



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZA- CIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉC- TRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART G RID: APLICACIÓN A LA REE

AUTOR: ALBERTO PONCE VALERA

TUTOR: CARLOS VARGAS SALGADO

Curso Académico: 2017-18

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1.	OBJETIVOS.....	4
1.2.	EXPOSICIÓN DE CONCEPTOS PREVIOS.....	4
2.	ESTADO DE LA RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA	6
2.1.	INFRAESTRUCTURA TÉCNICA	6
2.2.	SISTEMA DE COMUNICACIONES	11
2.3.	CONTADOR INTELIGENTE.....	12
2.4.	PLANIFICACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.....	14
3.	ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED Y APLICACIÓN A LA REE.....	16
3.1.	OBJETIVOS A PERSEGUIR	16
3.2.	METODOLOGÍA GENERALIZADA DE TRANSICIÓN	16
3.3.	PANORAMA INTERNACIONAL.....	18
3.4.	PROYECTOS PILOTO	21
3.4.1.	QUEBEC Y ONTARIO	21
3.4.2.	OTROS	25
3.5.	ÁREAS DE MEJORA	25
3.5.1.	INFRAESTRUCTURA	25
3.5.2.	AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.....	27
3.5.3.	FLUJO DE CARGA	29
3.5.4.	SEGURIDAD Y FIABILIDAD.....	32
3.5.5.	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	44
3.5.6.	GESTIÓN DE LA DEMANDA.....	54
3.5.7.	IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO	57
4.	CONCLUSIONES Y RESULTADOS.....	61
5.	BIBLIOGRAFÍA	63

RESUMEN

En el siguiente texto se pretende diseñar una estrategia de optimización para dotar de inteligencia a una red eléctrica convencional. Para ello se ha analizado el estado del arte de las tecnologías que envuelven este concepto realizando una revisión bibliográfica de artículos especializados publicados en revistas de alto impacto, informes gubernamentales de distintos países y páginas web de sitios oficiales, entre otros. Después, mediante la comparación entre la Red Eléctrica de España y una red inteligente en pleno funcionamiento de todas sus características, se han discernido los puntos fuertes y débiles del sistema eléctrico español, definiendo unas áreas de mejora determinadas. Así, se concluye que REE posee una infraestructura de telecomunicaciones y de medición inteligente adecuada para soportar la comunicación bidireccional entre los distintos agentes del sistema. No obstante, no se ha implantado la optimización de determinadas funcionalidades claves en una red inteligente, como la autorreparación de la red o la gestión de la demanda, y aún existen carencias como la ciberseguridad, la implantación del vehículo eléctrico o la concienciación de la sociedad a la hora de aprovechar las ventajas que ofrece esta nueva concepción del sistema eléctrico moderno.

Palabras clave: red inteligente, REE, estrategia, optimización, comparación, sistema eléctrico moderno, revisión bibliográfica.

ABSTRACT

In this TFG, an optimization strategy is carried out to provide intelligence to a conventional electricity network. To this end, the state of the art of the technologies that surround this concept has been analyzed by carrying out a bibliographic review of specialized articles published in high impact journals, government reports from different countries and web pages of official sites, among others. Then, by comparing the Electricity Network of Spain and a fully functioning intelligent network of all its characteristics, the strengths and weaknesses of the Spanish electricity system have been discerned, defining certain areas for improvement. Thus, it is concluded that REE has an adequate telecommunications and intelligent measurement infrastructure to support bidirectional communication between the different agents of the system. However, the optimization of certain key functionalities in an intelligent network has not been implemented, such as self-repair of the network or demand response, and there are still shortcomings such as cybersecurity, implementation of the electric vehicle or awareness of society at time of taking advantage of the benefits offered by this new conception of the modern electrical system.

Key words: smart grid, REE, strategy, optimization, comparison, modern electrical system, bibliographic review.

1. INTRODUCCIÓN

Es un momento decisivo para la historia de la humanidad. Nuestra necesidad tecnológica como especie lleva años perjudicando la sostenibilidad de nuestro planeta y su biosfera.

El uso de la tecnología como forma de suplir nuestras necesidades lleva asociado un consumo energético, que puede producirse mediante fuentes renovables o combustibles fósiles, los cuales llevamos utilizando desde la Revolución Industrial.

Actualmente, las tecnologías de generación de energía por medios renovables están en pleno desarrollo y, por lo tanto, hay que mejorar las anteriores infraestructuras para aprovechar nuestros recursos al máximo, y contribuir a crear un futuro sostenible y limpio.

Una de las estructuras tecnológicas más importantes a día de hoy es la red eléctrica, la cual suministra energía enviada desde las centrales a los distintos sectores de la sociedad. No obstante, con los avances actuales, es posible introducir mejoras en la red con varios fines, pero con uno en común: Aumentar la eficiencia para optimizar los recursos disponibles.

Del anterior estamento surge el concepto de red eléctrica inteligente, una tecnología que introduce mejoras en la red convencional. Para ello es necesario seguir una serie de estrategias con el fin de optimizar la estructura ya existente y dotarla con un carácter más moderno.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general, que cubre el diseño de estrategias de optimización de una red convencional, se centrará en la definición de la situación actual de la red eléctrica española, para pasar posteriormente a definir las mayores barreras que impiden proporcionar inteligencia a la red, a nivel tecnológico, económico y social, y considerar diversas mejoras para acercarse lo máximo posible al concepto de red inteligente.

Para llevar a cabo este trabajo, se ha realizado un análisis del estado del arte de la tecnología implicada en la composición de una red inteligente. Se ha buscado información en artículos científicos en revistas especializadas de alto impacto desde 2015 hacia delante; además, se han revisado algunos informes y se han consultado numerosos sitios web.

1.2. EXPOSICIÓN DE CONCEPTOS PREVIOS

Con el fin de sentar las bases de lo que se va a estudiar en el siguiente texto deben introducirse una serie de conceptos, los cuales son fundamentales para entender lo expuesto posteriormente.

En primer lugar, debe entenderse el concepto de red eléctrica convencional como una interconexión entre proveedores y consumidores, con el propósito de suministrar electricidad de los primeros a los últimos. Consta de tres componentes principales:



Ilustración 1. Flujo de energía en una red eléctrica convencional

La generación se produce en las plantas generadoras, utilizando combustibles fósiles (carbón, gas...) o fuentes renovables (solar fotovoltaica, eólica, hidráulica...), el transporte se realiza a través de líneas, que van de las plantas a los centros de transformación, y la distribución se realiza aguas debajo de éstos, entregando finalmente la energía al consumidor final.

Es importante destacar el carácter unidireccional de este tipo de red, ya que en este tipo de red la energía no fluye en sentido contrario, es decir, del consumidor a la red, y este es uno de los puntos que cambia en el concepto moderno de red eléctrica inteligente.

El concepto de Smart Grid o red eléctrica inteligente recoge diversas definiciones de numerosos organismos; (1) define una red inteligente como “aquella que puede integrar de forma eficiente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, de tal forma que se asegure un sistema energético sostenible y eficiente, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro.”

