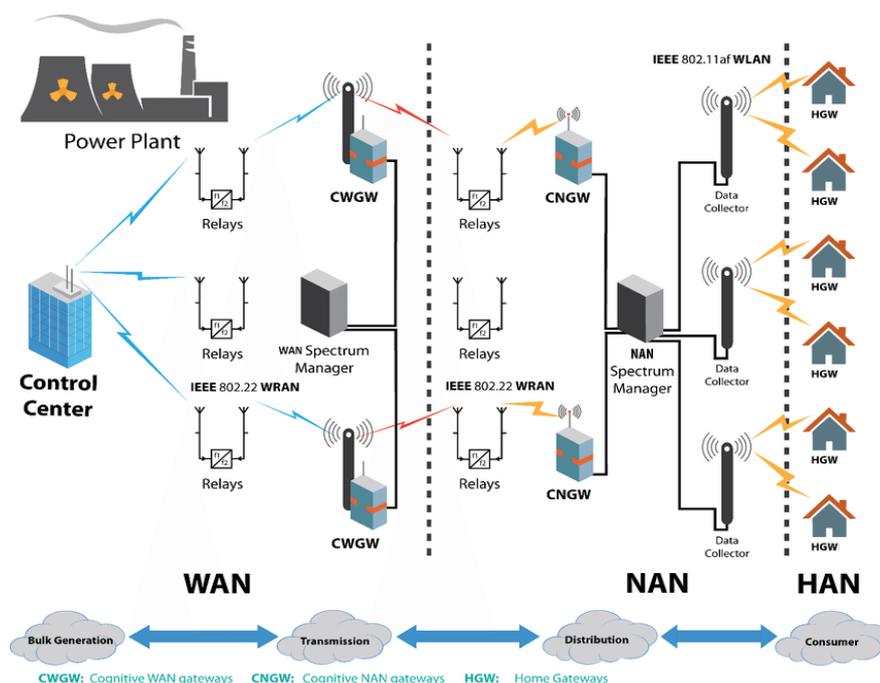


Figura 43. Estructura de red de comunicaciones de una Smart Grid.

Fuente: <https://www.researchgate.net/>

Como se puede ver en las figuras anteriores HAN hace referencia al primer nivel, donde encontramos redes muy pequeñas que serían capaces de comunicar entornos muy reducidos y con poco volumen de datos. Las HAN, en el caso de edificios, principalmente están formadas por contadores inteligentes y otros sensores que se pueden incluir junto con estos, también pueden ser utilizadas a nivel interno de subestaciones, para incluir e intercomunicar todos los dispositivos presentes en esta. Cuando subimos de nivel, encontramos la NAN, que como es lógico deberá comunicar distancias más largas y al recopilar datos de diversas HAN, tendrá un mayor volumen de estos. A este nivel se encuentran los concentradores. Por último, en el nivel más alto, encontramos la WAN, la cual será responsable de conectar todas las NAN y HAN y además concentrar toda la información para su utilización. Como se podría esperar esta es la que contempla mayores distancias y volúmenes de datos más grandes. En la WAN se encuentra normalmente el centro de control.

4.2.1.1. Seguridad

Viendo la estructura de red creada para las comunicaciones se puede observar que tiene gran similitud con la red de internet o telefonía que se usa hoy en día. Más adelante veremos que tanto los equipos como los protocolos utilizados son muy similares en las redes normales y en las utilizadas para ámbitos industriales. Esto generalmente podría inducir al error de creer que esta red podría montarse conjuntamente a una red común utilizada por una empresa para alojar su información o aplicaciones donde existen fuertes interconexiones con redes externas o públicas, además de salidas a internet.

Por el contrario, estas redes han de ser lo más estancas posibles, no compartiendo ni equipos, ni capa física con el resto de las redes, ni siquiera las propias de la empresa dueña de los sistemas.

Esto es lo que se conoce como red IT (*Information technology*) y red OT (*Operational technology*). La red IT dentro de una empresa industrial, sería la relacionada con todos los aspectos tanto de funcionalidad de día a día de los empleados (información, correos, aplicaciones...) la cual sí que tendría una fuerte interconexión con internet, y por otro lado, la red OT que debería ser una red lo más aislada posible, única y exclusivamente dedicada a las comunicaciones entre elementos de la red.

De no ser así, la red OT sería vulnerable, y algo como la red eléctrica está considerado como infraestructura crítica. Esto quiere decir que en el caso de sufrir algún incidente o ataque importante podría desencadenar en grandes problemas. Por ejemplo, la pérdida de electricidad en un hospital podría incluso degenerar en la pérdida de vidas humanas.

Por todo ello es muy importante blindar la red OT, haciendo que tenga muy pocos accesos y muy controlados. Ya que como mencionábamos, al usar protocolos y equipos similares a los de una red IT, es vulnerable a ciber-ataques.

Es inevitable que ambas redes estén conectadas ya que es necesario para poder trabajar sobre la red OT, pero no es posible que ambas redes sean simplemente una.

Integrated Solutions for OT/IT Security

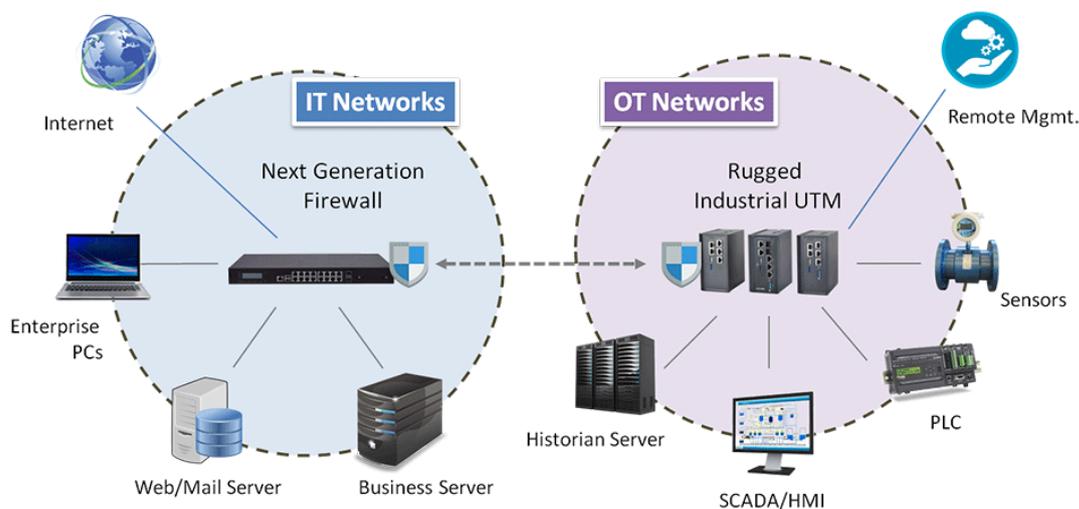


Figura 44. Estructura de las redes IT y OT para mayor seguridad.
Fuente: <https://www.lanner-america.com/>

4.2.2. Tecnologías de comunicación y medios de transmisión

El hecho de que existan diferentes estructuras y configuraciones de red hace imprescindible que se utilicen diversas tecnologías en la capa física dependiendo de las necesidades de comunicación.

De aquí en adelante se hará referencia, tanto hablando de tecnologías como de protocolos, a los diferentes niveles o capas de la pila OSI. La pila OSI (*Open System Interconnection*) es el modelo de interconexión utilizado como estándar desde que fue aprobado en 1984. La mayoría de los sistemas son definibles mediante este modelo.

La capa física hace referencia a la última de las capas de la pila OSI. Es, como su nombre indica, el medio físico o de transmisión por el cual se establece la comunicación [62,66].



Figura 45. Esquema de las diferentes capas de la pila OSI. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

En las Smart Grid, para el control y monitorización de los sistemas vistos con anterioridad, las principales tecnologías utilizadas en la capa física pueden ser de dos tipos, mediante cable, o mediante enlace inalámbrico [57].

4.2.2.1. Medios de transmisión guiados

→ Fibra óptica

La fibra óptica es normalmente utilizada cuando las distancias son superiores a los 100 metros. Está compuesta de vidrio o diversos materiales plásticos. Las principales ventajas de la fibra son el gran volumen de datos que puede transmitir y su propagación de información en forma de luz, lo que hace que no se vea afectado por el ruido eléctrico, pudiendo ser montado cerca de puntos de la red donde este es muy alto.

La fibra puede ser de dos tipos, multimodo o monomodo, dependiendo de las distancias que se deseen abarcar. En el caso de utilizar fibra multimodo las distancias de línea pueden alcanzar los 2 kilómetros, mientras que, en el caso de la fibra monomodo, las distancias pueden llegar a ser incluso de 100 kilómetros si se combina con láseres de alta intensidad [63].

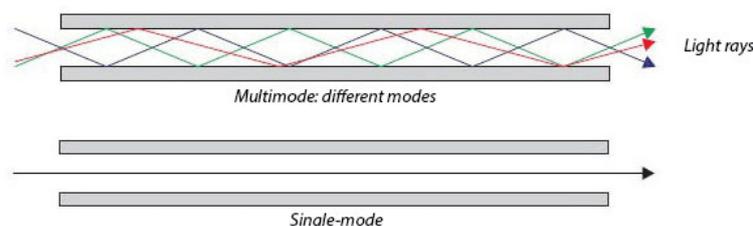


Figura 46. Diferencias entre la fibra óptica multimodo y monomodo. Fuente: <https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo>

En las siguientes tablas se puede observar las diferencias de transmisión de la fibra monomodo y la fibra multimodo.

| FIBRA MULTIMODO | | | | |
|--|------------------|-------------------|---|---|
| Tipo de cable | Longitud de onda | Atenuación máxima | Longitud de ancho de banda modal mínimo | Longitud de ancho de banda modal efectivo |
| Fibra Multimodo OM1 62,5 / 125 micras | 850 nm | 3,5 dB/km | 200 MHz-km | No requerido |
| | 1300 nm | 1,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |
| Fibra Multimodo OM2 50 / 125 micras | 850 nm | 3,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |
| | 1300 nm | 1,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |
| Fibra Multimodo OM3 50 / 125 micras | 850 nm | 3,0 dB/km | 1500 MHz-km | 2000 MHz-km |
| | 1300 nm | 1,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |
| Fibra Multimodo OM4 50 / 125 micras | 850 nm | 3,0 dB/km | 3500 MHz-km | 4700 MHz-km |
| | 1300 nm | 1,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |
| Fibra Multimodo OM5 50 / 125 micras | 850 nm | 3,0 dB/km | 3500 MHz-km | 4700 MHz-km |
| | 953 nm | 2,3 dB/km | 1850 MHz-km | 2470 MHz-km |
| | 1300 nm | 1,5 dB/km | 500 MHz-km | No requerido |

Figura 47. Valores característicos de la fibra óptica multimodo.

Fuente: <https://www.blackbox.com.mx/>

| FIBRA MONOMODO | | | | |
|-------------------------------|------------------|-------------------|---|---|
| Tipo de cable | Longitud de onda | Atenuación máxima | Longitud de ancho de banda modal mínimo | Longitud de ancho de banda modal efectivo |
| Monomodo Interior-Exterior | 1310 nm | 0,5 dB/km | ND | ND |
| | 1383 nm | 0,5 dB/km | ND | ND |
| | 1550 nm | 0,5 dB/km | ND | ND |
| Monomodo Interiores | 1310 nm | 1,0 dB/km | ND | ND |
| | 1383 nm | 1,0 dB/km | ND | ND |
| | 1550 nm | 1,0 dB/km | ND | ND |
| Monomodo Exteriores | 1310 nm | 0,4 dB/km | ND | ND |
| | 1383 nm | 0,4 dB/km | ND | ND |
| | 1550 nm | 0,4 dB/km | ND | ND |

Figura 48. Valores característicos de la fibra óptica monomodo.

Fuente: <https://www.blackbox.com.mx/>

El dato más significativo que se puede extraer de las tablas anteriores es la atenuación máxima. Se puede observar que la atenuación máxima de la fibra monomodo es mucho menor que la de la fibra multimodo, lo que facilita comunicaciones a larga distancia utilizando la fibra monomodo. La fibra se utiliza principalmente con Ethernet.

→ PLC (*Power Line Communications*)

La comunicación mediante PLC utiliza el tendido eléctrico como medio de transmisión para las comunicaciones. Para ello se superpone a la señal de la red eléctrica, la cual va a 50 Hz, la señal de comunicaciones que puede oscilar entre 1,6 y 30 MHz y posee niveles de energía muy bajos. Los cables utilizados para la transmisión eléctrica suelen ser un único cable de cobre [64].

En general el PLC es una mala solución de comunicaciones debido a las variaciones de impedancia de la línea, las atenuaciones con la frecuencia y el elevado ruido. Sin embargo, para la retransmisión de poca información en los tramos de baja tensión de la

red eléctrica, resulta muy ventajoso ya que se utiliza la misma infraestructura eléctrica, lo que evita tener montar otra estructura de comunicaciones en paralelo, resultando así muy económico.

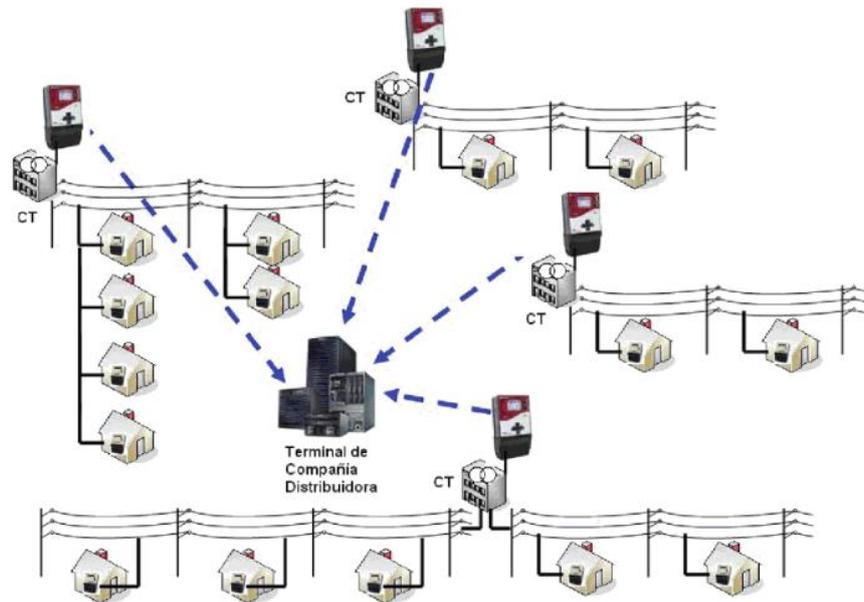


Figura 49. Esquema general de comunicaciones utilizando PLC.

Fuente: J. Autonell (2011) et al. Eficiencia en el uso de la energía eléctrica (1st ed.).

→ Par trenzado

El par trenzado representa una muy buena opción para distancias cortas y medias, aunque en comparación con la fibra óptica y el PLC es menos utilizado. Consiste en dos hilos de cobre trenzados. Se compone de dos hilos trenzados para dotar de a las señales de mayor robustez, evitando interferencias de hilos cercanos. Puede sustituir al PLC en situaciones concretas. Se utiliza principalmente con Ethernet. Un cable formado por varios cables de par trenzado se denomina UTP.