Desde otro punto de vista, el Departamento de Energía de los EE.UU. afirma que una Smart Grid es aquella que cumple con estas 7 características:

- Participación activa de los consumidores
- Manejar todas las posibilidades de generación y almacenamiento
- Manejar nuevos productos, servicios y modelos de mercado
- Calidad en el suministro
- Operar eficientemente y optimizar los activos disponibles
- Autocorregir sobre la marcha cualquier fallo del sistema
- Funcionar con entereza en los desastres, tanto naturales como hechos por el hombre

Al analizar las dos definiciones, quedan patentes una serie de enunciados comunes a ambas:

- **Integración de las acciones de todos los agentes de la red**
- **Garantía de calidad y seguridad del suministro**
- **Sistema energético sostenible y eficiente**
- **Alto nivel de automatización y optimización**

Esta serie de afirmaciones definen lo que debería ser una red eléctrica inteligente totalmente desarrollada de una manera lo más general posible. De esta forma, el esquema presentado en la Ilustración 1 pasaría a ser el siguiente:

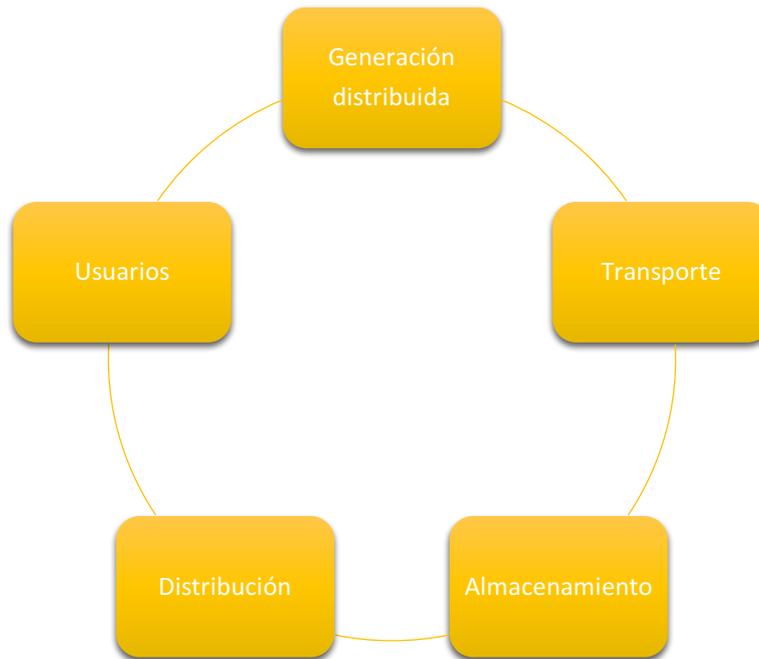


Ilustración 2. Flujo de transmisión de la energía en una Smart Grid

Como vemos, se añade una nueva variable, el almacenamiento, que, a día de hoy, se puede realizar mediante diversas tecnologías, de las cuales se hablará en puntos posteriores.

El hecho de que el consumidor pueda enviar energía a la red implica la existencia de un flujo bidireccional de energía y de información, dos de los aspectos más importantes y transgresores respecto al funcionamiento de una red eléctrica convencional; no obstante, esto conlleva una serie de problemas, que serán tratados más adelante.

2. ESTADO DE LA RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA

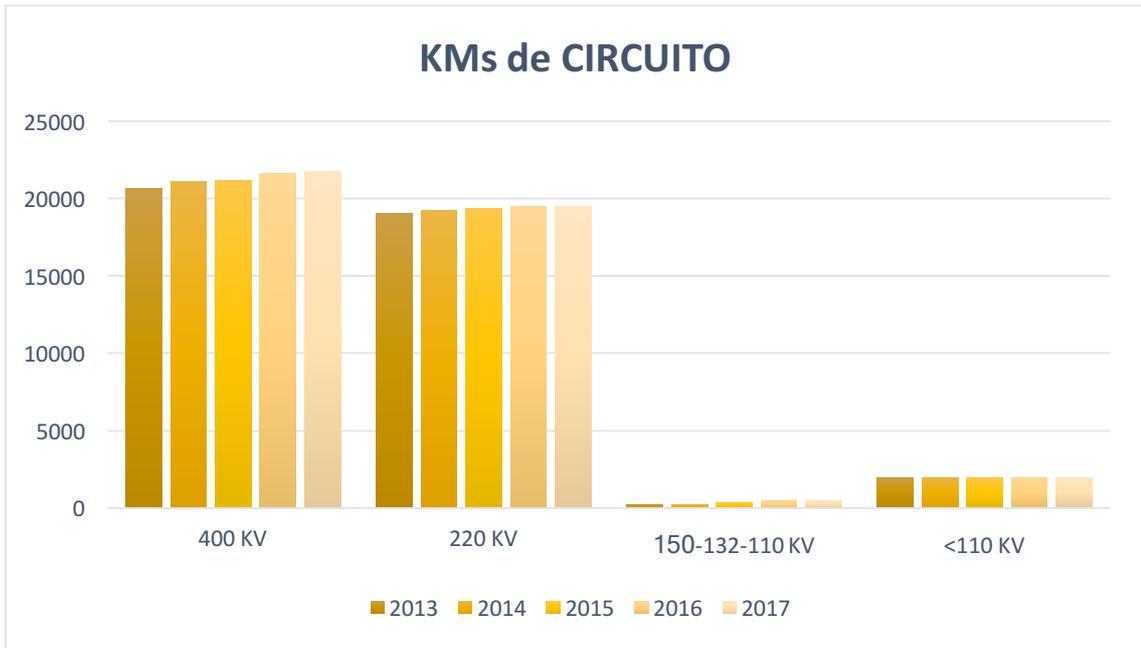
A continuación, se define el estado de la red eléctrica de España en la actualidad.

2.1. INFRAESTRUCTURA TÉCNICA

A día de hoy, Red Eléctrica es responsable del desarrollo y ampliación de la red, de su mantenimiento, de gestionar la transmisión de energía eléctrica entre agentes exteriores y la península y de garantizar el acceso de terceros a la red de transporte en condiciones de igualdad.

La red de transporte está compuesta por diversas infraestructuras, de las cuales se recoge su evolución desde 2013 hasta 2017 en las gráficas 1, 2 y 3 (Todos los datos son acumulados a fecha del 31 de diciembre de 2017, y extraídos de (1); las gráficas son de elaboración propia).

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

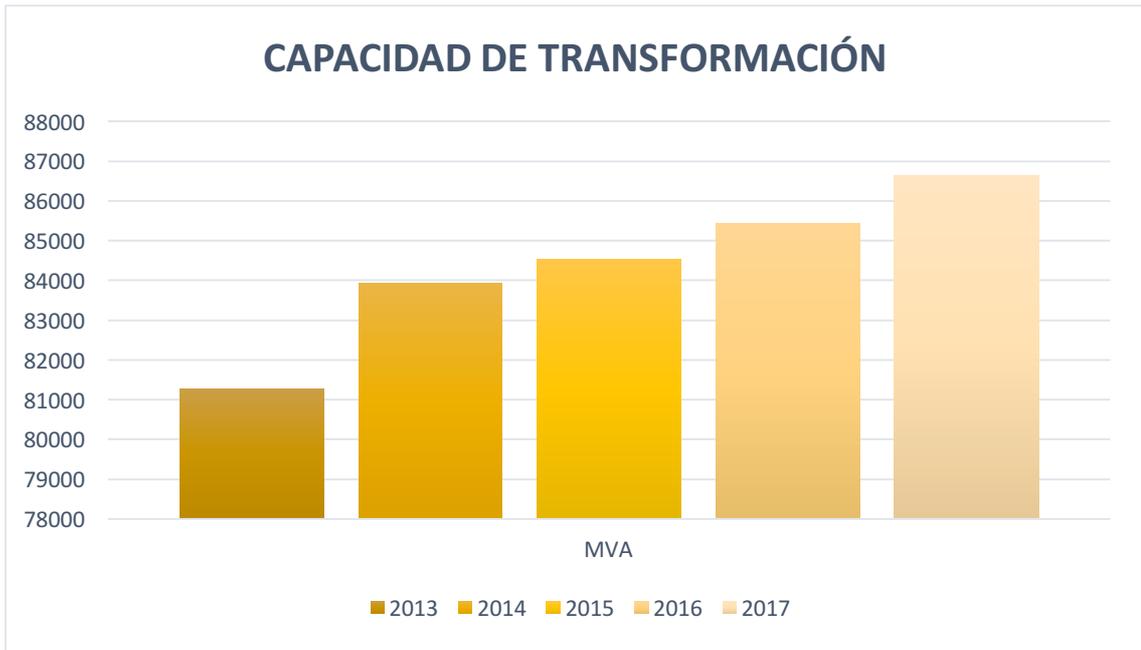


Gráfica 1. Red de transporte peninsular y no peninsular de Red Eléctrica



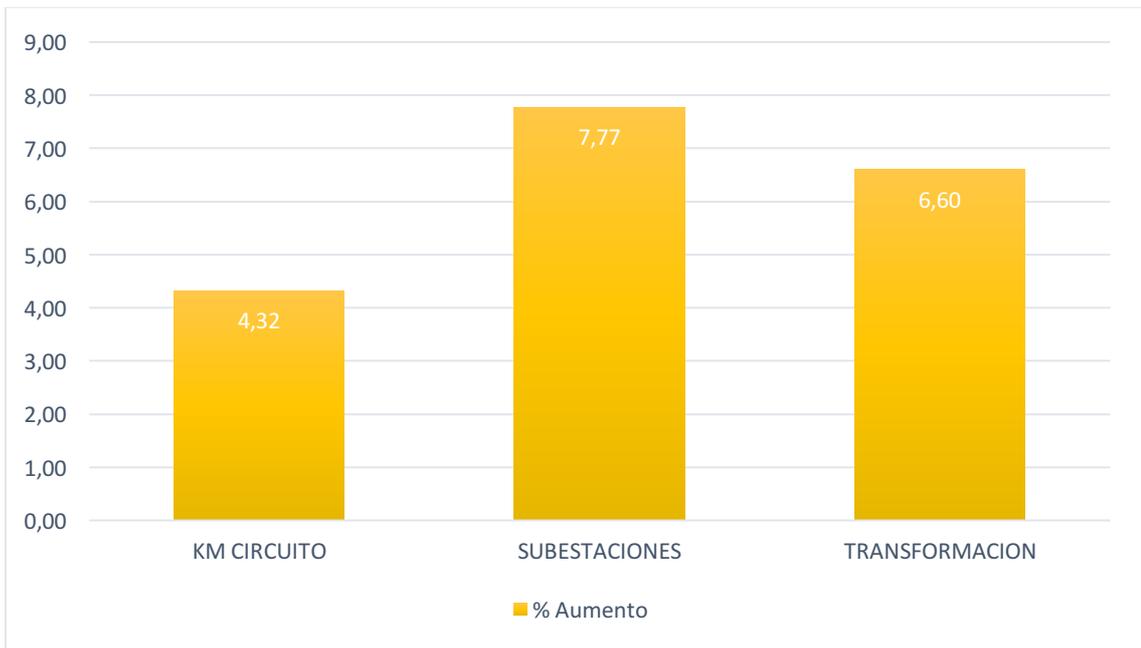
Gráfica 2. Posiciones de subestaciones peninsulares y no peninsulares de Red Eléctrica

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE



Gráfica 3. Capacidad de transformación peninsular y no peninsular de Red Eléctrica

Con el fin de extraer unas conclusiones más claras, se presenta la gráfica 4, en la que se muestra el aumento porcentual de cada tipo de infraestructura en estos 5 años:



Gráfica 4. Crecimiento porcentual por infraestructura de Red Eléctrica del 2013 al 2017 (Elaboración propia)

Al observar la gráfica 4, se puede ver que lo que menos ha aumentado es la longitud de la red de transporte. Esto puede deberse a que las líneas que recorren grandes longitudes ya están desarrolladas, y únicamente faltan líneas que recorran distancias cortas (distribución), lo cual explicaría el mayor número de subestaciones.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Por otra parte, es de esperar que aumente la potencia de transformación si la demografía española sigue una tendencia creciente, con lo que se puede afirmar que este aumento está dentro de un orden aceptable.

Para proporcionar una visión más detallada de la distribución de las líneas eléctricas en el país se presentan las siguientes ilustraciones, actualizadas a fecha de enero del 2018 y extraídas de (1), que muestran las redes de transporte para el sistema peninsular, balear y canario.



Ilustración 3. Mapa de la red de transporte peninsular

2.2. SISTEMA DE COMUNICACIONES

La forma de transmitir información es uno de los problemas más importantes a la hora de implementar carácter inteligente a la red, ya que la seguridad puede verse vulnerada mediante el ataque a las telecomunicaciones, y generar problemas con consecuencias de enorme magnitud.

Una de las posibilidades es utilizar Internet, pero la desventaja de este sistema reside en su vulnerabilidad. Como ventaja, se podría decir que es muy provechoso a nivel económico.

Otra alternativa podría ser utilizar una red propia, que otorga una mayor seguridad, pero resulta más cara, debido al uso de una infraestructura propia.

El sistema de telecomunicaciones español es gestionado a través de la filial Red Eléctrica Infraestructuras de Telecomunicación (REINTEL). Su objetivo consiste en operar la red de telecomunicaciones para mantener un alto nivel de calidad y disponibilidad de la red. Utiliza fibra óptica oscura de alta calidad, y cuenta con una longitud de 33.000 km contando la red de transporte eléctrico y la red ferroviaria. A continuación se muestra el mapa de la red. (2)



Ilustración 6. Mapa de la red de telecomunicaciones de REINTEL

(Extraído de (2))

La situación es análoga a la red de transporte del sistema eléctrico, pero la concentración de las líneas es menor.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Cabe tener en cuenta que esta red se limita al nivel de transporte, y no tiene en cuenta la distribución, el nivel más relevante a la hora de transmitir información en una red inteligente, debido a la gran importancia de la generación distribuida.

Solapando ambos mapas, se obtiene lo siguiente:



Ilustración 7. Combinación de los mapas de líneas de transporte y telecomunicaciones (Elaboración propia)

Como se puede ver, las líneas principales sí poseen infraestructura de fibra óptica para asegurar una monitorización adecuada de su estado en todo momento. No obstante, no se ha encontrado información de la infraestructura de distribución, tanto de líneas eléctricas como de telecomunicaciones.