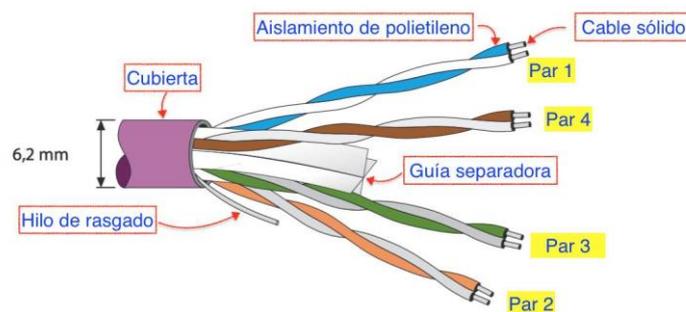


Figura 50. Cable UTP.

Fuente: <https://ingtelecomdecena.blogspot.com/>

→ Cable coaxial

El cable coaxial es un cable compuesto por dos conductores separados por un medio aislante entre ambos. El nombre coaxial hace referencia a la disposición de los conductores.

La estructura típica de este tipo de cables se compone de un núcleo de cobre, el aislante y una malla o red metálica concéntrica al aislante. La malla hace de aislante del ruido exterior, sirve para dotar de robustez la señal.

Al igual que ocurre con el par trenzado, representa una solución para cortas-medias distancias y se implementa principalmente con ethernet [70].

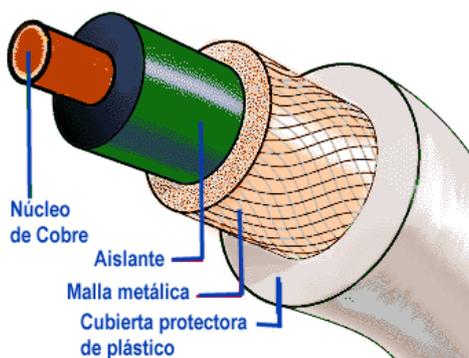


Figura 51. Estructura del cable coaxial.
Fuente: <https://elcajondeelectronico.com/>

4.2.2.2. Medios de transmisión inalámbricos

Cuando se utilizan conexiones inalámbricas, lo que se hace es transmitir información mediante ondas electromagnéticas que usan como medio físico para su transmisión el aire principalmente. Las diferentes tecnologías que se presentarán a continuación representan diferentes maneras de transmitir mediante esta emisión de radiación, por ello cabe hacer un pequeño hincapié en las diferentes ondas que podemos encontrar. Para ello se puede ver en la siguiente imagen los diferentes tipos de ondas del espectro electromagnético utilizadas en comunicaciones [67-69,82,83].

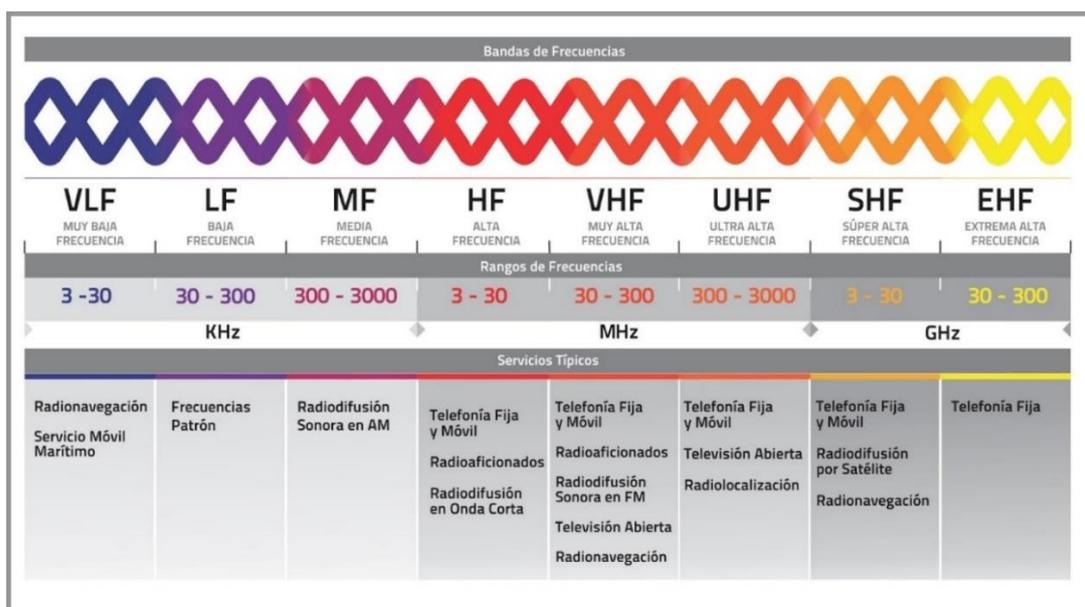


Figura 52. Espectro electromagnético de comunicaciones.
Fuente: <http://telematicasamigas.blogspot.com/>

Lo que sucede con la transmisión inalámbrica es que a mayor frecuencia menos atenuación presenta la señal. Es decir, cuanto mayor distancia tenga que recorrer la señal, más frecuencia será necesaria.

Como se ha mencionado antes, normalmente estas ondas se transmiten por el aire, pero esto añade dos problemas a las transmisiones:

- A diferencia de las comunicaciones por cable, el medio de estas transmisiones puede cambiar, encontrándose por ejemplo con obstáculos como paredes.
- El aire es susceptible de cambios debido a la climatología, representa un entorno de transmisión variable

| BANDA | SÍMBOLO | FRECUENCIA | LONGITUD DE ONDA | ENERGÍA | NOMENCLATURA | ABREV. |
|-------|-------------------------------|--|---|--|-------------------|--------|
| -1 | | $0,03 \text{ Hz} < f \leq 0,3 \text{ Hz}$ | $1 \text{ Gm} \leq \lambda < 10 \text{ Gm}$ | $124 \text{ aeV} < E \leq 1,24 \text{ feV}$ | Gigamétricas | B.Gm |
| 0 | ELF (<i>Extremely Low</i>) | $0,3 \text{ Hz} < f \leq 3 \text{ Hz}$ | $100 \text{ Mm} \leq \lambda < 1 \text{ Gm}$ | $1,24 \text{ feV} < E \leq 12,4 \text{ feV}$ | Hectomegamétricas | B.hMm |
| 1 | | $3 \text{ Hz} < f \leq 30 \text{ Hz}$ | $10 \text{ Mm} \leq \lambda < 100 \text{ Mm}$ | $12,4 \text{ feV} < E \leq 124 \text{ feV}$ | Decamegamétricas | B.daMm |
| 2 | SLF (<i>Super Low</i>) | $30 \text{ Hz} < f \leq 300 \text{ Hz}$ | $1 \text{ Mm} \leq \lambda < 10 \text{ Mm}$ | $124 \text{ feV} < E \leq 1,24 \text{ peV}$ | Megamétricas | B.Mm |
| 3 | ULF (<i>Ultra Low</i>) | $300 \text{ Hz} < f \leq 3.000 \text{ Hz}$ | $100 \text{ km} \leq \lambda < 1 \text{ Mm}$ | $1,24 \text{ peV} < E \leq 12,4 \text{ peV}$ | Hectokilométricas | B.hkm |
| 4 | VLf (<i>Very Low</i>) | $3 \text{ kHz} < f \leq 30 \text{ kHz}$ | $10 \text{ km} \leq \lambda < 100 \text{ km}$ | $12,4 \text{ peV} < E \leq 124 \text{ peV}$ | Miriamétricas | B.Mam |
| 5 | LF (<i>Low</i>) | $30 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ kHz}$ | $1 \text{ km} \leq \lambda < 10 \text{ km}$ | $124 \text{ peV} < E \leq 1,24 \text{ neV}$ | Kilométricas | B.km |
| 6 | MF (<i>Medium</i>) | $300 \text{ kHz} < f \leq 3.000 \text{ kHz}$ | $100 \text{ m} \leq \lambda < 1 \text{ km}$ | $1,24 \text{ neV} < E \leq 12,4 \text{ neV}$ | Hectométricas | B.hm |
| 7 | HF (<i>High</i>) | $3 \text{ MHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$ | $10 \text{ m} \leq \lambda < 100 \text{ m}$ | $12,4 \text{ neV} < E \leq 124 \text{ neV}$ | Decamétricas | B.dam |
| 8 | VHF (<i>Very High</i>) | $30 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$ | $1 \text{ m} \leq \lambda < 10 \text{ m}$ | $124 \text{ neV} < E \leq 1,24 \text{ ueV}$ | Métricas | B.m |
| 9 | UHF (<i>Ultra High</i>) | $300 \text{ MHz} < f \leq 3.000 \text{ MHz}$ | $100 \text{ mm} \leq \lambda < 1 \text{ m}$ | $1,24 \text{ ueV} < E \leq 12,4 \text{ ueV}$ | Decimétricas | B.dm |
| 10 | SHF (<i>Super High</i>) | $3 \text{ GHz} < f \leq 30 \text{ GHz}$ | $10 \text{ mm} \leq \lambda < 100 \text{ mm}$ | $12,4 \text{ ueV} < E \leq 124 \text{ ueV}$ | Centimétricas | B.cm |
| 11 | EHF (<i>Extremely High</i>) | $30 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$ | $1 \text{ mm} \leq \lambda < 10 \text{ mm}$ | $124 \text{ ueV} < E \leq 1,24 \text{ meV}$ | Milimétricas | B.mm |
| 12 | | $300 < f \leq 3000 \text{ GHz}$ | $100 \text{ } \mu\text{m} \leq \lambda < 1 \text{ mm}$ | $1,24 \text{ meV} < E \leq 12,4 \text{ meV}$ | Decimilimétricas | B.dmm |
| 13 | | $3 < f \leq 30 \text{ THz}$ | $10 \text{ } \mu\text{m} \leq \lambda < 100 \text{ } \mu\text{m}$ | $12,4 \text{ meV} < E \leq 124 \text{ meV}$ | Centimilimétricas | B.cmm |
| 14 | | $30 < f \leq 300 \text{ THz}$ | $1 \text{ } \mu\text{m} \leq \lambda < 10 \text{ } \mu\text{m}$ | $124 \text{ meV} < E \leq 1,24 \text{ eV}$ | Micrométricas | B.μm |
| 15 | | $300 < f \leq 3000 \text{ THz}$ | $100 \text{ nm} \leq \lambda < 1 \text{ } \mu\text{m}$ | $1,24 \text{ eV} < E \leq 12,4 \text{ eV}$ | Decimicrométricas | B.dμm |

Figura 53. Nomenclatura y características de las bandas de frecuencia.

Fuente: <https://www.acta.es/>

Por otro lado, a frecuencias bajas, el espectro disponible para las comunicaciones es mucho mejor, lo que representa tasas de transmisión muy pequeñas.

Debido a esto existen varias formas de realizar las comunicaciones utilizando ondas electromagnéticas dependiendo del tipo de propagación a utilizar.

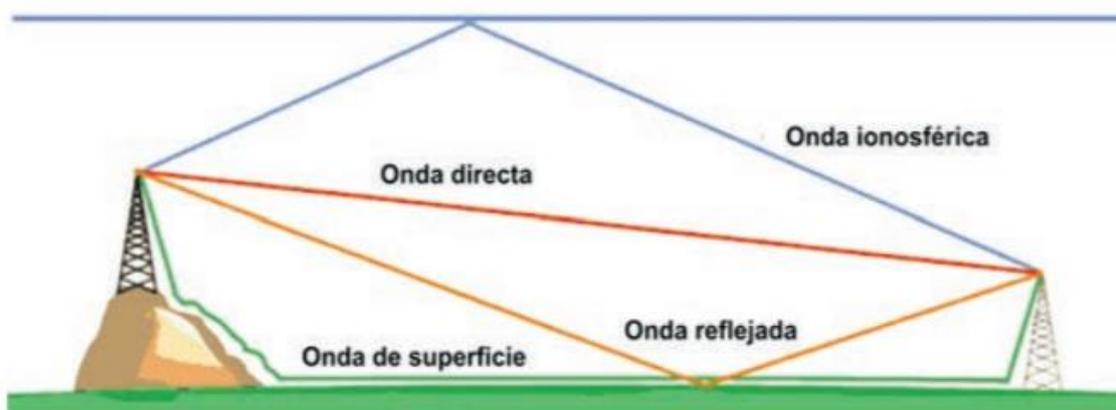


Figura 54. Tipos de onda según propagación.

Fuente: <https://www.acta.es/>

- Onda superficie

Se utiliza para la transmisión por debajo de 30 MHz y largo alcances. En este tipo de transmisiones la topología del terreno influye muy notablemente en la propagación. Este tipo de transmisión proporciona gran estabilidad.

- Onda ionosférica

Se utiliza para frecuencias entre los 3 MHz y los 30 MHz. Consiste en reflejar la onda en la ionosfera, que es la capa de la atmosfera de que se encuentra ionizada. Este tipo de transmisión es utilizada para largas distancias, pero en contraposición tiene cierto grado de inestabilidad en las señales.

- Onda espacial

Se utiliza para frecuencias superiores a los 30 MHz. Se realiza utilizando las capas bajas de la atmosfera, la troposfera, pudiendo a veces llegar a tocar suelo la señal. Proporciona una onda estable, aunque su alcance está limitado al campo de visión del emisor de la señal. Se pueden encontrar dentro de la onda espacial 3 submundos.

- Onda directa: enlace directo entre transmisor y receptor.
- Onda reflejada: el receptor y el transmisor se conectan a través de una reflexión en el terreno.
- Onda multiproyecto: el transmisor y el receptor se conectan por medio de varias reflexiones que tienen lugar en las fronteras de los estratos troposféricos.

→ WIFI

La tecnología WiFi utiliza ondas de radio para la transmisión de información. Se usan las bandas de 2,4 GHz y de 5 GHz, dependiendo del estándar utilizado. Es posible transmitir en ambas bandas a la vez y saltar entre ellas [71,75,76].

- 802.11a: Estándar para la transmisión a 5 GHz y hasta 54 megabits por segundo, utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). Lo que ocurre es que al trabajar con anchos de banda de 5MHz, las señales se ven muy atenuadas con la distancia, por lo que para poder disponer de toda la velocidad, transmisor y receptor deberían estar muy cerca.
- 802.11b: Es el estándar más lento de todos, utiliza la banda de 2,4 GHz y puede llegar a velocidades de hasta 11 megabits por segundo. En este caso, el ancho de banda disponible es de 22 MHz divididos en 5 canales de 5 MHz.

- 802.11g: Estándar de transmisión a 2,4 GHz, pero en este caso puede llegar a transmitir hasta a 54 megabits por segundo. Su velocidad se ve incrementada debido a que usa la misma modulación que el 802.11a, la OFDM.
- 802.11n: En este caso, con este estándar, la velocidad puede llegar hasta los 140 megabits por segundo. Con este estándar se puede hacer un uso simultaneo de las bandas de 2,4 GHz y de 5 GHz.