2.3. CONTADOR INTELIGENTE

Un contador inteligente es un dispositivo de medida que registra la lectura real de los consumos de electricidad de forma remota. Se diferencian de un contador convencional en los siguientes aspectos:

- Realizan una lectura telemática de los consumos, dejando atrás las estimaciones.
- Otorgan la posibilidad de realizar cambios de condiciones contractuales mediante telegestión, eliminando la intervención física en el cuarto de contadores.
- Permiten una gestión más eficiente de la red, reduciendo incidencias y tiempos de interrupción en caso de avería.
- Aunque no está regulado, podrían emplearse para realizar una gestión inteligente de las cargas del usuario.

Según el “Informe sobre la efectiva integración de los contadores con telemedida y telegestión de consumidores eléctricos con potencia contratada inferior a 15 kW (equipos de medida tipo 5) a finales del primer semestre de 2016” emitido por la CNMC el 23 de febrero de 2017, la cantidad total de equipos de medida de tipo 5 se recoge en la Tabla 1.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

	Contadores Totales	Contadores Integrados	% Cont. Integrados	% Crecimiento Implantación
Ene 16	28.092.113	14.994.147	53,37	1,9
Feb 16	28.091.775	15.442.044	54,97	1,6
Mar 16	28.101.412	15.897.501	56,57	1,6
Abr 16	28.094.025	16.400.858	58,38	1,8
May 16	28.104.566	16.986.802	60,44	2,1
Jun 16	28.121.228	17.539.513	62,37	1,9

Tabla 1. Estado mensual del número de contadores inteligentes integrados en el sistema de telegestión y porcentaje del crecimiento de equipos integrados

(Elaboración propia a partir de (3))

La Tabla 1 muestra como a mediados de 2016 el parque de contadores inteligentes para consumidores con potencia contratada igual o inferior a 15 kW se elevaba hasta el 62%. El crecimiento en el semestre analizado equivale al 11% del parque total de contadores de España.

No obstante, este crecimiento se ha disparado en los últimos años, en España el número de contadores inteligentes ha aumentado considerablemente hasta llegar a las cifras actuales, que se pueden ver en la siguiente imagen.

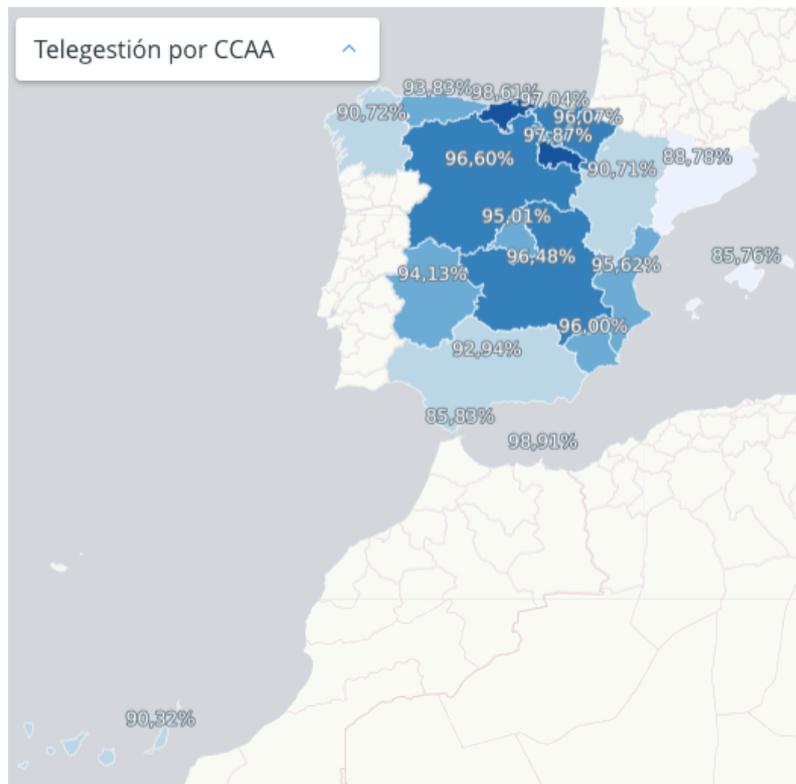


Ilustración 8. Mapa de consumidores domésticos con contador inteligente por Comunidades Autónomas (marzo 2018)

(Extraído de (4))

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Como se puede ver, existe una gran implantación a nivel residencial. No obstante, no se ha encontrado información sobre el sector industrial, que realiza un consumo mucho mayor.

2.4. PLANIFICACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

La planificación de la demanda energética proviene de la necesidad de consumir la misma energía que se está generando simultáneamente, ya que los sistemas de almacenamiento vigentes presentan grandes limitaciones en la actualidad. En cualquier caso, es imprescindible conocer la demanda de energía para organizar de manera adecuada los recursos disponibles.

Para llevar a cabo esta planificación, es importante conocer la maniobrabilidad que ofrecen las distintas tecnologías generadoras de energía. Para ello, se presenta la siguiente tabla, no con el objetivo de entrar en profundidad en las particularidades que provocan esta característica, sino para dar una idea aproximada de la realidad.

Tecnología	Maniobrabilidad
Bombeo Rev.	Alta
Térmica	Alta
Hidroeléctrica	Media/Alta
Solar	Baja
Eólica	Baja
Nuclear	Muy baja

Tabla 2. Maniobrabilidad de las distintas tecnologías de generación de energía

La tecnología nuclear necesita de un elevado número de horas de funcionamiento para resultar económicamente viable debido al elevado coste de su inversión inicial. Las tecnologías renovables (eólica y solar) dependen de la climatología, por tanto, no pueden adaptarse a la demanda requerida por los consumidores. La hidroeléctrica dispone de una elevada capacidad de maniobra, pero depende de la cota del embalse, y ésta del clima al igual que las tecnologías solares y eólicas. Por último, las centrales térmicas poseen una gran maniobrabilidad, y únicamente dependen del combustible para generar energía, al igual que las de bombeo dependen del agua turbinada anteriormente; es por esto por lo que se utilizan en las horas punta para cubrir demandas imprevistas.

Como se puede ver, realizar una planificación energética adecuada, en la que se utilicen de forma óptima los recursos disponibles es un problema muy complejo. Para realizarlo, REE utiliza modelos matemáticos estadísticos proyectivos para simular la curva de demanda, basados principalmente en los modelos de suavizado exponencial.

Además, ajustan estos modelos cada 4-5 horas para obtener una predicción más aproximada a la realidad. En (5) podemos ver en todo momento la previsión realizada, la demanda para la que se realiza la planificación en ese momento, y a fecha posterior, la demanda real.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

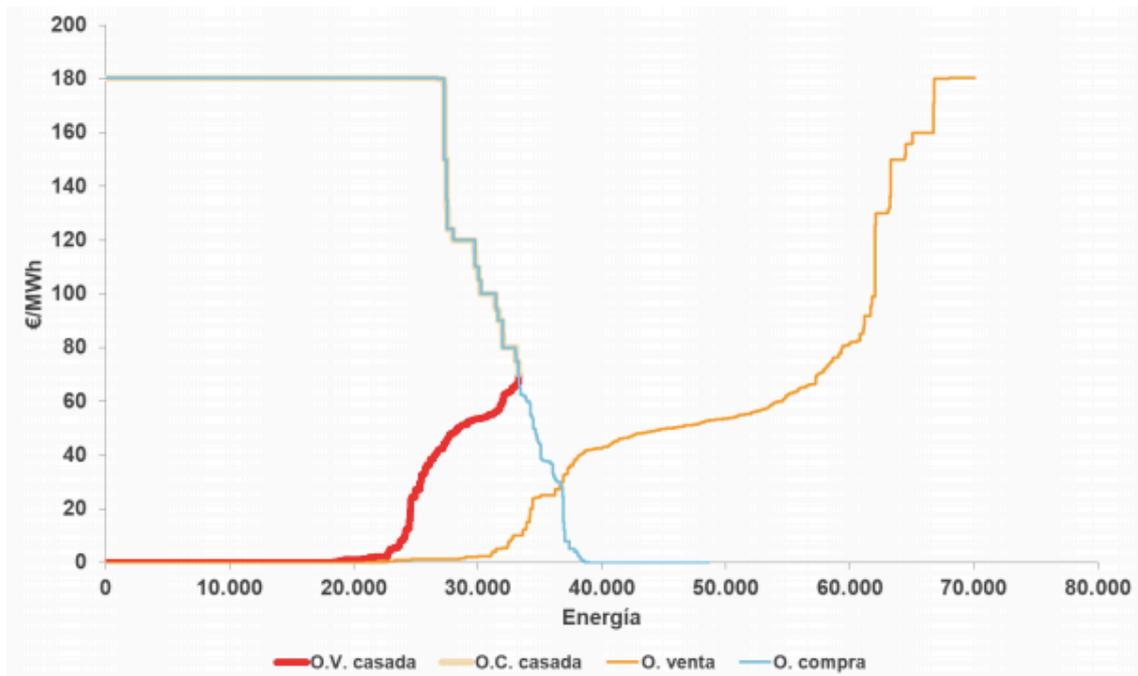


Gráfica 5. Curvas de demanda del día 6 de mayo de 2018

(Extraído de (5))

El error cometido al realizar la predicción es del orden de un 1-2% aproximadamente. No obstante, cabe mencionar que este modelo funciona en unas condiciones preestablecidas, es decir, en un entorno constante. Si las condiciones externas varían bruscamente, este método cometería errores mayores.

No obstante, el hecho de que la demanda no esté controlada conlleva una serie de consecuencias negativas; por ejemplo, el precio de la energía aumenta en las horas de mayor demanda, y disminuye en las horas valle, en las cuales hay menos necesidad de consumo. Para ver esto, se puede observar la siguiente gráfica, obtenida de (6), en la cual se muestra el precio de la energía en el mercado Spot.



Gráfica 6. Casación de la oferta y la demanda de energía eléctrica en el mercado SPOT

(Extraído de (6))

3. ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED Y APLICACIÓN A LA REE

Una vez introducido el estado inicial en el que se encuentra la red eléctrica de España, es posible analizar los puntos fuertes y los puntos débiles, y ver en que ámbitos es necesario focalizar la atención.

3.1. OBJETIVOS A PERSEGUIR

En el punto 1.2. se han visto las características de lo que podría ser una red eléctrica inteligente “ideal”, en el fin de su evolución a partir de una red convencional. Conseguir que la red objeto cumpla con las características expuestas sería el objetivo que se busca. Para ello, se va a proponer una jerarquía con el fin de discernir un orden de prioridad generalizado y analizar el estado en el que se encuentra la red que se pretende estudiar.

3.2. METODOLOGÍA GENERALIZADA DE TRANSICIÓN

Para definir esta metodología, se va a realizar la suposición de que la red eléctrica inicial es aquella que no dispone de ningún tipo de inteligencia, su infraestructura no posee ningún tipo de control más allá del necesario para que su funcionamiento sea correcto, consigue mantener un suministro de energía eléctrica de forma continuada con una calidad aceptable a todos los consumidores que se encuentren conectados a ella y realice las mediciones/estimaciones necesarias para sostener un sistema de facturación básico.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Además, su gestión de recursos y de demanda será limitada, de forma que sí exista una eficiencia mínima para hacer posible la viabilidad técnico-económica de esta red ficticia, al igual que se tendrá información de los parámetros necesarios para mantener cierta estabilidad, como las frecuencias de las ondas de tensión e intensidad en cada nodo, así como el flujo de potencia.

Para resumir esta serie de cualidades se presenta la siguiente tabla.

RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL
Suministro Eléctrico Continuo
Funcionamiento Aceptable
Facturación Básica
Sistema Ineficiente
Control y Automatización Mínimos

Tabla 3. Resumen de características de una red eléctrica convencional

Parece evidente, si se observa la evolución de los sistemas eléctricos en la actualidad, que el primer paso consiste en la implantación de sistemas de medición inteligente que recopilen información sobre los consumos de los usuarios y permitan realizar labores de forma remota siempre que la infraestructura física haya sido preparada para hacer posible estas variaciones. Es por ello que en la mayoría de países se han establecido objetivos para alcanzar un alto porcentaje de sustitución de los contadores convencionales por sistemas de medición inteligente y que permitan telegestión.

Una vez se hubieran implantado los sistemas de medición inteligente en todos los puntos necesarios, se procedería a la modificación de los sistemas técnicos y de comunicación para permitir el flujo bidireccional de carga, ya que una red eléctrica inteligente debería considerar la posibilidad de que los consumidores integren sistemas de generación para, por ejemplo, minimizar costes en su facturación eléctrica, entre otros. Por otra parte, para reducir pérdidas debería potenciarse la generación distribuida, que mediante la integración de fuentes renovables permita flexibilizar el sistema según sea conveniente.

Además, al mismo tiempo deberían implantarse sistemas de automatización que permitieran la toma de decisiones, con el fin de elegir la mejor alternativa posible en cuanto a la optimización de los recursos disponibles en cada momento. Esto se puede realizar mediante diversos algoritmos que se expondrán posteriormente.

Paralelamente a este proceso de renovación desde el punto de vista técnico, también deberán ejecutarse dos procesos más:

- La construcción de una legislación que facilite, por una parte, el desarrollo de la sociedad en cuanto a la creación de un sistema energético lo más eficiente posible, dentro de un margen de sostenibilidad lo más respetuoso posible para el medio ambiente.
- La emisión de información con el fin de concienciar a la sociedad de las posibilidades que ofrece esta nueva forma de entender el sistema eléctrico. Esto debe realizarse de una manera progresiva, para que el usuario entienda su papel como agente activo en el sector energético.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

La correcta explotación y aprovechamiento de la red eléctrica inteligente es una responsabilidad de cada uno de los agentes de la red eléctrica, y de ello depende el avance que se obtiene. Con la infraestructura adecuada se puede conseguir una red eléctrica inteligente; si a esto se le añade legislación y concienciación, se convierte en una herramienta verdaderamente efectiva.