Normalmente esta tecnología la encontramos integrada en las HAN dentro de las Smart Grid. Es muy utilizada cuando lo que se desean comunicar son diferentes elementos cómo podrían ser de almacenaje o producción de energía para una gestión de la energía a nivel muy localizado. También podemos encontrarla en algunas WAN sustituyendo al PLC, aunque esto es menos común.

| | 802.11 legacy | 802.11b | 802.11a | 802.11g | 802.11n |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Banda | 2.4Ghz / 850-950nm | 2.4GHz | 5Ghz | 2.4GHz | 2.4GHz / 5GHz |
| Capa física | FHSS / DSSS / IR | DSSS | OFDM | DSSS / OFDM | MIMO / OFDM |
| | GFSK / DPSK | DPSK sin/con CCK o PBCC | PSK / QAM | DPSK / PSK / QAM | |
| Tasa máxima | 2 Mbps | 11Mbps | 54 Mbps | 54 Mbps | 600 Mbps |
| Throughput (*) | 0.9 Mbps | 4.5 Mbps | 23 Mbps | 20 Mbps | 135 Mbps |
| Alcance interior (*) | 20m | 40m | 35m | 40m | 70m |
| Alcance exterior (*) | 100m | 150m | 120m | 150m | 300m |
| Año | 1997 | 1999 | 1999 | 2003 | 2008 |
| Uso | En desuso | Muy extendido | Poco extendido | Extendido y creciente | En desarrollo |
| Rendimiento | Buen rendimiento | Rendimiento medio | Mejor rendimiento | Rendimiento medio | Máximo rendimiento |
| Consumo | Bajo consumo | Bajo consumo | Mayor consumo | Bajo consumo | |
| Canales sin solapamiento | No | 3 canales simultáneos | 12 canales simultáneos | | |
| Compatibilidad | | Incompatible con 802.11a | Incompatible con 802.11b | Compatible con 802.11b | Compatible con todos |
| Interferencias | Bluetooth, microondas, DECT, ... | | | Bluetooth, microondas, ... | |
| Otras | | | Necesita licencia en algunos países | | |

Figura 55. Propiedades del IEEE 802.11.

Fuente: <http://biring.us.es/>

→ WiMax

WiMax al igual que WiFi, se encuentra bajo el estándar IEEE 802.11, en este caso concretamente bajo el IEEE 802.11.16. Para el caso de WiMax, las bandas van desde los 2 GHz hasta los 66 GHz, esto permite distancia de transmisión de datos muy superiores a WiFi, pudiendo incluso a alcanzar distancias de hasta 45 kilómetros [72,77].

Si bien WiFi, no representaban una alternativa para niveles WAN, WiMax es integrable es este nivel y muy apropiado para zonas remotas donde las instalaciones de cable son complicadas.

| | 802.16 | 802.16a | 802.16e |
|------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| Espectro | 10 - 66 GHz | < 11 GHz | < 6 GHz |
| Funcionamiento | Solo con visión directa | Sin visión directa (NLOS) | Sin visión directa (NLOS) |
| Tasa de bit | 32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz | Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz | Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz |
| Modulación | QPSK, 16QAM y 64 QAM | OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM | Igual que 802.16a |
| Movilidad | Sistema fijo | Sistema fijo | Movilidad pedestre |
| Anchos de banda | 20, 25 y 28 MHz | Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz | Igual que 802.16a con los canales de subida para ahorrar potencia |
| Radio de celda típico | 2 - 5 km aprox. | 5 - 10 km aprox. (alcance máximo de unos 50 km) | 2 - 5 km aprox. |

Figura 56. Propiedades del IEEE 802.16.

Fuente: <http://bibing.us.es/>

→ GPRS

Como se ha referenciado en diferentes ocasiones, las redes OT se nutren de las tecnologías de IT, de las cuales las utilizadas para la telefonía móvil están muy presentes para las conexiones NAN y WAN. Ofrecen buenas alternativas al PLC y a la fibra óptica, ahorrándose la necesidad de instalaciones de cable. Permiten conexiones alargadas distancias [78-81].

Las siglas de GPRS hacen referencia a *General Packet Radio Service*, que es una tecnología para la transmisión de paquetes de información vía radio, es decir la red de telecomunicaciones de telefonía (GSM o *Global System Mobile Communications*).

La tecnología GPRS fue la precursora tanto del 3G como del 4G para el acceso a internet desde los terminales móviles (tecnologías también utilizadas que se verán más adelante). Ofrece velocidad o capacidades relativamente bajas, de entre 56 kbps y 114 kbps. En Europa se utilizan las bandas de 900MHz y la de 1800MHz, estándares de la GSM.

→ 3G (UMTS)

Se conoce comercialmente como 3G por ser la tercera generación o evolución en el ámbito de la telefonía móvil. En esta escala la transmisión por GSM correspondería a la 2G (segunda generación) y la GPRS a la 2.5G.

Las siglas UMTS hacen referencia a *Universal Mobile Telecommunication System*. El propósito de esta evolución era poder conseguir una mayor velocidad de transmisión, capaz de adaptar los teléfonos a las necesidades del creciente internet. En esta generación se consiguen velocidades de entre 2 Mbps y 5 Mbps, muy superiores a las encontradas vía GPRS [84].

UMTS sigue el estándar IMT-2000 (*Internacional Mobile Telecommunications*), el cual se definió como un estándar abierto internacional. Este incorpora además de la radio terrestre, comunicaciones satelitales. Se utiliza la banda de 1.8 GHz a 2.2 GHz, y portadoras de 5MHz.

La revolución viene dada porque se pasa del uso de GSM a WCDMA, lo que supone una infraestructura prácticamente nueva.

→ 4G

El 4G supone la última evolución de la tecnología móvil. Al igual que en los dos casos anteriores, respecto a sus predecesores, el cambio más importante es la cantidad de datos que estas tecnologías pueden transportar. En el caso de las redes 4G se pueden alcanzar incluso velocidades máximas de 100 MBps. En este caso la banda va desde los 2 GHz hasta los 8 GHz.

En este caso los tamaños de los canales utilizado son variables y desde los 1,25MHz hasta los 20 MHz, utilizando OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), lo que minimiza las interferencias.

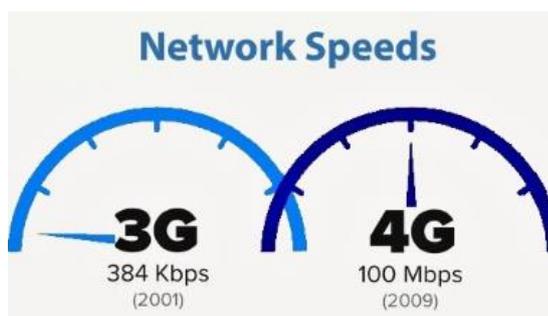


Figura 57. Diferencia de velocidades entre 3G y 4G.

Fuente: <https://www.sicomtesting.com/>

→ Satélite

Por último, se encuentran las comunicaciones vía satélite. Resulta especialmente interesante este tipo de comunicación en entornos donde la infraestructura de comunicaciones es pobre, por ejemplo, en zonas rurales o deshabitadas [87,88].

Todas las tecnologías anteriormente vistas, presentan una buena solución por que en cierta manera se nutren de otro tipo de instalaciones. Sin embargo, si se tiene en cuenta que las comunicaciones de GPRS, 3G y 4G utilizan normalmente las infraestructuras construidas para las comunicaciones comerciales, si en ciertos puntos no existe cobertura, es posible que una instalación satelital sea más económica. Al igual que la fibra óptica y el resto de diferentes tecnologías inalámbricas, si no se dispone de cierta infraestructura previa, puede ser que las comunicaciones satelitales sean más propicias.

Si bien es cierto que la tecnología asociada a las comunicaciones satelitales ha avanzado mucho en los últimos años, sigue suponiendo una solución de precio elevado y no muy altas prestaciones, ofreciendo como muchas velocidades de hasta 1.5 MBps. La principal

ventaja de este tipo de comunicaciones es que pueden dar servicio casi en cualquier lugar.

| Key feature | Sub feature | Key differentiating properties | AMI backhaul | Remote generation plants | T&D monitoring | Remote substations and distribution automation | Video surveillance | Mobile Workforce |
|-------------------------|----------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|----------------|--|--------------------|------------------|
| Orbits | GEO | Large and stationary footprint | + | + | o | o | + | - |
| | MEO | Medium footprint and delay | o | o | o | o | o | - |
| | LEO | Lower delay and pointing req. | o | o | + | + | o | + |
| | Nanosatellites | Cheap but poorly reliable | o | + | o | - | - | o |
| Physical layer features | Low bands | Lower data rate, more reliable | o | o | o | o | - | + |
| | High bands | Higher data rate, less reliable | + | + | o | o | + | - |
| | Dual band | Best reliability but expensive | o | o | + | + | - | o |
| | ACM | Adaptive to weather | o | o | o | o | + | + |
| Channel Management | FA | QoS guarantee | o | o | + | + | + | - |
| | DAMA | Variable traffic, high data rate | + | o | o | o | o | + |
| | RA | Best effort | - | + | - | - | - | o |

Figura 58. Comunicaciones vía satélite en Smart Grids.
Fuente: <http://sites.unica.it/>

Agrupando todas las tecnologías anteriores, tendríamos las principales utilizadas para las comunicaciones dentro de lo que hoy en día es un Smart Grid. **Encontramos muy extendido el uso de comunicaciones basadas en telefonía móvil, ya que al igual que sucede con el PLC, la infraestructura está altamente extendida, lo que a nivel económico supone grandes ventajas. Sin embargo, cabrían destacar principalmente WiMax como medio inalámbrico y la fibra óptica como medio físico.** Estas dos tecnologías suponen un muy buen equilibrio entre capacidades y distancias de propagación.

4.2.3. Protocolos de comunicaciones

En este punto se presentarán los principales protocolos de comunicaciones utilizados en las Smart Grids. Por un lado, se verán primero los **protocolos utilizados para el control y actuación sobre la red**, es decir los que se utilizan para la automatización de esta, los cuales son principalmente **IEC101, IEC104, Modbus y DNP3**. Por otro lado, en segundo lugar, se verán aquellos enfocados a la **recogida de información**, los cuales son mayoritariamente **DMLS/COSEM, PRIME, M&M, G3 y OSGP**. Por último, se verán dos protocolos que se utilizan para poder interconectar o como soporte para los vistos hasta ese punto. Principalmente se usan para complementar las capas físicas presentadas en el punto anterior. Estos son ZigBee y Ethernet.

4.2.3.1. IEC101

Es un protocolo destinado a la monitorización de sistemas de energía, sistemas de control y comunicaciones asociadas para el telecontrol, teleprotección y telecomunicación. Su nombre completo sería IEC 6087-5-101. Es decir, estaría recogido bajo los estándares definidos por IEC 6087-5 [99].

Por su parte, el IEC101 tiene compatibilidad con los estándares IEC 60870-5-1 y IEC 60870-5-5. El primero, IEC 60870-5-1, hace referencia al formato de la trama de transmisión, y el segundo, IEC 60870-5-5, hace referencia a las funciones básicas de aplicación.

Es un protocolo serie y asíncrono que utiliza la interfaz DTE/DCE para las comunicaciones. Además, el protocolo admite diferentes topologías, pudiendo configurarse en modo múltiple punto a punto, estrella y multidropped.

Al admitir diferentes topologías, este protocolo también admite diferentes modos de comunicación, dependiendo de la topología utilizada se usará uno u otro.

- Modo balanceado: Es utilizado cuando el enlace de comunicación es dedicado, punto a punto. Este modo permite una comunicación full duplex. Esto permite que las remotas envíen información tan pronto como la obtengan, sin necesidad de esperar a que el centro de control la solicite.
- Modo no balanceado: Es utilizado cuando existe una configuración de punto a multipunto. En este caso la comunicación será half duplex, es decir, solamente enviara datos aquella remota a la cual se lo solicite en centro de control.

En cuanto al formato de las tramas utilizado por el IEC101, se pueden encontrar dos diferentes. Una trama de longitud fija, la cual es utilizada para mensajes de control, y una trama de longitud variable, la cual transporta mensajes de la capa de aplicación. Se pueden ver estos dos tipos de tramas en la siguiente figura.

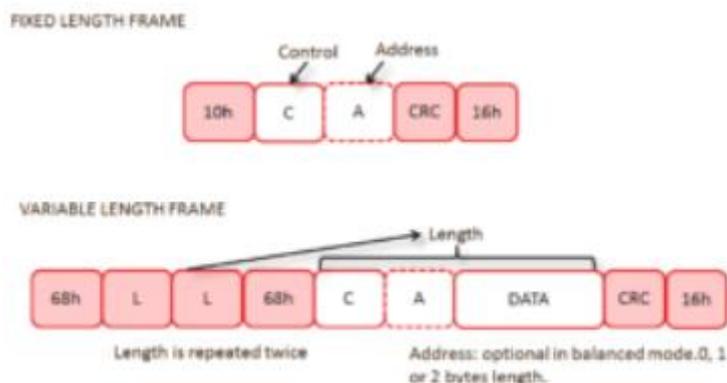


Figura 59. Tipos de trama de IEC101.
Fuente: <https://www.ensotest.com/>

El campo señalado como datos es el que transporta los datos del mensaje de la capa aplicación, los cuales se denominan ASDU, estos a su vez permiten encapsular servicios de telecontrol.

Con las siglas ASDU se hace referencia a *Application Service Data Unit*, los cuales pueden ser de diferentes tipos dependiendo de la función deseada, las cuales pueden ser las siguientes:

- Inicialización.
- Adquisición de datos por petición cíclica.
- Envío periódico.
- Envío de eventos.
- Interrogación general.
- Sincronización horaria.
- Comandos de control.
- Envío de contadores.
- Carga de parámetros.
- Comando de Test.
- Transferencia de ficheros.
- Medida del retardo de envío.

Como se ha visto, estas ASDU irían encapsuladas dentro de las tramas de longitud variable, dentro del campo de datos. A su vez, estas ASDU, incluyen diversas cabeceras para poder identificarlas.

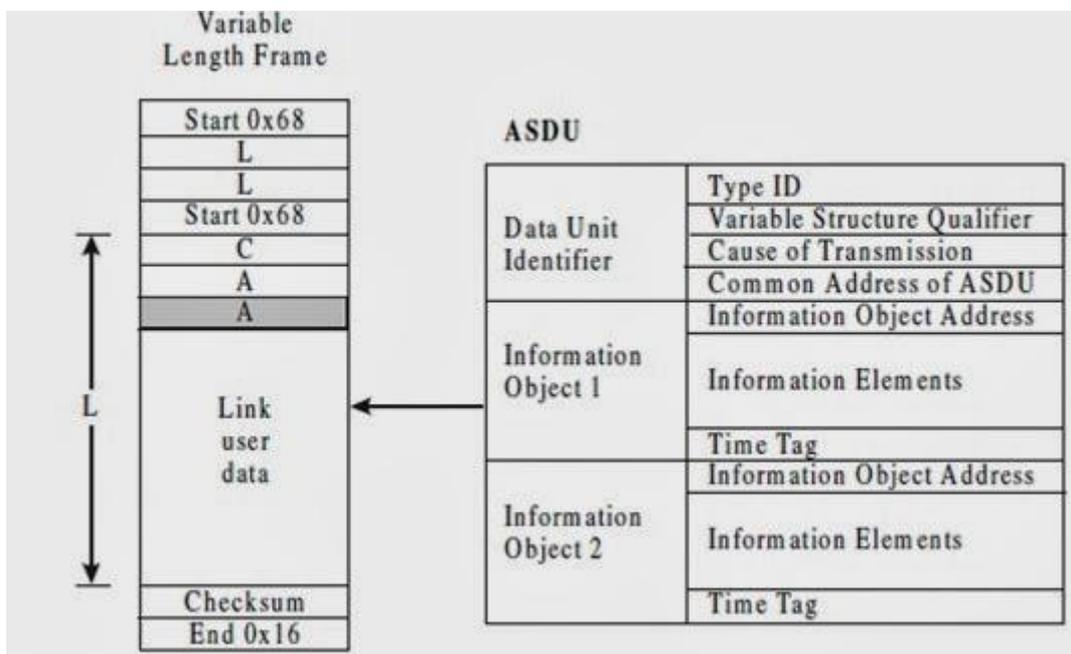


Figura 60. Estructura de una ASDU.
Fuente: <https://industriaautomatica.wordpress.com/>

- TI: *Type Identification*. Es un número que sirve para identificar el ASDU, da información de su formato y contenido.
- VSQ: *Variable Structure Qualifier*: Da información de cómo se estructuran los objetos de información.
- COT: *Cause of Transmission*: Da información de motivo del envío. Opcionalmente puede incluir un byte para identificar el centro de control.
- CASDU: *Common Address of ASDU*. Dirección de capa aplicación que recibe o envía el mensaje.
- Objetos de información. Es el campo que incluye la información solicitada o notificada.

Los objetos de información pueden ser medidas, parámetros a modificar, peticiones de información o incluso ficheros en caso de ser necesarios.

Por último, en referencia al modelo OSI, solo se encontrarían representadas las capas de aplicación, presentación y sesión, por lo que en IEC101 sería aplicación y la capa de enlace que también aparecería. Está basado en el modelo EPA.

4.2.3.2. IEC104

El protocolo IEC104 representa la evolución del IEC101. Esta evolución vino dada por la llegada de conectividad vía nuevas tecnologías con mayor ancho de banda a las instalaciones remotas, principalmente basadas en TCP/IP. Al basarse en TCP/IP usará siempre comunicación full duplex. Además, en IEC101 se ha de esperar a que se confirme el recibo de trama, en IEC104, se asume que el canal es estable y permite enviar nuevos mensajes sin necesidad de confirmación [99,100].

El protocolo IEC104 elimina las cabeceras de transmisión serie y añade las necesarias para el envío TCP/IP, en este caso sería una propia denominada APCI. Estos protocolos, IEC101 e IEC104, pueden coexistir en la misma red, presentando así una fácil transición de uno a otro. Finalmente, la trama del IEC104 queda como se muestra en la siguiente figura.

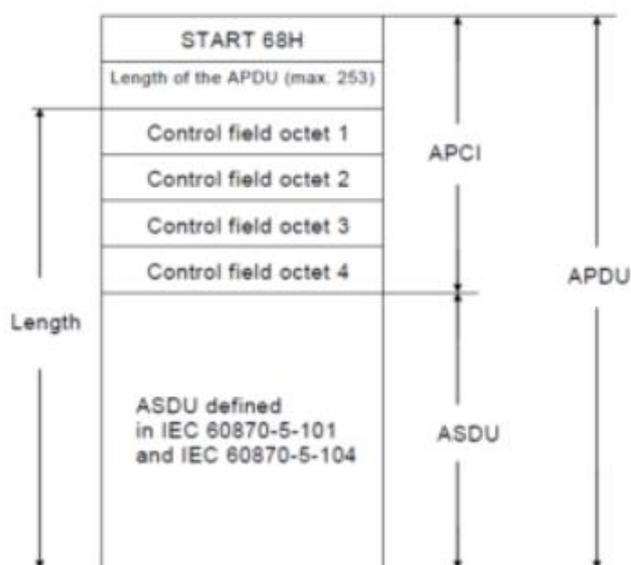


Figura 61. Trama en IEC104.
Fuente: <https://www.ensotest.com/>

Como se puede observar en la figura, existen 4 bits de control. Los dos primeros permiten diferenciar entre los 3 tipos de tramas de IEC104 existentes.

- U Frame: Estas tramas son utilizadas para el control, determinan si es posible o no enviar tráfico por el canal TCP.
- I Frame: Estas tramas transportan datos de aplicación, los vistos con anterioridad denominados ASDUs.
- S Frame: Son tramas de supervisión que indican al extremo opuesto la correcta recepción de una trama.

Una de las ventajas que incorpora el IEC104 es la posibilidad de incluir canales redundantes sobre TCP/IP, de tal manera que en caso de fallo de un canal pueda utilizarse otro. Para conseguir esta redundancia se establecen diferentes canales en paralelo.

Otra diferencia importante con respecto al IEC101 es que la sincronización temporal no es tan determinista, por lo que se elimina el uso de la ASDU con marca de tiempo y con hora absoluta, pudiéndose encontrar alternativas cuando se utiliza el IEC104, como la sincronización NTP.

En este caso se ven cubiertas el resto de las capas del modelo OSI no cubiertas en IEC101 por la utilización de TCP/IP, quedando solamente la capa física sin cubrir.

4.2.3.3. DNP3

Las siglas de este protocolo hacen referencia a *Distributed Network Protocol*. Fue desarrollado específicamente para para la industria eléctrica por la firma WESTRONIC a principio de la década de los 90. Este protocolo nació con el fin de ser un protocolo libre que estandarizase un poco las comunicaciones en las redes eléctricas, de tal manera que fuera compatible con productos de diferentes fabricantes [58,96].

Para el diseño del protocolo DNP3 se tomó como referencia el IEC 60870-5 y la arquitectura de comunicaciones UCA 2.0. Del IEC 60870-5 se tomaron las capas de enlace y datos, pero el protocolo DNP3 contempla la arquitectura flexible de UCA 2.0, sin estar estructurado exactamente en las capas de referencia del modelo OSI.

Por otro lado, este protocolo incorpora algunas mejoras propias como son:

- Reducción del ancho de banda.
- Velocidad de transferencia de datos de 1200 bps.
- Compatible con sistemas SCADA y redes tipo control supervisor.

Estas mejoras fueron posible gracias a la arquitectura, con la cual se podían eliminar algunas capas del modelo OSI, esto se puede observar mejor en la siguiente figura.

| Modelo OSI | DNP3 |
|-------------------------|-------------------------|
| Capa de Aplicación | Capa de Aplicación |
| Capa de Presentación | - |
| Capa de Sesión | - |
| Capa de Transporte | Función de Transporte |
| Capa de Red | - |
| Capa de Enlace de Datos | Capa de Enlace de Datos |
| Capa Física | Capa Física (medio) |

Figura 62. Diferencias entre el protocolo DNP3 y el modelo OSI.
Fuente: <http://jupiter.utm.mx/>

Una gran ventaja que incorpora este protocolo es que, al utilizar 2 Bytes para la identificación del origen y 2 Bytes para el destino, es posible direccionar hasta 65000 dispositivos. Muy útil para ser utilizado a gran escala. También soporta diferentes topologías, siendo posible realizar una configuración de maestro-esclavo o de igual a igual.

Este protocolo es mayoritariamente utilizado en América del Norte. Es el equivalente a los utilizados en Europa vistos anteriormente IEC 101 e IEC 104. Está orientado principalmente a la comunicación con equipos inteligentes y estaciones controladoras.

A nivel de enlace físico, puede ser soportado por diversas tecnologías, aunque tiene gran integración con Ethernet. Protocolo principalmente de enlace físico que se verá más adelante.

4.2.3.4. ModBbus

Junto con IEC101 e IEC104, **es el protocolo más utilizado en Europa para las comunicaciones entre subestaciones y centros de control**. Destaca también su uso a nivel interno de subestaciones donde existen pequeños sistemas SCADA dedicado en exclusivo a la subestación.

Este protocolo fue diseñado en 1979 basándose en una arquitectura de maestro/esclavo por Modicom. Esta principalmente enfocado a la interconexión con controladores lógicos programables. Es muy utilizado para controlar los sistemas de automatización de la red.

Sus principales ventajas son su fácil implementación y el requerimiento de poco desarrollo, el echo de que es un protocolo público y que los bloques de datos que maneja no tienen restricción de tamaños.

El protocolo que utilizado hoy en día es una versión del original de 1979 pero adaptado a TCP/IP. Modbus como tal solo contempla la capa de aplicación. El protocolo original y actual se ven mejor representados en la siguiente figura [106].

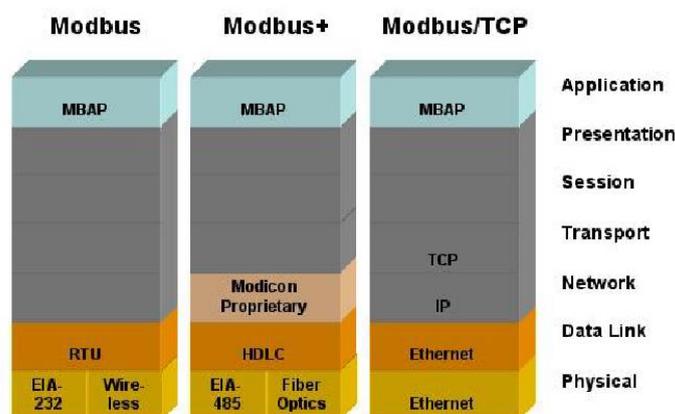


Figura 63. Modbus y el modelo OSI.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/The-MODBUS-protocol-family-OSI-stack-representation_fig1_228952316

En cuanto al modelo de trama que presenta Modbus, es siempre igual. En el caso concreto de Modbus TCP/IP, la trama es igual a la original, pero empaquetada en un mensaje con cabeceras TCP/IP. La estructura de la trama Modbus es la siguiente:

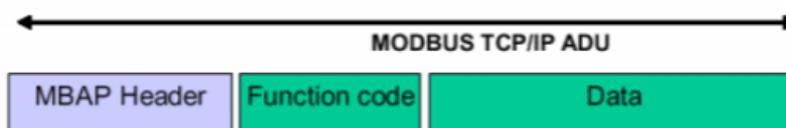


Figura 64. Estructura trama Modbus.
Fuente: <http://www.caroligualada.es/>

Donde MBAP (MODBUS *Application Protocol header*) es la cabecera de la capa de aplicación, la cual sí que presenta diferencias con la MBAP de Modbus original. El MBAP de Modbus TCP/IP recoge la siguiente información.

| Campos | Longitud | Descripción | Cliente | Servidor |
|----------------------------|----------|--|--|---|
| Identificador de trama | 2 bytes | Identificación de una petición MODBUS/ Respuesta trama | Inicializado por el cliente (petición) | Recogido por el servidor desde la petición recibida |
| Identificador de protocolo | 2 bytes | 0 = protocolo MODBUS | Inicializado por el cliente (petición) | Recogido por el servidor desde la petición recibida |
| Longitud | 2 bytes | Número de bytes | Inicializado por el cliente (petición) | Inicializado por el servidor (Respuesta) |
| Identificador de unidad | 1 byte | Identificador del esclavo remoto conectado en la línea serie o en otro tipo de bus | Inicializado por el cliente (petición) | Recogido por el servidor desde la petición recibida |

Figura 65. Contenido del MBAP de Modbus TCP/IP.
Fuente: <http://www.caroligualada.es/>

Por otro lado, el código de función indica al esclavo que clase de acción debe realizar. Está compuesto por 8 bits. Cuando el mensaje es esclavo-maestro, en vez de maestro-esclavo, el código de función es utilizado para indicar si se trasmite una respuesta normal o de error. En caso de ser una respuesta normal (válida), el esclavo repite el mensaje del código de función original. EN caso de ser un mensaje de error, el esclavo repite el código de función original, pero con su MSB configurado como lógica 1.

4.2.3.5. DMLS/COSEM

DMLS/COSEM es un protocolo que recoge las capas de la cuarta a la séptima del modelo OSI. DMLS hace referencia a *Device Language Message Specification* y COSEM a *Companion Specification for Energy Metering* [58].

Este protocolo fue desarrollado para ser utilizado en conjunto con el protocolo PRIME, el cual se verá a continuación. El protocolo PRIME, como está enfocado únicamente a las capas inferiores del modelo OSI, DMLS/COSEM complementa PRIME.

Está enfocado a la comunicación con dispositivos de bajo nivel, como son los contadores inteligentes, y también para la comunicación con equipo de centros de control. Este protocolo también se puede encontrar utilizado conjuntamente con M&M.

En la siguiente imagen se puede ver como se relaciona este protocolo con el modelo de referencia OSI.



Figura 66. DMLS/COSEM y en el modelo de referencia OSI.
Fuente: <https://www.incibe-cert.es/>

4.2.3.6. PRIME

PRIME es un protocolo de nueva generación que hace referencia con sus siglas a *Powerline Intelligent Metering Evolution*. Este protocolo está regido por PRIME Alliance e implementa las dos primeras capas del modelo OSI (presentado en puntos anteriores), la capa de enlace y la capa física. **Está orientado a la comunicación con los contadores inteligentes** [58,91].

El protocolo PRIME se basa en la tecnología PLC bajo DMLS y COSEM, los cuales son parte del estándar IEC 62056 para las mediciones eléctricas.

Como se puede deducir de su nombre, a nivel físico se utiliza la tecnología PLC, en la banda de 3-95 KHz (CENELEN-A), aunque esta banda se ve extendida en la última versión del protocolo hasta los 500 KHz, además se utiliza la modulación OFMD (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).

Por otro lado, a nivel de enlace, queda definida una capa de acceso que conforma una estructura de red de árbol, donde existen dos tipos de nodos:

- **Nodo base:** hace referencia a lo que sería la raíz del árbol. A nivel de comunicaciones actuaría como el maestro. Por cada subred solamente puede existir un nodo base.
- **Nodo de servicio:** es un elemento que inicialmente se encuentra desconectado y necesitar pasar por un proceso de registro para unirse a la red. Estos nodos de servicio presentan dos funciones principalmente, por un lado, mantener la conexión en la subred para la capa de enlace y realizar funciones de enrutamiento para datos de otros nodos de servicio. Un nodo de servicio puede encontrarse a su vez en tres estados diferentes:

- Desconectado: nodo desconectado de la subred.
- Terminal: nodo conectado a la subred, pero sin realizar funciones de enrutamiento.
- Switch: nodo conectado a la subred y realizando funciones de enrutamiento de la subred.

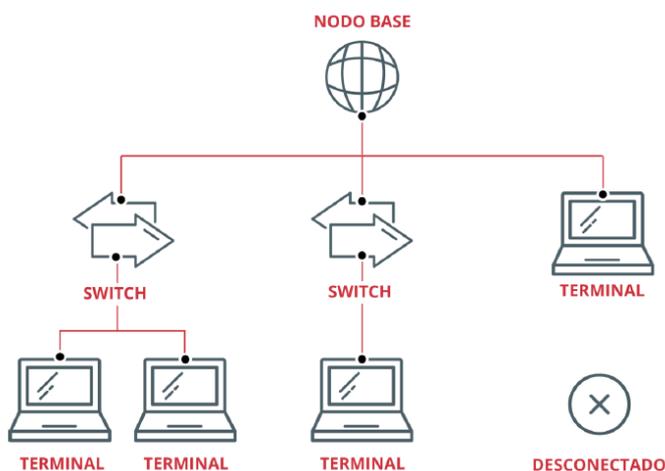


Figura 67. Estructura de los nodos del protocolo PRIME.

Fuente: <https://www.incibe-cert.es/>

4.2.3.7. M&M (Meters and More)

Metes and More es un protocolo, que a diferencia de PRIME, cubre todas las capas del modelo OSI. Originalmente este protocolo era el propietario de la compañía italiana ENEL, en este caso, Meter and More, sería la evolución, la cual, actualmente es abierta y gestionada por la asociación independiente Meters and More AISBL, formada por unos 30 miembros, entre los que se incluyen compañías eléctricas y fabricantes de contadores inteligentes. Fue implantado en España cuando ENEL realizó la compra de la eléctrica española ENDESA [93].