Agente	Función
Generadores	Adaptarse a la demanda de forma eficiente
Operador Técnico	Gestionar adecuadamente el sistema
Servicios Públicos	Optimizar los recursos al máximo
Gran Consumidor	Beneficiarse de todas las ventajas de una red inteligente
Pequeño Consumidor	“ “ “

Tabla 4. Responsabilidades de cada uno de los usuarios de la Smart Grid

Resumiendo, los pasos a seguir podrían resumirse en esta imagen:

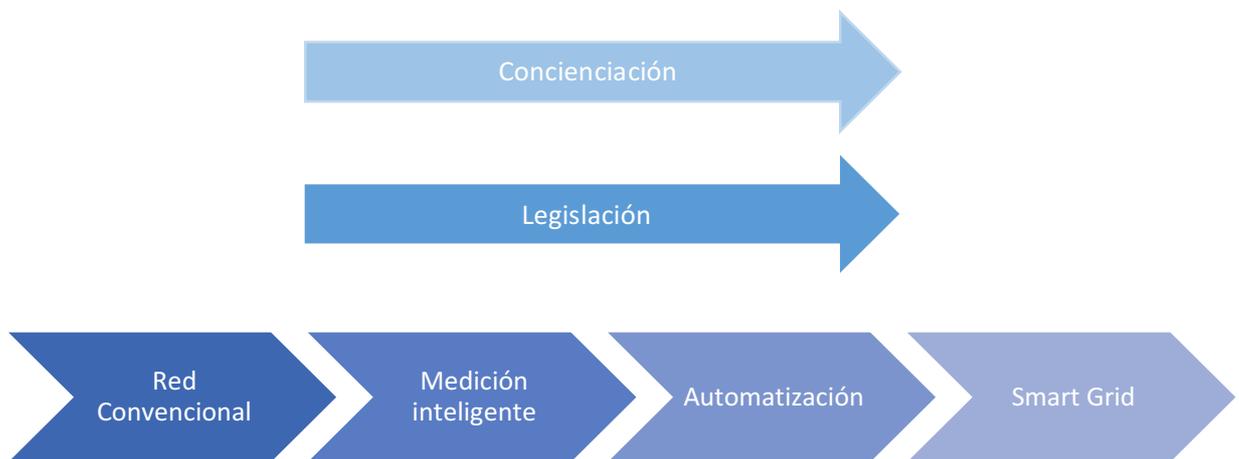


Ilustración 9. Esquema de la metodología general para convertir una red convencional en inteligente

3.3. PANORAMA INTERNACIONAL

Para aportar una visión real del desarrollo de las distintas redes eléctricas en todo el mundo, se va a utilizar la metodología anteriormente expuesta a modo de referencia. Además, se hará hincapié en aquellos países que estén promoviendo con mayor fuerza el desarrollo de este tipo de tecnologías.

Con lo cual, primero se expondrán las políticas de apoyo a las Smart Grids de Europa, Estados Unidos, Japón y China, cada una de ellas partiendo desde un punto distinto y trazando diferentes líneas de actuación para abordar este desarrollo.

Así, según (7), Estados Unidos se centra en la seguridad, fiabilidad y eficiencia a nivel operacional mediante la mejora de la automatización, mientras que Europa intenta conciliar dos enfoques del sistema eléctrico entendido desde el punto de vista de las energías renovables; por una parte, sistemas centralizados y a gran escala, y por otra, sistemas descentralizados y a pequeña

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

escala. Esto podría entenderse como la conciliación de redes eléctricas inteligentes y microrredes.

En Asia el enfoque es distinto. Japón tiene un porcentaje de autosuficiencia energética muy bajo, por lo que su objetivo es crear un sistema que sea capaz de integrar con eficacia las energías renovables, y China busca la renovación de sus sistemas de transmisión de energía mediante tecnología puntera en el área de las comunicaciones mientras promueve una alta automatización de su red, a la par que aumenta las longitudes de sus líneas con la intención de solventar su problema, que se remonta a la transmisión de electricidad en distancias largas.

Para mostrar la implicación de dichos países, se muestra la siguiente tabla, en la que se muestran las distintas iniciativas políticas llevadas a cabo por los mismos: (7)

País	Año	Política de Apoyo	Contenido
América	2007	EISA	Fondos especiales estatales Coordinación a nivel nacional para estandarizar las SGs
	2009	ARRA	Departamento de Energía otorga 4500 millones de dólares Motivar la inversión privada y la investigación de SGs
Europa	2009	3ª legislación para mayor liberalización de los mercados eléctricos y de gas	Fomentar competencia entre proveedores y elección del consumidor
	2010	Cumbres del Consejo Europeo	Promover la investigación de proyectos del ámbito energético
	2012	Directiva de Eficiencia Energética 2012/27/UE	Reducir el consumo de energía primaria en un 20% para 2020
	2014	Regulación 333/2014 y 517/2014 sobre emisiones de CO ₂	Actualizar políticas y fortalecer las políticas climáticas existentes
Japón	2009	Políticas para abordar la crisis económica	Promover desarrollo de energía solar y aplicaciones de ahorro de energía
	2010	Informe de la red de transmisión y distribución de energía de próxima generación	Estabilidad de los sistemas de energía, desarrollo de baterías y garantizar alimentación durante accidentes
	2010	Nuevo plan estratégico de energía	Seguridad, medio ambiente y eficiencia; Promover desarrollo de SGs
	2014	Cuarto plan básico de energía	Garantía, seguridad, eficiencia y reducción de emisiones

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

China	2010	Ley de Energía Renovable	Estipular compras de energía renovable como forma de protección
	2012	12º plan quinquenal relacionado con los principales proyectos de industrialización de ciencia y tecnología de SG	Presentar las ideas y principios de desarrollo de SGs; Establecer objetivos y tareas clave
	2013	Subvención financiera para proyecto de fotovoltaica distribuida	Subsidios para fotovoltaica distribuida en función de las condiciones de los recursos

Tabla 5. Políticas de apoyo a las Smart Grids (Extraído de (7))

En esta tabla se resumen las ideas principales que encierran estas políticas. De cara a la actualidad, estos países se han fijado objetivos, la mayoría centrados en la reducción de emisión y la implantación de contadores inteligentes. Algunos de estos países son:

- **Estados Unidos**, que busca reducir en un 17% los niveles de emisiones de 2005 para 2020 (sin obligación).
- **Corea del Sur**, con un objetivo de reducción de emisiones del 30% para 2020, la instalación de contadores inteligentes en la mitad de los hogares para 2016 y en su totalidad para 2020. Además, la colaboración de la Asociación Coreana de la Smart Grid hace que este país sea líder en este ámbito, y su proyecto piloto en Jeju es una muestra de ello.
- **Europa**, con su objetivo 20:20:20, reducir un 20% las emisiones, aumentar la generación de energías renovables al 20% y mejorar la eficiencia energética al 20% para el 2020. Además, la Directiva Eléctrica 2009/752/EC insta a los miembros de la UE a implementar medición inteligente en el 80% de los consumidores domésticos para 2020
- **Australia**, que busca la integración de energías renovables en un 20% de su sistema para 2020.
- **Canadá**, que apunta a una reducción del 17% de sus emisiones de 2005 para 2020 (sin obligación). Además, el gobierno canadiense apoya el desarrollo de las Smart Grids mediante numerosas entidades, y existen proyectos piloto en Quebec y Ontario, entre otras provincias.
- **Japón**, con unos objetivos muy ambiciosos: aumentar su autosuficiencia energética en un 70% y su ratio de fuentes energéticas de cero emisiones en un 70% para 2030. Por otra parte, Japón promueve las ciudades ecológicas, entre ellas Kansai, Yokohama y Toyota, que integran generación fotovoltaica en los hogares, vehículos eléctricos y centros de gestión de la demanda.
- **China**, que integra el desarrollo de las redes eléctricas inteligentes en sus prioridades en el ámbito energético, las cuales incluyen eficiencia energética, la introducción de energías renovables en su mix y reducir la presencia de carbón en el mismo.