La arquitectura de este protocolo recoge los siguientes componentes:

- Sistema central: gestiona la totalidad de la red de medición inteligente.
- Concentradores: recogen la información de conjuntos de contadores inteligentes.
- Equipos de medida: principalmente contadores inteligentes.
- Dispositivos locales de Operación y Mantenimiento: equipos utilizados por operarios para gestión local en caso de necesidad, tanto para equipos de medida como para concentradores.
- En la concepción de este protocolo primo, según sus creadores, el hacer un protocolo eficaz, robusto y seguro. Por ello posee las siguientes características:

- Los mensajes son muy cortos y optimizados para poder realizar comunicaciones robustas sobre PLC de banda estrecha y sobre comunicaciones inalámbricas.
- Modulación BPSK para la capa física.
- Uso del algoritmo AES de 128 bits para encriptación y autenticación para dotar de mayor seguridad el protocolo.
- Permite la gestión y configuración automática de la red.
- Enfoque integral: se utiliza la misma capa de enlace con todos lo interfaces.
 - Perfil PLC: comunicaciones entre concentrador y contador.
 - Perfil TCP/IP: comunicaciones a través de redes públicas entre los concentradores y el sistema central.
 - Perfil IEC62056-21: comunicaciones con el terminal portátil óptico para operación y mantenimiento.

En la siguiente imagen se puede ver cómo está estructurado el protocolo a todos los niveles del modelo OSI.

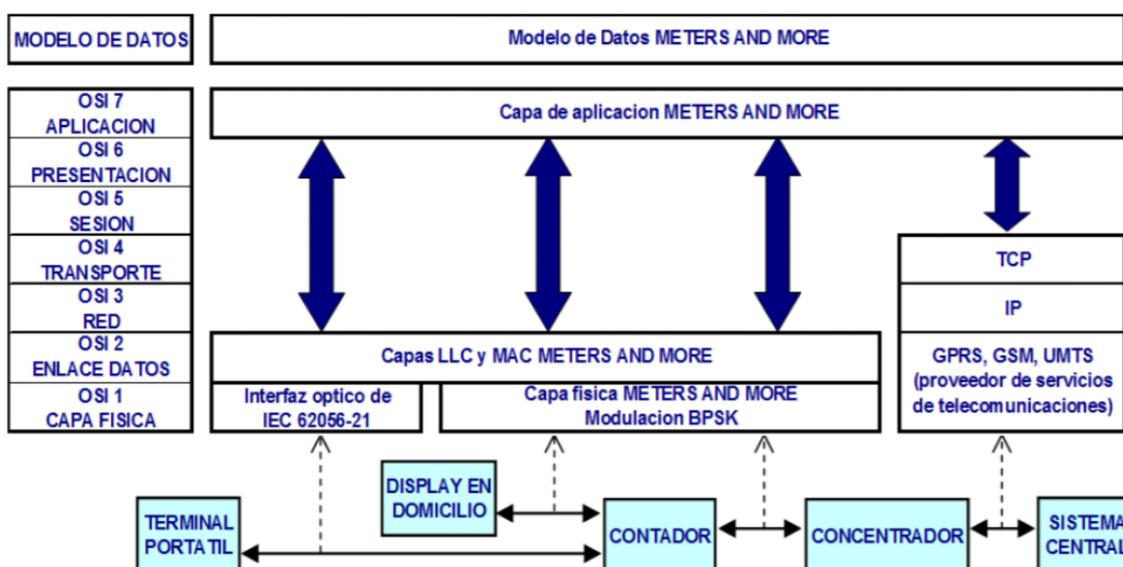


Figura 68. Protocolo Meters and More en el modelo OSI.

Fuente: <https://www.cnmec.es/>

4.2.3.8. G3

El **protocolo de comunicaciones G3**, es abierto, estándar internacional, y fue desarrollado específicamente para redes inteligentes por Sagem, ERDF y Maxim. Se caracteriza por buscar la interoperabilidad en la comunicación de todos los elementos de una Smart Grid a través principalmente de PLC, teniendo en cuenta tanto baja y media tensión, como alta tensión. Al igual que PRIME, este protocolo se centra en las dos capas superiores del modelo OSI, capas física y de enlace.

Utilizada la modulación OFDM además de una capa de adaptación 6LoWPAN, necesario para poder transmitir paquetes IPv6, lo que le permite soportar estructuras de gran cantidad de nodos.

Como se mencionaba, es un protocolo que busca una gran interoperabilidad, por lo que soporta operación entre los 10 KHz y los 490 KHz, además tiene la posibilidad de coexistir con otras señales de modem de red, por lo que podría funcionar en paralelo a otro estándar de PLC.

Algunas de las principales características de este protocolo son las siguientes:

- Es posible realizar una conexión punto a punto gracias a la utilización de IPv6.
- Permite utilizar las bandas definidas por CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), FCC (Federal Communication Commission) y ARIB (Association of Radio Industries and Businesses):
 - CENELEC EN50065-1: queda definido el rango de bandas de baja frecuencia para comunicaciones PLC en Europa.
 - FCC define que para comunicaciones PLC en Estados Unidos, la frecuencia debe encontrarse entre 10 KHz y 490 KHz.
 - ARIB define que para comunicaciones PLC en Asia, la frecuencia debe encontrarse entre 10 KHz y 450 KHz.
- Robustez y amplio rango de frecuencias: representa una gran ventaja a la hora de instalar dispositivos inteligentes que se comunican con los concentradores.

Por último, se presenta en la siguiente figura el protocolo G3 sobre el modelo OSI.

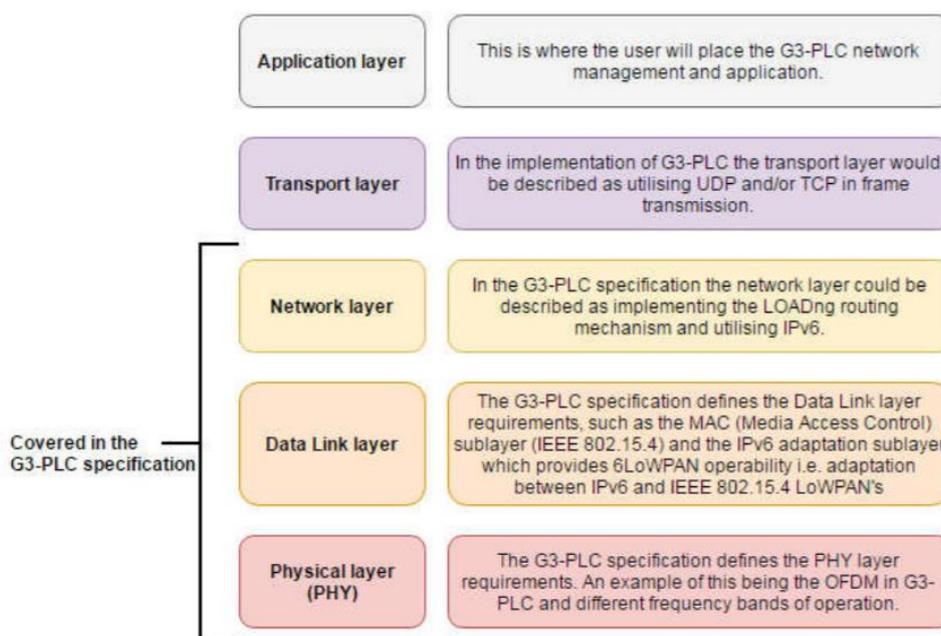


Figura 69. Protocolo G3 sobre el modelo OSI.
Fuente: <https://synergycastle.renesas.com/>

4.2.3.9. OSGP

El **protocolo OSGP recibe su nombre de *Open Smart Grid Protocol***. Es un protocolo, como su nombre indica, abierto, debido a lo cual es uno de los más utilizados a nivel mundial. Además, es estándar por el Instituto Europeo de Estándares y Telecomunicaciones (ETSI).

Este protocolo trabaja entre 9 KHz y 95 KHz, lo que lo hace idóneo para ser utilizado sobre la Banda-A de PLC. Este protocolo tiene muy buena integración con algunos visto anteriormente como G3 y PRIME. Aunque también puede usar otras capas físicas dependiendo de las necesidades [94,98].

Una de las principales ventajas que presenta este protocolo es que es capaz de utilizar un contador como repetidor, para señales emitidas por otros contadores.

Este protocolo a su vez se basa en 3 estándares abiertos para 3 de sus capas, como se puede ver en la siguiente figura.

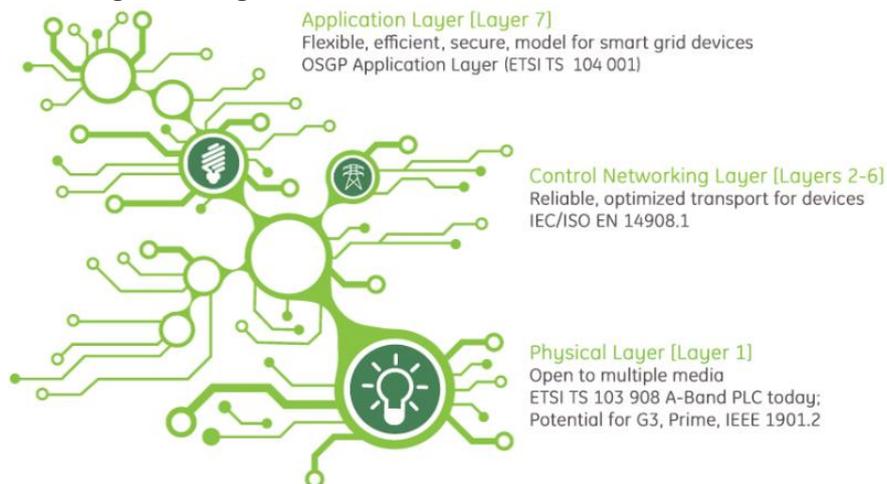


Figura 70. Características del protocolo OSGP.
Fuente: <http://www.osgp.org/>

Como se comentaba anteriormente este protocolo puede ser utilizado con cualquier capa física ya que al estar basado en la ISO/IEC 14908, no depende de ningún medio físico.

En la capa de red también se utiliza EN14908-1, aunque incluyendo algunas extensiones para dotar al protocolo de seguridad, autenticación y encriptación.

En cuanto a la capa de aplicación se usa una estructura basada en la tabla ANSI C 12, no solo para medidores, sino para todos los dispositivos. Además, el estándar ETSI TS 104 001 proporciona un almacenamiento eficiente y comandos de datos orientados a tablas, lo que a nivel de usuario resulta en un protocolo muy práctico para trabajar.

4.2.3.10. Ethernet junto con TCP/IP

En este punto se va a explicar brevemente que es Ethernet y que es TCP/IP. Ya que, aunque es de uso muy común en todo tipo de comunicaciones, como se ha visto anteriormente, también está muy presente en las comunicaciones de las Smart Grids [100-102].

En primer lugar, se encuentra Ethernet el cual es una tecnología de comunicaciones convertido en estándar, IEEE 802.3. Abarca las dos últimas capas del modelo OSI, capas física y de enlace.

Como se vio en el punto anterior que trataba sobre los medios de comunicación, Ethernet es de uso mayoritario en par trenzado, fibra óptica y coaxial. En la siguiente figura se pueden ver los valores que se obtienen de utilizar Ethernet sobre estos medios de transmisión.

| Estándar de Ethernet | Denominación | Velocidad de datos | Tecnología de cables | Año de publicación |
|----------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| 802.3 | 10Base5 | 10 MB/s | Cable coaxial | 1983 |
| 802.3a | 10Base2 | 10 MB/s | Cable coaxial | 1988 |
| 802.3i | 10Base-T | 10 MB/s | Cable de par trenzado | 1990 |
| 802.3j | 10Base-FL | 10 MB/s | Cable de fibra óptica | 1992 |
| 802.3u | 100Base-TX100Base-FX100Base-SX | 100 MB/s | Cable de par trenzado, cable de fibra óptica | 1995 |
| 802.3z | 1000Base-SX1000Base-LX | 1 GB/s | Cable de fibra óptica | 1998 |
| 802.3ab | 1000Base-T | 1 GB/s | Cable de par trenzado | 1999 |
| 802.3ae | 10GBase-SR, 10GBase-SW, 10GBase-LR, 10GBase-LW, 10GBase-ER, 10GBase-EW, 10GBase-LX4 | 10 GB/s | Cable de fibra óptica | 2002 |
| 802.an | 10GBase-T | 10 GB/s | Cable de par trenzado | 2006 |

Figura 71. Valores de transmisión con ethernet sobre diferentes medios de transmisión.

Fuente: <https://www.ionos.es/>

En segundo lugar, TCP/IP representa un modelo propio. En la siguiente figura se puede ver como sería la relación de este modelo con el modelo OSI. En este modelo está compuesto principalmente por los protocolos *Transmission Control Protocol* (TCP) y el *Internet Protocol* (IP) de los cuales toma su nombre. TCP corresponde a la capa de transporte e IP a la capa de red del modelo OSI. Funcionan principalmente con Ethernet aunque no es condición necesaria, pudiendo funcionar con otras tecnologías.

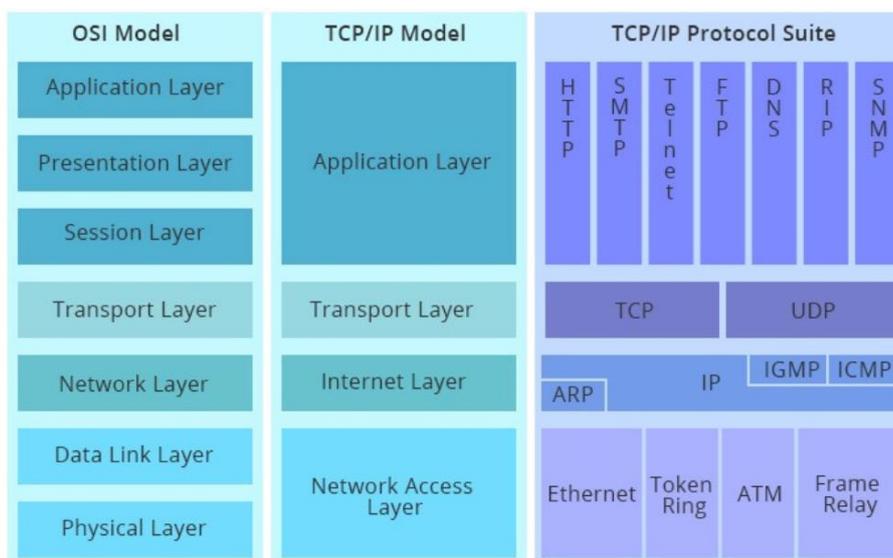


Figura 72. Modelo OSI en relación con el modelo TCP/IP.
Fuente: <https://medium.com/>

4.2.3.11. ZigBee

ZigBee es un protocolo enfocado a comunicaciones inalámbricas, pero presentando una gran ventaja, su pequeñísimo consumo de energía. Este consumo tan pequeño de energía conlleva a su vez una ratio de transferencia de datos de hasta 250 Kb por segundo. Está pensado para utilizar el estándar IEEE 802.15.4 para su la capa física, el cual queda definido en la tabla de la figura siguiente.

| Propiedad | Rango |
|-------------------------------|--|
| Rango de transmisión de datos | 868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s. |
| Alcance | 10 – 20 m. |
| Latency | Abajo de los 15 ms. |
| Canales | 868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales. |
| Bandas de frecuencia | Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz. |
| Direccionamiento | Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE |
| Canal de acceso | CSMA-CA y rasurado CSMA-CA |
| Temperatura | El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C |

Figura 73. Propiedades del IEEE 802.15.4, figura 54 original.
Fuente: <http://catarina.udlap.mx/>

En definitiva, este protocolo aporta una gran solución para la interconexión de elementos en una HAN, ya que, aunque su ratio de transferencia sea reducido, los sistemas que necesitara interconectar no necesitarán mayores ratios. Por ejemplo, redes de sensores domésticos capaces de gestionar y medir el consumo energético de una casa para su interrelación con sistemas de producción y almacenamiento de energía y con la red.

No se ha considerado una tecnología de transmisión como tal ya que define todos los niveles o capas del modelo OSI, utilizando un estandar para su capa física [72,73].

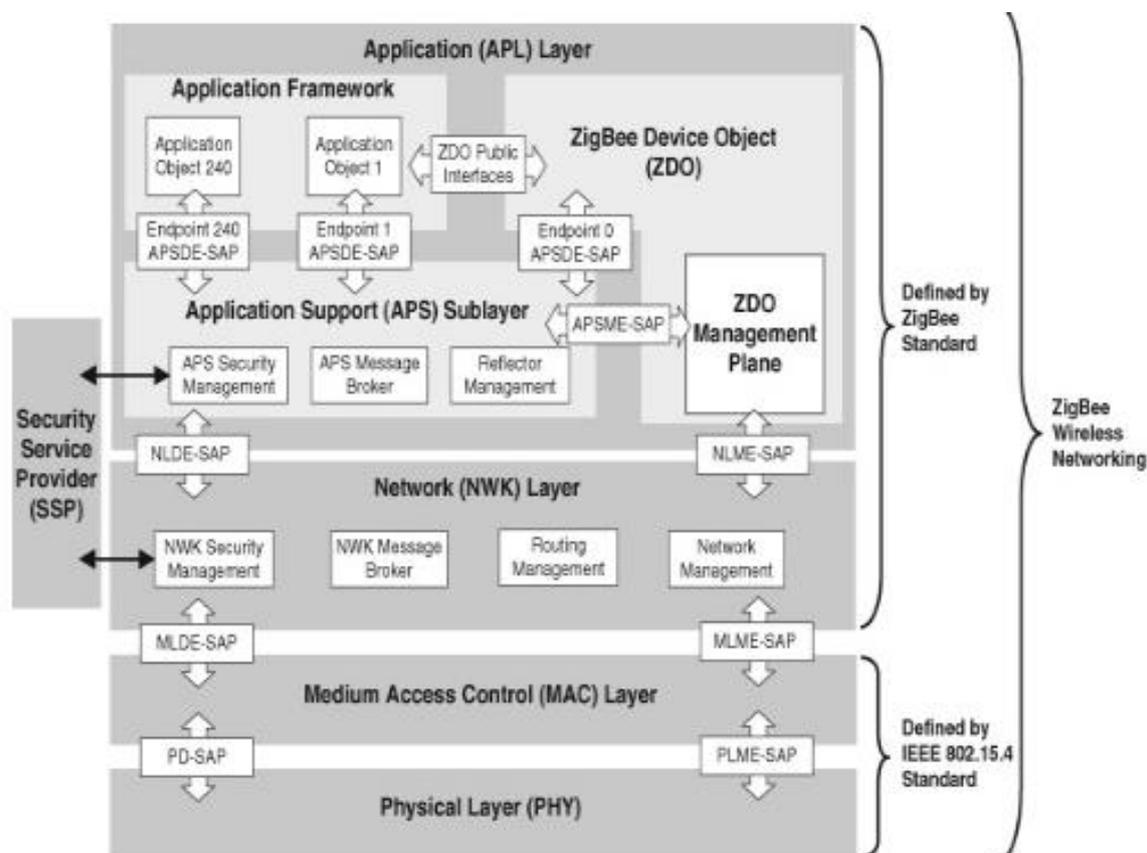


Figura 74. ZigBee y el modelo OSI.
Fuente: <https://www.sciencedirect.com/>

5 PROYECTOS

En este capítulo se verán algunos de los proyectos más importantes relacionados con la energía, con las comunicaciones y las Smart Grids.

5.1. Proyectos relacionados con la energía

A nivel de energía existen dos grandes proyectos que podrían revolucionar el mercado eléctrico. Por un lado, el ITER, uno de los proyectos más grandes del mundo enfocado en la fusión nuclear. Por otro lado, la integración del coche eléctrico en la red eléctrica, utilizando este como baterías distribuidas (vehicle-to-grid).

5.1.1. ITER

El ITER es un proyecto de investigación internacional, centrado en la fusión nuclear. Anteriormente se ha visto como existen centrales capaces de producir energía gracias a la fisión nuclear, en este caso, el proceso es el opuesto.



Figura 75. Logo del ITER.

Fuente: <https://es.m.wikipedia.org/>

Actualmente, cooperan 35 países para tratar de construir el Tokamak más grande del mundo. En el caso de ser capaz de demostrar la viabilidad de la fusión como método de producción eléctrica, podría suponer el mayor avance de la historia a nivel energético.

Para poder hacerse una idea de la magnitud de este proyecto, se ha de comprender que lo que se pretende en el ITER es replicar el proceso que tiene lugar en las estrellas. Todo la luz y calor que nos llega del sol es debido a los procesos de fusión que ocurren en su interior (Anexo 3).

El combustible de las estrellas es el hidrógeno, como se ha visto, el elemento más simple y abundante del universo. Lo que ocurre dentro de una estrella es que, debido a la enorme gravedad y temperaturas de en torno a 15 millones de grados, los átomos de hidrógeno chocan, formando helio. Este proceso emite grandes cantidades de energía [103].

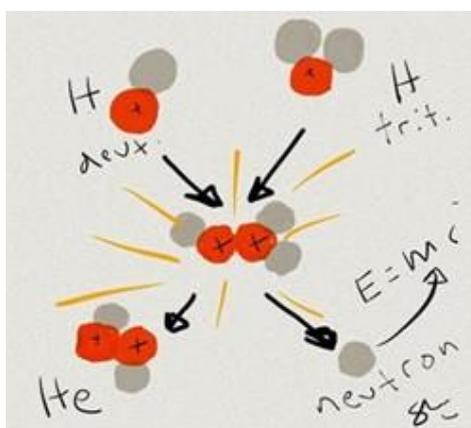


Figura 76. Fusión nuclear.

Fuente: <https://www.iter.org/>

Como en la tierra no es posible generar los niveles de gravedad de una estrella, la idea es replicar el proceso, pero con temperaturas de 150 millones de grados y grandes campos magnéticos que confinen el hidrógeno.

Se espera poder realizar el primer encendido del Tokamak en 2025 y que este sea capaz de generar 10 veces la energía consumida para la fusión. El ITER es el proyecto más grande del mundo en cuanto a fusión nuclear, pero no el único, existen paralelamente algunos otros como el SPARC del Massachusetts Institute of Technology.

5.1.2. Coche eléctrico

Como se presentaba en el tercer capítulo, una de las grandes necesidades para el crecimiento de las energías renovables eran los sistemas de almacenamiento de energía. Teniendo en cuenta que la automoción tiende a la electrificación, esto supondría que el número de baterías disponibles sería mucho mayor. Además, si se considera que en general un coche pasa en torno a un 90% del tiempo estacionado, el utilizar las baterías como almacenadores de energía, no supondría un problema. Podemos encontrar tres modalidades de utilización de las baterías los coches eléctricos, sin tener en cuenta su función principal como alimentación del vehículo [104].

- V2G (*Vehicle to Grid*): Tendría la misma función que las baterías vistas con anterioridad, suavizar las curvas de consumo y producción.
- V2H (*Vehicle to Home*): La idea sería poder utilizar la batería del coche para suministrar energía a la casa o incluso ser utilizada como fuente en caso de emergencia. Cargando el coche en horas donde el precio es bajo y utilizando posteriormente la batería como alimentación se podría reducir el precio de la factura.
- V2B (*Vehicle to Building*): Es lo mismo que el concepto de V2H, pero aplicado a edificios.

5.2. Proyectos relacionados con las comunicaciones

5.2.1. 5G

A nivel de comunicaciones el mayor proyecto actual, con capacidad de revolucionar las Smart Grids, es la tecnología 5G. Las comunicaciones móviles son muy utilizadas para las comunicaciones en redes eléctricas por su buena compatibilidad con éstas. Por ello, la nueva generación de comunicaciones móviles, el 5G, puede suponer a su vez un gran avance para las Smart Grids ya que presenta una mayor velocidad de transmisión y una reducción de latencia. Además, reduce el consumo de energía de los dispositivos hasta en un 90% y permite que más dispositivos se conecten a la vez [105].

Todos estos factores hacen del 5G una tecnología ideal para su utilización en Smart Grids, donde cada vez encontramos más dispositivos conectados y, por ende, cantidades más grandes de datos a transmitir. El hecho de que la latencia sea mucho menor también presenta una gran ventaja en el área de automatización de la red donde se necesitan respuestas lo más rápidas posibles.

5.3. Proyectos relacionados con las Smart Grids

Solamente **a nivel europeo se pueden encontrar más de 500 proyectos distintos sobre Smart Grid**. La mayor parte de ellos han finalizado ya, y el resto finalizan entre 2019 y 2020. Se ha de recordar que las iniciativas relacionadas con las Smart Grids están asociadas a los objetivos 20/20/20.

5.3.1. WiseGRID

WiseGRID es un proyecto europeo que comienza en 2016 y tiene como plazo de finalización abril de 2020. Tiene como objetivo la **combinación de energía renovables, tecnologías de almacenamiento y la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos para favorecer el despliegue del coche eléctrico** [107].



Figura 77. Logo de WiseGRID.
Fuente: <https://www.wisegrid.eu/>

La base de este proyecto es entrelazar las tecnologías de la información disponibles con los elementos comentados para aumentar la inteligencia, estabilidad y seguridad de la red. Además, busca el fomento de los **“prosumers”**, es decir que aquellos usuarios de la red que consumen y producen energía, con lo que se pretende la creación de un mercado más abierto.

Para esto, el proyecto está siendo desarrollado en paralelo en Bélgica, Italia, España y Grecia, donde se están preparando las infraestructuras necesarias para la demostración del proyecto a gran escala. La realización en paralelo en estas 4 localizaciones se debe al afán de demostrar la viabilidad del proyecto en 4 marcos regulatorios, sociales, climáticos y tecnológicos diferentes.

En total esta demostración incluirá 1700 usuarios, 60 baterías que sumaran más de 30 KWh de capacidad instalada, 50 bombas de calor, las cuales dan entorno a 160 KWh de capacidad instalada, 180 vehículos eléctricos, 40 estaciones de carga y más de 70 MWh de energía renovables.

El proyecto lo lidera la empresa española ETRA I+D y está formado por 21 socios de 9 países: Bélgica, Grecia, Francia, España, Rumania, Alemania, Italia y el Reino Unido. El presupuesto total destinado asciende a 17,6 M€.

5.3.2. MIGRATE

MIGRATE es un proyecto europeo que comienza en enero de 2016 y tiene como plazo de finalización diciembre de 2019. Tiene como principal objetivo el diseño de diversos enfoques con los que **resolver problemas relacionados con la estabilidad de red**,

calidad de suministro y la seguridad del suministro. Este proyecto nace para mejorar la integración en la red de energía renovables.

Más concretamente, este proyecto se centra en la parte de electrónica de potencia que se encuentra a lo largo de la red del alto voltaje (HVAC, “High Voltage Alternating Current”) [108-110].



Figura 78. Logo proyecto MIGRATE.
Fuente: <https://ec.europa.eu/>

El proyecto se divide en los siguientes puntos:

1. Desarrollar una metodología replicable, que permita estimar y monitorizar, en tiempo real, la inestabilidad de la red debida a la electrónica de potencia.
2. Diseñar leyes innovadoras de control del sistema de potencia para hacer frente a la falta de máquinas síncronas.
3. Mediante el uso de simulaciones numéricas y pruebas de laboratorio, el proyecto entregará soluciones de control y recomendaciones para:
 - Crear nuevas reglas de conexión a la red de dispositivos de electrónica de potencia,
 - Desarrollar una nueva tecnología de protección para contrarrestar las perturbaciones de calidad de energía esperadas.
4. Realización de un análisis de la tecnología, los impactos y las barreras económicas para recomendar futuros escenarios de implementación.
5. El proyecto llevará a cabo actividades de difusión entre las partes interesadas de la Comisión Europea para apoyar el despliegue de los resultados del proyecto.

Este proyecto cuenta con un presupuesto total de 17.855.205€ y el liderado por la compañía alemana TENNET TSO GMBH. En el proyecto participan Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Islandia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Eslovenia, España y el Reino Unido.

5.3.3. STAR

El proyecto STAR (Sistemas de Telegestión y Automatización de la Red) pertenece a la eléctrica española Iberdrola y tiene como objetivo la digitalización de su red. Para ello

la compañía ha instalado hasta el momento **10,8 millones de contadores inteligentes**, ha adaptado alrededor de 90.000 centros de transformación y ha modernizado todo su parque de contadores con una potencia contratada igual o inferior a 15 kilovatios [111,112].

Con esta iniciativa Iberdrola pretende mejorar la operación de red y calidad de suministro. En total, este proyecto ha sumado una **inversión de 2.000 millones de euros**. El proyecto ha finalizado recientemente.

Este proyecto no ha repercutido solamente sobre España ya que Iberdrola ha instalado:

- 1.000.000 de contadores inteligentes en Maine, Connecticut e Ithaca (Estados Unidos)
- 220.000 contadores inteligentes en los estados de Rio Grande do Norte, Bahia y Pernambuco (Brasil)
- 1.080.000 contadores inteligentes en el Reino Unido.



Figura 79. Logo Iberdrola.
Fuente: <https://www.iberdrola.com/>

5.3.4. Dream-Go

Es un proyecto portugués gestionado por el Instituto Tecnológico Do Porto, pero financiado por el programa europeo para la investigación e innovación Horizonte 2020. El presupuesto con el que este proyecto cuenta asciende a 2.160.000 euros. Este proyecto, al igual que el anterior, ha finalizado recientemente.

El proyecto **Dream-Go estudia la implantación de las Smart Grids desde el punto de vista económico, buscando estrategias para la remuneración a los consumidores, pretendiendo así aumentar el atractivo de las redes inteligentes** [113,114].

Para este proyecto se creó una plataforma propia en la cual el consumidor puede consultar, en tiempo real, el precio de la energía y el impacto de sus decisiones en la sostenibilidad. Una vez presenta estos datos, la plataforma da opciones de cara a poder tomar decisiones y aprovechar las oportunidades de respuesta a la demanda.

En el proyecto han participado España, Portugal y Alemania. Por otro lado, ha existido participación de la Universidad de Clemson de Estados Unidos.