Como se puede ver, la mayoría de países están sentando las bases para dotar su sistema eléctrico de inteligencia con el fin de reducir emisiones y aumentar la eficiencia; es por ello, por lo que están introduciendo infraestructuras de medición avanzada (AMI).

Para ilustrar mejor esta situación, se adjunta la siguiente gráfica:

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

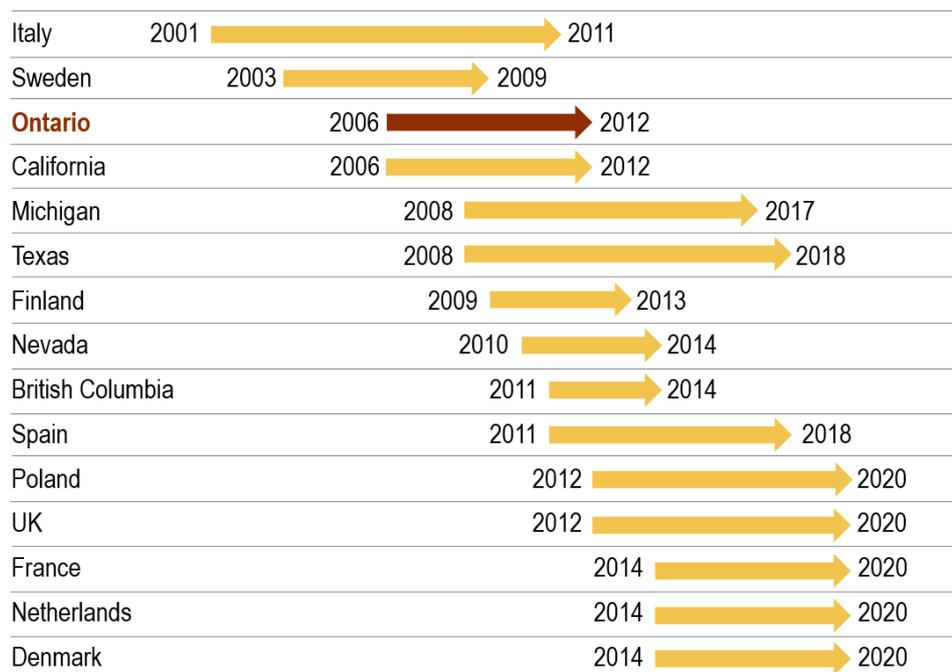


Ilustración 10. Líneas de Implementación de los Smart Meters en múltiples jurisdicciones (Extraído de (8))

Siendo el inicio y el final de la flecha el 0 y el 100% de la integración de los sistemas de medición inteligente (Ontario se señala en rojo porque es el objeto del estudio en este caso) se pueden ver los objetivos marcados por los distintos países.

3.4. PROYECTOS PILOTO

Numerosos países han puesto en marcha proyectos piloto en ciudades que integran estas nuevas formas de entender el sistema eléctrico. En este punto se hablará de las más relevantes, debido a su integración de algunas de las características que definen la red inteligente.

3.4.1. QUEBEC Y ONTARIO

En Quebec ha sido difícil alcanzar el impulso de una política que promueva el desarrollo de las redes inteligentes. Por una parte, los grandes empresarios que podrían realizar inversiones significativas no se pronuncian a favor ni en contra; por otra parte, la opinión pública se ha pronunciado de forma negativa, debido a la preocupación por el impacto a la salud que pueden provocar los contadores inteligentes por su emisión de ondas electromagnéticas. Por lo tanto, el desarrollo de la red inteligente en Quebec se ha enfocado como una forma de actualizar la red y mejorar su seguridad, además de introducir las herramientas necesarias para integrar el coche eléctrico en la red. (9)

Según la anterior fuente, uno de los motivos por los cuales no se promueve el desarrollo de esta tecnología es que Quebec posee aproximadamente un 97% de energía hidroeléctrica en su mix energético, comparable con Noruega, que presenta cifras similares. Esto provoca que no haya ninguna urgencia en un cambio del sector eléctrico.

Por otra parte, en Ontario se observa un gran avance en cuanto al marco legislativo y político, impulsado desde la disolución de la empresa monopolista Ontario Hydro en 1990. Esta región

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

canadiense ha abrazado esta tecnología y las empresas públicas han realizado numerosas inversiones, en esta tabla se recogen las principales:

Microgrid Demonstration	Demostración de una microrred en Vaughan, con energía eólica y solar, tres tipos de tecnología de almacenamiento de energía, una estación fotovoltaica, recarga para coche eléctrico y un generador de gas natural
Green Button – Connect My Data	Iniciativa llevada a cabo por numerosas empresas de servicios públicos, para proporcionar a los clientes información sobre su uso de la energía, mediante aplicaciones móviles y web
Flywheel Energy Storage	Este Proyecto tiene el primer dispositivo volante de almacenamiento de energía. Este sistema funciona acelerando un rotor a altas velocidades y, mediante el principio de conservación de la energía, almacenando energía rotacional para proporcionar regulación a la red de Ontario en tiempo real
Hydro One’s Smart Zone	El proyecto tiene cuatro objetivos; la integración de la generación distribuida, la automatización de la distribución, la restauración de interrupciones habilitada por AMI y la supervisión del sistema de distribución. Se está evaluando su implementación en otros territorios de su servicio
Outage Management	Muchas empresas de servicios públicos han adoptado soluciones de interrupción. Estas soluciones analizan datos de medidores inteligentes, brindan información de interrupciones a los clientes a través de mapas de interrupción, y verifican la restauración de energía.
Automated Switching	En la ciudad de Burlington se encuentra una red con capacidad de autorreparación (4500 clientes). Burlington Hydro y S&C Canada han instalado conmutadores automatizados en 55 ubicaciones. Este sistema de conmutación automatizada aumentó la fiabilidad y la resistencia de la red en Burlington. Ahora Burlington puede restaurar en minutos o segundos interrupciones que tardarían horas en ubicarse.

Tabla 6. Proyectos en desarrollo relacionados con las Smart Grids en Ontario

(Extraído de (8))

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA
CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Estos proyectos se han aplicado a la red de Ontario, que presenta la siguiente infraestructura, además de una previsión realizada a 5 años vista, mediante la cual se han efectuado todos los cálculos.

Característica	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Consumidores residenciales	4.619.340	4.683.395	4.746.955	4.812.291	4.878.385	4.943.386
Consumidores comerciales	438.676	444.759	450.795	457.000	463.276	469.449
Consumidores industriales	58.114	58.920	59.719	60.541	61.373	62.190
Empresas de transporte	3	3	3	3	3	3
Empresas de distribución	73	73	73	73	73	73
Km. Dist.	198.817	199.757	200.689	201.648	202.618	203.572
Núm. generadores	11.017	11.069	11.121	11.174	11.228	11.281
Subest. dist.	2.130	2.140	2.150	2.161	2.171	2.181
Margen de reserva (%)	18	18	19	20	20	20
Capacidad renovable	7.442	8.330	8.697	9.338	10.162	10.699
Pronóstico de energía (TWh)	145	147	147	149	152	155
Pronóstico de pico (TWh)	24.275	24.579	24.665	25.024	25.511	25.805

Tabla 7. Características de la red de Ontario y previsiones en los próximos 5 años

(Extraído de (8))

En los datos expuestos en la tabla se aprecian aumentos demográficos en el número de consumidores y en la demanda, al igual que en la infraestructura de la red.