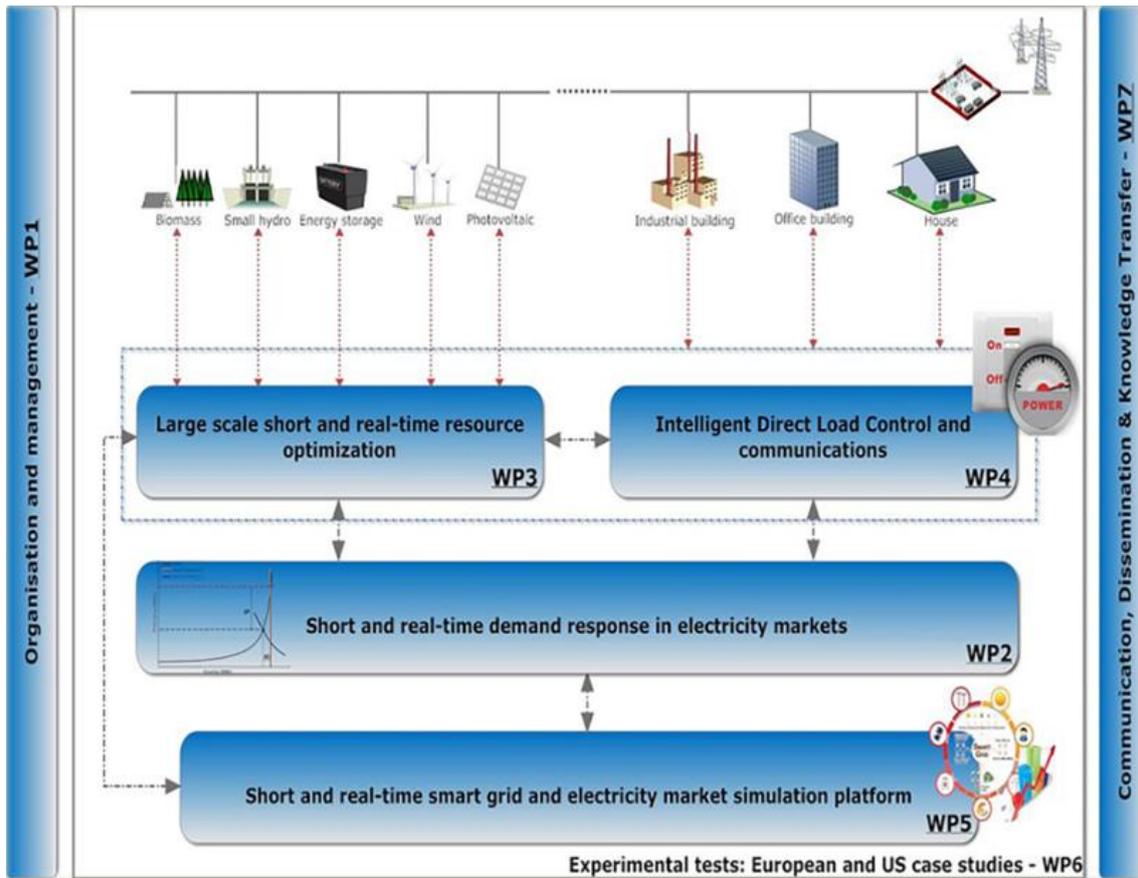


Figura 80. Esquema de funcionamiento de la plataforma creada por Dream-Go.

Fuente: <https://www.smartgridsinfo.es/>

6 Conclusiones

La red eléctrica, tal y como fue concebida, está destinada a desaparecer, así como las fuentes de electricidad basadas en combustibles fósiles. La demanda de un suministro eléctrico más eficiente, que además incluya las energías limpias como pilar fundamental, está provocando el surgimiento a nivel mundial de las redes inteligentes.

Las energías renovables están destinadas a dominar el mercado eléctrico. Los grandes problemas medioambientales que sufre hoy en día nuestro planeta han sido provocados en gran parte por el uso de combustibles fósiles. Esto a su vez hace que entre en juego el problema de gestionar un creciente número de fuentes surgidas de la generación distribuida.

Por ello, no solo la generación eléctrica tiende hacia un modelo más limpio, sino que, además, el mundo tiende a electrificarse. Si la sociedad es capaz de obtener toda la energía que necesita de fuentes limpias, sin ninguna duda, la forma que mejores ventajas presenta tanto para ser transportada, como transformada en otras formas de energía, es la energía eléctrica.

Los nuevos requerimientos de la red eléctrica demandan una digitalización casi completa de la distribución de electricidad, siendo fundamental en este punto la integración de equipos de comunicaciones, equipos de medición y equipos de automatización en la red.

Tanto el estado actual de la red eléctrica, como sus necesidades futuras han sido objeto de estudio en este trabajo de fin de grado. Con él, se ha pretendido analizar el porqué de la necesidad de una red eléctrica dotada de inteligencia y el cómo se le dota a la red de la misma.

También se ha estudiado cómo funcionan las comunicaciones de todos los dispositivos necesarios en una red de estas características, las cuales representan uno de los pilares fundamentales en la evolución de la red eléctrica.

Por último, se ha comprendido como el modelo de generación eléctrica actual no es sostenible, y cuál ha de ser su futuro, teniendo en este especial importancia el almacenamiento de energía.

Las redes eléctricas inteligentes son la respuesta a una necesidad global, de un mundo en constante progreso, donde la energía es a día de hoy un recurso imprescindible en la mayoría de procesos. Además, representan la solución a gran parte de los problemas planteados por el nuevo panorama energético actual y futuro.

7 BIBLIOGRAFÍA

7.1. Bibliografía utilizada

- [1] <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Red_el%C3%A9ctrica_inteligente
- [3] http://www.ateneoescurialense.org/Archivos/Adjuntos/Contenidos/Historia_de_la_ELECTRICIDAD.pdf
- [4] <http://www.laenergiadelcambio.com/corriente-alterna-vs-corriente-continua/>
- [5] http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/05022016/6d/es-an_2016020513_9144736/educacion_adultos/ct_b17_t3.pdf
- [6] <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo7.html>
- [7] <https://www.ecointeligencia.com/2011/03/la-apuesta-2020-para-2020/>
- [8] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es
- [9] https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- [10] <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>
- [11] <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/>
- [12] https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica
- [13] https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_hidr%C3%A1ulica
- [14] <https://sites.google.com/site/bmenergiahidroelectrica/ventajas-y-desventajas-de-una-central-hidroelectrica>
- [15] <https://www.aura-energia.com/tipos-de-centrales-electricas-en-espana/>
- [16] http://contenidosdigitales.ulp.edu.ar/exe/educaciontecnologia/tipos_de_centrales.html
- [17] <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3.html>
- [18] <https://www.aprendeconenergia.cl/hidroelectrica-de-pasada/>
- [19] <https://erenovable.com/centrales-hidroelectricas/>
- [20] <https://www.monografias.com/trabajos33/centrales-termicas/centrales-termicas.shtml>
- [21] <https://energia-nuclear.net/como funciona la energia nuclear.html>
- [22] <https://www.csn.es/ca/fision-nuclear>
- [23] <https://energia-nuclear.net/combustible-nuclear>
- [24] <https://www.lifeder.com/ventajas-desventajas-energia-nuclear/>
- [25] <http://www.sustentator.com/blog-es/2010/02/como-funciona-un-generador-eolico/>
- [26] <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>
- [27] <https://www.portal-energia.com/maior-parque-eolico-onshore-china/>
- [28] <https://sites.google.com/site/proenergiza/energias-renovables/energia-solar/central-termica-solar>
- [29] <http://tecnologianivel2.blogspot.com/2012/05/como-funciona-una-central-solar-termica.html>

- [30] <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2011/02/08/central-solar-mediante-cilindros-parabolicos/>
- [31] <http://www.centralestermosolares.com/centrales-de-c-cilindro-parabolico>
- [32] <http://www.centralestermosolares.com/centrales-termosolares-fresnel>
- [33] <http://www.centralestermosolares.com/centrales-de-d-parabolico-stirling>
- [34] <https://physics.info/photoelectric/>
- [35] <https://www.energiasolar365.com/articulos/como-funcionan-los-paneles-fotovoltaicos>
- [36] <https://twenergy.com/a/como-funciona-la-energia-solar-fotovoltaica-339>
- [37] <https://www.grupojab.es/como-funcionan-los-paneles-solares/>
- [38] <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>
- [39] http://nol.infocentre.es/ictnol/pdf/manual_biomasa.pdf
- [40] <https://www.areatecnologia.com/electricidad/energia-mareomotriz.html>
- [41] <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-energia-undimotriz-372.html>
- [42] <https://www.smartgridsinfo.es/almacenamiento-energia>
- [43] http://documentos.hibridosyelectricos.com/biblioteca/5.Juan_Puerta.pdf
- [44] <https://powertogasuhu.wordpress.com/caracteristicas-y-ventajas/>
- [45] https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/uploads/ckeditor/attachments/1930/Gu_a_sobre_el_sector_del_almacenamiento_a_media_y_gran_escala_26_01_.pdf
- [46] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81020/TFG%20-%20Adri%C3%A0%20Llad%C3%B3%20-%20Estudio%20del%20almacenamiento%20de%20energia%20mediante%20aire%20comprimido.%20Los%20sistemas%20CAES%20%28Compressed%20Air%20Energ~1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [47] <https://www.technologyreview.es/s/1809/unos-imanessuperconductores-para-el-almacenamiento-de-energia-escala-de-redes>
- [48] <http://www.torre.biz/ampliacion-de-la-mayor-red-de-gas-del-pacifico/>
- [49] <https://www.lenntech.es/electrolisis.htm>
- [50] <https://es.khanacademy.org/science/chemistry/oxidation-reduction/redox-oxidation-reduction/a/oxidation-reduction-redox-reactions>
- [51] <http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2019/v20n2-03.pdf>
- [52] <http://www.funseam.com/phocadownload/smart%20grids.%20tecnologas%20prioritarias.pdf>
- [53] <http://www.ingenieria-analitica.com/analizadores-de-gas-del-aceite-del-transformador-toga.html>
- [54] <https://core.ac.uk/download/pdf/84704803.pdf>
- [55] <https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/ii-congreso-sg-redes-de-comunicacion-para-smart-grids>
- [56] <https://hablemosdeempresas.com/grandes-empresas/smart-grid-la-red-electrica-inteligente/>
- [57] <https://web.fdi.ucm.es/posgrado/conferencias/LuisHernandez-slides.pdf>
- [58] https://www.incibe-cert.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/certsi_seguridad_protocolos_industriales_smartgrid.pdf
- [59] <https://www.incibe-cert.es/blog/seguridad-protocolos-industriales-smart-grid>

- [60] <https://blogs.salleurl.edu/es/networking-and-internet-technologies/iec-61850-como-standard-de-comunicaciones-en-las-smart-grids>
- [61] <http://www.funseam.com/phocadownload/smart%20grids.%20tecnologas%20prioritarias.pdf>
- [62] http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES_1213/LMSGI/curso/xhtml/xhtml22/index.html
- [63] <https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo>
- [64] <https://www.redeweb.com/txt/676/62.pdf>
- [65] Autonell, J., Balcells, J., Barra, V., Brossa, J., Fornieles, F., & García, B. et al. (2011). *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica* (1st ed.).
- [66] http://www.aulawiki.info/redes/T2-capa_fisica.htm
- [67] https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- [68] <https://ingtelecomdecena.blogspot.com/>
- [69] <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/wireless-en-los-smart-grids/>
- [70] <https://www.cervi.es/ES/8-faqs/90-que-es-un-cable-coaxial.html>
- [71] <https://www.aulaclic.es/articulos/wifi.html>
- [72] <https://www.computerworld.es/economia-digital/wimax-y-zigbee-las-nuevas-tecnologias-wireless>
- [73] <https://elandroidelibre.elespanol.com/2015/08/todo-sobre-zigbee-la-tecnologia-ultrabarata-para-comunicacion-inalambrica.html>
- [74] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/f.+Cap%C3%ADtulo+2+-+Familia+IEEE+802.11.pdf+>
- [75] <http://web.dit.upm.es/~david/TAR/trabajos2002/08-802.11-Francisco-Lopez-Ortiz-res.pdf>
- [76] <https://cdsmante5.wordpress.com/especificacion-ieee-802-11/>
- [77] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11677/fichero/Volumen+1%252F3.-WiMAX.pdf>
- [78] <http://isa.uniovi.es/domotica/Temas/T3/T3-GPRS.htm>
- [79] https://www.jmi.com.mx/documento_literatura/diferencia_GSM-GPRS-WiFi-Bluetooth.pdf
- [80] <https://es.ccm.net/contents/680-estandar-gprs-servicio-general-de-paquetes-de-radio>
- [81] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11425/fichero/Memoria%252F8-Cap%C3%ADtulo+5.pdf+>
- [82] <http://www.tsc.uc3m.es/docencia/SyCT/Tema%203/Tema3.pdf>
- [83] https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/Wireless_pos_en_0758-1029-82_v1700.pdf
- [84] http://oa.upm.es/49728/1/PFC_JESUS_JIMENEZ_MOTILLA_JAIME_OCHOVO_PAVON.pdf
- [85] https://www.researchgate.net/publication/305802237_Smart_Grid_Communication_Technologies
- [86] <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/umts.php>

- [87] <https://pdfs.semanticscholar.org/b0de/b5052cd9fe9e1cbdbe481d18fa0eea2c7aa.pdf>
- [88] http://sites.unica.it/smartstateestimation/files/2017/02/2017_WiCom_The-Role-of-Satellite-Communications-in-the-Smart-Grid.pdf
- [89] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1403/1403.0530.pdf>
- [90] <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/12/MITEI-The-Future-of-the-Electric-Grid.pdf>
- [91] <https://www.voltimum.es/novedades-tecnicas/conoces-tecnologia-prime-smart>
- [92] https://www.incibe-cert.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/certsi_seguridad_protocolos_industriales_smartgrid.pdf
- [93] https://www.cnmc.es/sites/default/files/1547617_8.pdf
- [94] <http://www.osgp.org/en/technical>
- [95] http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11905.pdf
- [96] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1132&edi=60&xit=protocolo-dnp3>
- [97] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103900_103999/103908/01.01.01_60/ts_103908v010101p.pdf
- [98] https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/OSG/001_099/001/01.01.01_60/gs_osg001v010101p.pdf
- [99] <https://www.ensotest.com/es/iec-60870-5-104/introduccion-a-la-norma-iec-60870-5-104/>
- [100] <https://medium.com/@xxxamin1314/cu%C3%A1l-es-la-diferencia-entre-modelo-osi-y-modelo-tcp-ip-83829bbd484d>
- [101] <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/ethernet-ieee-8023/>
- [102] <https://www.monografias.com/trabajos/protocolotcpip/protocolotcpip.shtml>
- [103] <https://www.iter.org/proj/inafewlines#1>
- [104] <https://forococheelectricos.com/2016/08/el-coche-electrico-y-las-smart-grids-i-v2g-v2b-y-v2h.html>
- [105] <http://www.nrg5.eu/wp-content/uploads/2018/07/PerCom.pdf>
- [106] http://www.caroligualada.es/Documentos/OMRON/GR_MODBUS_TCP.pdf
- [107] <https://www.wisegrid.eu/about>
- [108] <https://www.h2020-migrate.eu/about/concept.html>
- [109] <https://ses.jrc.ec.europa.eu/migrate>
- [110] <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-energy/grids/migrate>
- [111] <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/proyecto-star>
- [112] <https://www.i-de.es/redes-inteligentes/proyectos/proyecto-star>
- [113] <https://www.smartgridsinfo.es/2019/09/06/proyecto-dream-go-respuesta-demanda-aumentar-atractivo-redes-inteligentes-europa>
- [114] <http://dream-go.ipp.pt/#project>

7.2. Índice de figuras

- Figura 1 <http://vicentelopez0.tripod.com/Electric.html>
- Figura 2 <https://archive.org/stream/centralstationel00hedg#page/n83/mode/2up>
- Figura 3 <https://blog.gruponovelec.com/electricidad/como-funciona-smart-grid/>
- Figura 4 <http://imseingenieria.blogspot.com/2016/04/protecciones-de-una-central-termica.html>
- Figura 5 <https://2www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqs-sobre-energia/capitulo-10/115510-132-ique-contaminacion-producen-las-centrales-termoelectricas>
- Figura 6 <https://www.eurofred.es/productos/calefaccion/>
- Figura 7 <http://petroleumag.com/prospectiva-mundial-de-generacion-electrica/>
- Figura 8 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroelectric_dam-es.svg
- Figura 9 <https://sistemasdelaenergia.wordpress.com/capitulo-1/1-1-sistemas-energeticos-en-chile/central-hidroelectrica-de-embalse/>
- Figura 10 <https://sistemasdelaenergia.wordpress.com/capitulo-1/1-1-sistemas-energeticos-en-chile/central-hidroelectrica-de-pasada/>
- Figura 11 <http://pelandintecno.blogspot.com/2012/11/centrales-de-ciclo-combinado.html>
- Figura 12 <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/mercados/carbon/carbon.htm>
- Figura 13 https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n_integrada_en_ciclo_combinado#/media/Archivo:IGCC_diagram.svg
- Figura 14 <https://www.planetaincognito.es/2017/12/09/una-planta-fusion-nuclear-2030-una-revolucion-centrales-nucleares/>
- Figura 15 <https://energia-nuclear.net/como funciona la energia nuclear.html>
- Figura 16 <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>
- Figura 17 <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>
- Figura 18 <https://eolicaunionhidalgo.wordpress.com/energia-eolica-2/aerogenerador/>
- Figura 19 <https://slideplayer.es/slide/13533036/>
- Figura 20 <https://sites.google.com/site/proenergiza/energias-renovables/energia-solar/central-termica-solar>
- Figura 21 <https://sites.google.com/site/bohiotecnologia/secador-de-manos/centrales-termosolares>
- Figura 22 <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70136/fichero/3.Introduccion.pdf>
- Figura 23 <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>
- Figura 24 http://nol.infocentre.es/ictnol/pdf/manual_biomasa.pdf
- Figura 25 <http://technology-alexia.blogspot.com/2010/01/centrales-termicas-de-biomasa.html>
- Figura 26 http://www.sotaventogalicia.com/recursos/custom/zona_interactiva/comun/imaxes/central_corrientes_marinas.jpg
- Figura 27 http://www.sotaventogalicia.com/recursos/custom/zona_interactiva/comun/imaxes/central_mareomotriz.jpg
- Figura 28 <http://www.proyectofose.mx/2016/11/09/almacenamiento-energia-la-revolucion-tecnologica-silenciosa/>

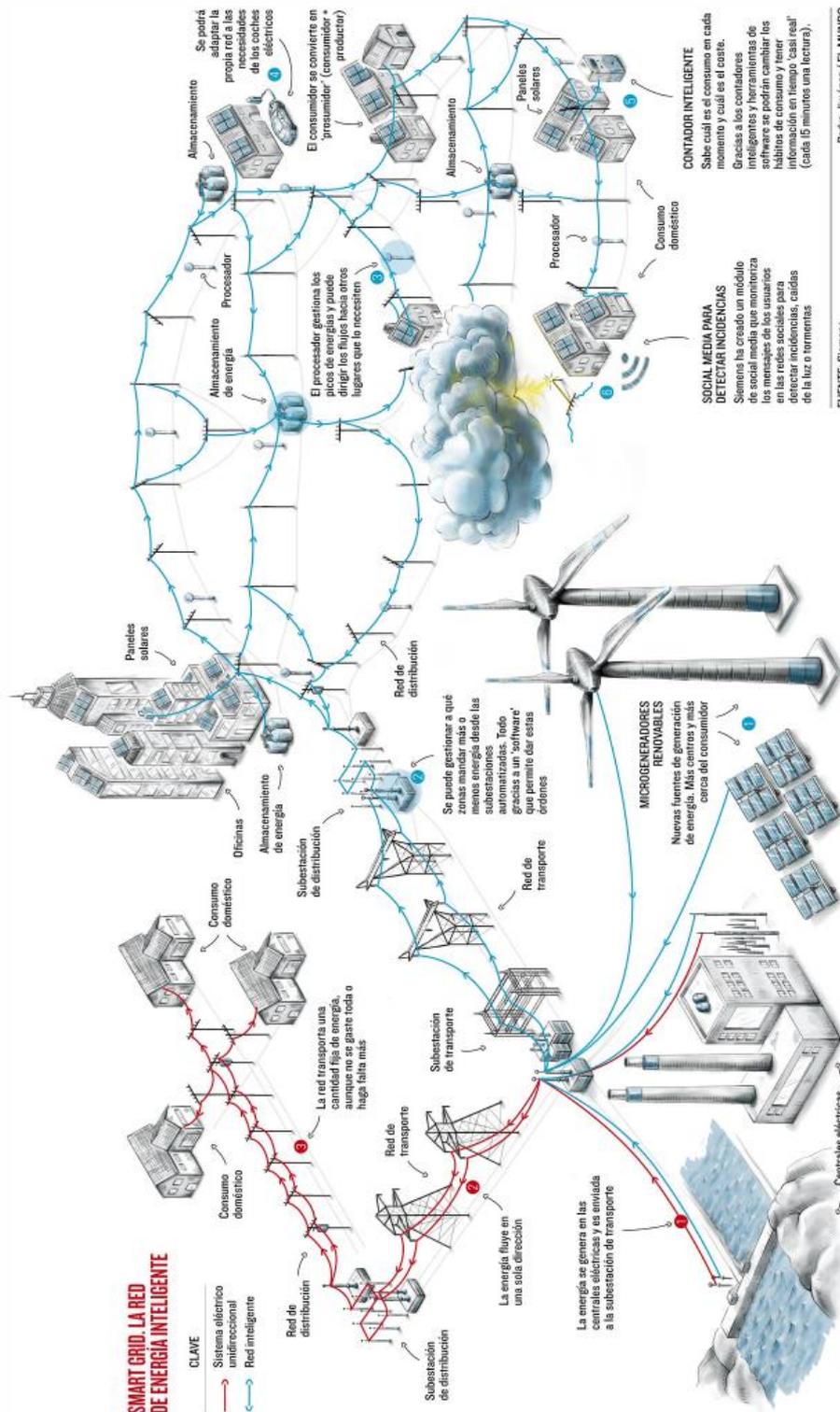
- Figura 29 <https://elperiodicodelaenergia.com/el-volante-de-inercia-quiere-liderar-el-mercado-de-almacenamiento-de-energia-renovable/>
- Figura 30 [https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/uploads/ckeditor/attachments/1930/Gu a sobre el sector del almacenamiento a media y gran escala 26 01 .pdf](https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/uploads/ckeditor/attachments/1930/Gu%20a%20sobre%20el%20sector%20del%20almacenamiento%20a%20media%20y%20gran%20escala%2026%2001.pdf)
- Figura 31 <https://www.solarreserve.com/es/soluciones/industria-de-mineria.html>
- Figura 32 [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5773/fichero/EVA+CLARA+PEREZ+LOB O+PFC.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5773/fichero/EVA+CLARA+PEREZ+LOB+O+PFC.pdf)
- Figura 33 <http://glosariofisicayquimica.blogspot.com/2016/01/electrolisis.html>
- Figura 34 http://www.lhusurbil.eus/web/es_pila_de_hidrogeno_650.aspx
- Figura 35 <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies-and-electrical-energy-storage/electrolysis-and-power-to-gas/power-to-gas.html>
- Figura 36 [https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/uploads/ckeditor/attachments/1930/Gu a sobre el sector del almacenamiento a media y gran escala 26 01 .pdf](https://d3mrnpbbo94dn5.cloudfront.net/uploads/ckeditor/attachments/1930/Gu%20a%20sobre%20el%20sector%20del%20almacenamiento%20a%20media%20y%20gran%20escala%2026%2001.pdf)
- Figura 37 <http://www.funseam.com/phocadownload/smart%20grids.%20tecnologas%20prioritarias.pdf>
- Figura 38 <http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2019/v20n2-03.pdf>
- Figura 39 [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico#/media /Archivo:Redelectrica2.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico#/media/Archivo:Redelectrica2.png)
- Figura 40 <https://instrumentacioncontrol.net/que-es-realmente-un-sistema-scada-diferencias-con-un-dcs/>
- Figura 41 https://www.researchgate.net/figure/Approximate-coverage-and-data-rate-requirements-for-HAN-NAN-and-WAN-Alam-et-al-2017_fig3_319292098
- Figura 42 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117300977>
- Figura 43 https://www.researchgate.net/figure/Cognitive-Radio-based-Smart-Grid-network-architecture-Alam-et-al-2017_fig2_319292098
- Figura 44 <https://www.lanner-america.com/es/infraestructura-critica/puerta-de-enlace-de-seguridad-de-tiot-convergente-para-garantizar-la-proteccion-de-infraestructuras-criticas/>
- Figura 45 <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pila-osi-es.svg>
- Figura 46 <https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo>
- Figura 47 <https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo>
- Figura 48 <https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo>
- Figura 49 Autonell, J., Balcells, J., Barra, V., Brossa, J., Fornieles, F., & García, B. et al. (2011). *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica* (1st ed.).
- Figura 50 <https://ingtelecomdecena.blogspot.com/>
- Figura 51 <https://elcajondelelectronico.com/cable-de-pares/>
- Figura 52 <http://telematicasamigas.blogspot.com/2011/03/networking.html>
- Figura 53 https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Figura 54 https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Figura 55 <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/f.+Cap%C3%ADtulo+2+-+Familia+IEEE+802.11.pdf>

- Figura 56 <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11677/fichero/Volumen+1%252F3.-WiMAX.pdf>
- Figura 57 <https://www.sicomtesting.com/es/blog/dal-1g-al-5g-il-passato-e-il-futuro-degli-standard-gsm-umts-hspa-ed-lte/>
- Figura 58 http://sites.unica.it/smartstateestimation/files/2017/02/2017_WiCom_The-Role-of-Satellite-Communications-in-the-Smart-Grid.pdf
- Figura 59 <https://www.ensotest.com/es/iec-60870-5-104/introduccion-a-la-norma-iec-60870-5-104/>
- Figura 60 <https://industriaautomatica.wordpress.com/2015/09/26/protocolos-para-sistemas-eletricos-iec-60870-5-iec-101/>
- Figura 61 <https://www.ensotest.com/es/iec-60870-5-104/introduccion-a-la-norma-iec-60870-5-104/>
- Figura 62 http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11905.pdf
- Figura 63 https://www.researchgate.net/figure/The-MODBUS-protocol-family-OSI-stack-representation_fig1_228952316
- Figura 64 http://www.caroligualada.es/Documentos/OMRON/GR_MODBUS_TCP.pdf
- Figura 65 http://www.caroligualada.es/Documentos/OMRON/GR_MODBUS_TCP.pdf
- Figura 66 https://www.incibe-cert.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/certsi_seguridad_protocolos_industriales_smartgrid.pdf
- Figura 67 https://www.incibe-cert.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/certsi_seguridad_protocolos_industriales_smartgrid.pdf
- Figura 68 https://www.cnmc.es/sites/default/files/1547617_8.pdf
- Figura 69 https://synergygallery.renesas.com/media/products/95/307/en-US/Introduction_to_G3-PLC_using_Renesas_PLC_technology.pdf
- Figura 70 <http://www.osgp.org/en/technical>
- Figura 71 <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/ethernet-ieee-8023/>
- Figura 72 <https://medium.com/@xxxamin1314/cu%C3%A1-es-la-diferencia-entre-modelo-osi-y-modelo-tcp-ip-83829bbd484d>
- Figura 73 http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf
- Figura 74 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/zigbee-protocol>
- Figura 75 https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:ITER_Logo_NoonYellow.svg
- Figura 76 <https://www.iter.org/proj/inafewlines#1>
- Figura 77 <https://www.wisegrid.eu/about>
- Figura 78 <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-energy/grids/migrate>
- Figura 79 <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/proyecto-star>
- Figura 80 <https://www.smartgridsinfo.es/2019/09/06/proyecto-dream-go-respuesta-demanda-aumentar-atractivo-redes-inteligentes-europa>

ANEXOS

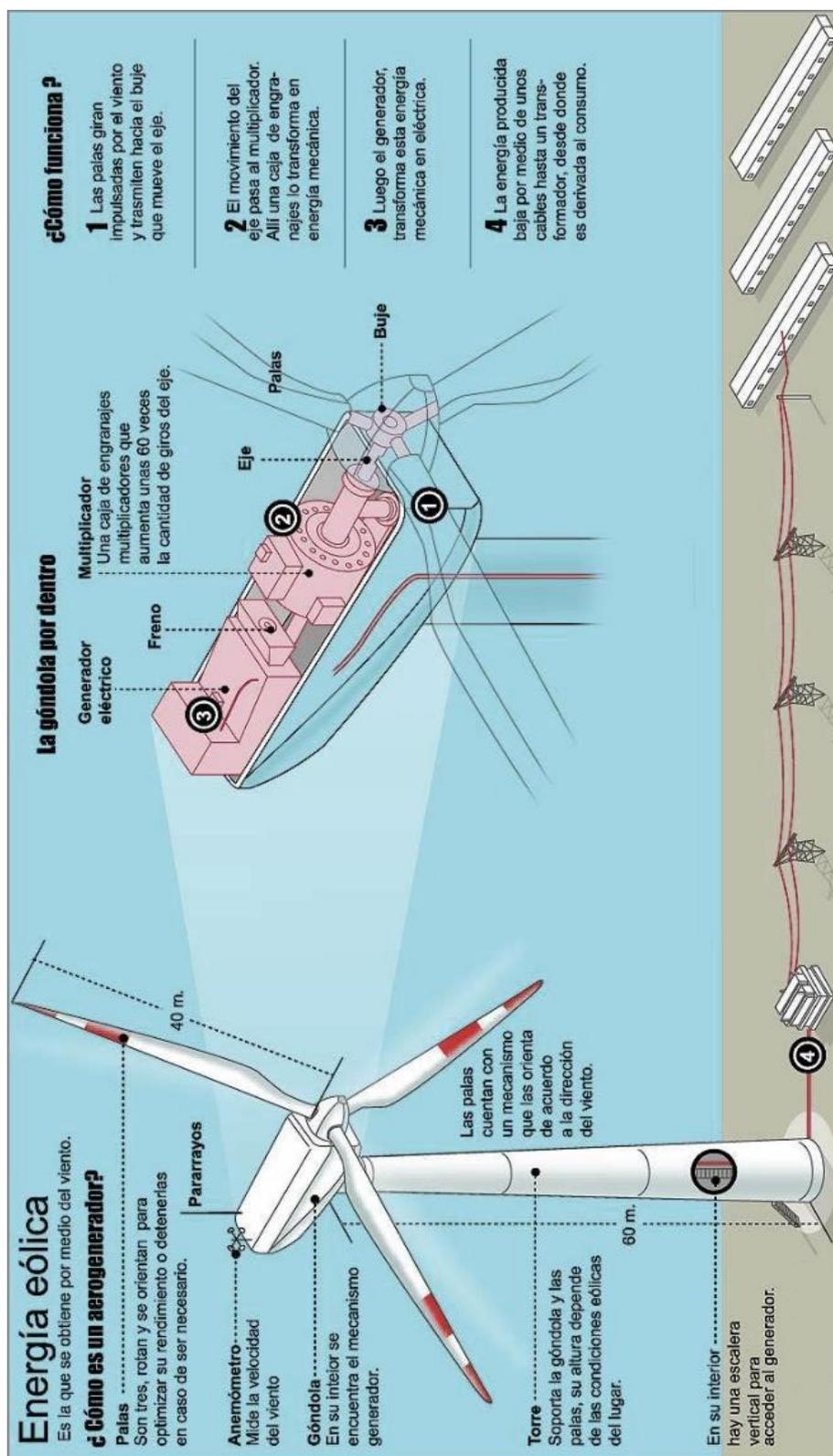
Anexo 1: Infografía explicativa del concepto de Smart Grid.

Fuente: <http://infografia-pedrojimenez.blogspot.com/2015/11/smart-grid-la-red-de-energia-inteligente.html>



Anexo 2: Iconografía del funcionamiento de un aerogenerador.

Fuente: <http://www.cursosenergiasrenovables.net/single-post/2016/1/26/El-aerogenerador>



Anexo 3: Esquema de funcionamiento del ITER

Fuente: <https://www.iter.org/album/Media/7%20-%20Technical>