Sin embargo, en el intento de modernizar la red de Ontario se han presentado diversos tipos de barreras, en diferentes ámbitos. Aquí se exponen las principales:

- Las **barreras técnicas**, aquellas que impiden que una empresa pueda diseñar un proyecto de red inteligente económicamente rentable. Estos problemas provienen de la creación de un protocolo común de comunicaciones, entre otras cuestiones que se detallan a continuación:
 - La inmadurez tecnológica propia de tecnologías subyacentes para un gran número de capacidades de las redes inteligentes, lo que conlleva mayores costes y operación inestable, que implica tasas de fallo más altas. Esto produce que a las empresas les resulte más costoso lanzar iniciativas de modernización de la red, ya que el coste puede sobrepasar los beneficios o el éxito operacional/financiero puede no estar garantizado. Todo esto no casa con el alto porcentaje de fiabilidad y seguridad que debe conseguir el sistema

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

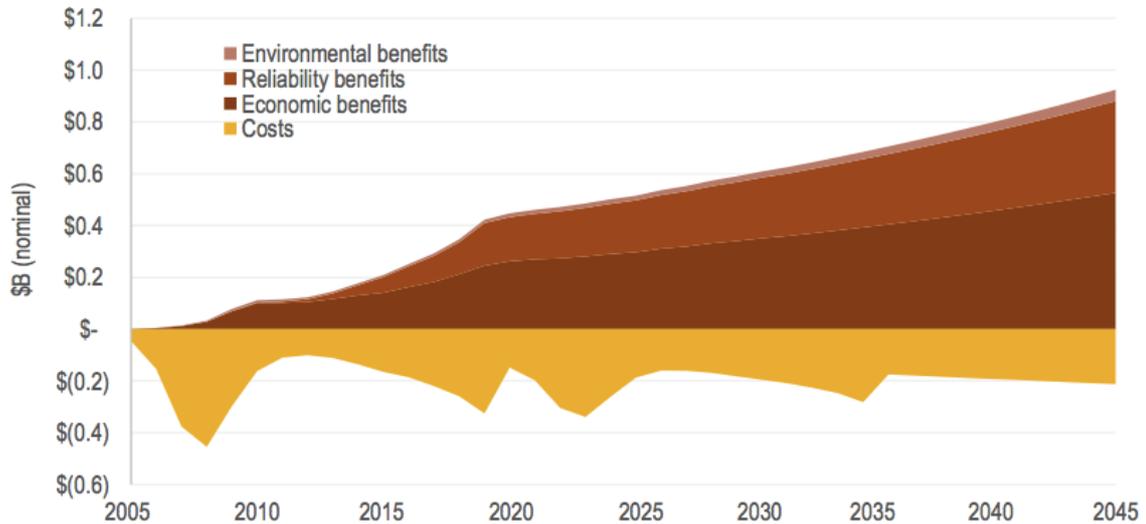
eléctrico, por lo que la incertidumbre limita la posible expansión de estas tecnologías.

- Los protocolos estándar de comunicaciones están evolucionando. Esta falta de interoperabilidad conduce a costos adicionales, mayores tiempos de ejecución de proyectos, entre otros. A esto se añaden los riesgos que se producen al apostar por una solución particular, ya que pueden limitarse posibles soluciones en el futuro. Por una parte, se está empezando a utilizar Ethernet o Wi-Fi, incorporando estos protocolos a la red de comunicaciones existente. Por otra parte, también se está utilizando DNP3 para admitir las comunicaciones bidireccionales entre los centros de control y las unidades terminales remotas. Este protocolo define el nivel de seguridad para la autenticación y el cifrado adecuados de los mensajes. A día de hoy, la industria todavía no ha llegado a un consenso sobre protocolos comunes para los equipos de redes inteligentes.
- **Barreras comerciales**, que impiden que una empresa lleve a cabo un proyecto de red inteligente rentable. Generalmente provienen de la estructura regulatoria o comercial de la industria, la fragmentación de la propiedad en el sector de la distribución, las limitaciones financieras de los accionistas o la empresa o la falta de mano de obra cualificada. Concretamente, estos son los principales problemas:
 - Beneficios difusos y costes concentrados, concretamente en el sector de la distribución. Los beneficios, sin embargo, se reparten entre generación, usuario final, entre otros que pueden repercutir en toda la sociedad, como una reducción de las emisiones. Esto puede producir que algunos sectores no muestren interés por esta renovación. La política y la regulación pueden ayudar a solventar este problema.
 - El sector de la distribución en Ontario está atravesando un momento de renovación, y está sustituyendo los activos instalados hace 20, 30, 40 e incluso 50 años. Los fondos para estas inversiones provienen de accionistas municipales y provinciales que eligen reinvertir sus ganancias. No obstante, este sistema financiero tiene un límite y en algún momento será necesaria la introducción de nuevo capital. Esto, sumado al hecho de que, con la integración de las energías renovables en el sistema, se está dando paso a nuevas formas de operación, hace que se abra una ventana de oportunidad.
 - La distribución en Ontario se encuentra fragmentada, de forma que existen 42 empresas en el sector prestando servicios a menos de 25.000 clientes, 22 empresas que atienden entre 25.000 y 100.000 clientes y 8 empresas que atienden a más de 100.000 clientes. Esto conlleva problemas de escala y limita el acceso y control de los activos de la red requeridos para el despliegue de ciertas funciones de la red inteligente. Generalmente, no es viable para las pequeñas empresas realizar grandes inversiones.
 - El marco regulatorio, si bien no crea barreras explícitas para el desarrollo de las redes inteligentes, impide el impulso de inversiones, concretamente en la evaluación de estas inversiones, y en los incentivos o penalizaciones por la calidad del servicio. Una comprensión menor de la naturaleza y magnitud de los beneficios y riesgos de las inversiones en redes inteligentes, sumada al hecho de que el marco normativo actual limita los incentivos, produce que las empresas opten por soluciones tradicionales.
- **Barreras culturales**, se relacionan con la respuesta colectiva a las tecnologías transformadoras. Pueden llegar a afectar a las decisiones de una empresa a la hora de explorar soluciones innovadoras para la mejora de una red tradicional. Entre ellas encontramos la falta de conocimiento compartido, que retrasa los despliegues al no

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

ofrecer soluciones para problemas que puede que ya se hayan resuelto por otra empresa, o los comportamientos reacios a asumir riesgos, principalmente económicos.

A pesar de todas estas barreras, las previsiones económicas, así como el balance de beneficios-costes resulta positivo en un futuro no muy lejano:



**Gráfica 7. Balance anual de beneficios y costes del escenario propuesto
(Extraído de (8))**

3.4.2. OTROS

Otras ciudades se han sumado a la lista de proyectos piloto de redes inteligentes, como las siguientes:

- Jeju, en Corea del Sur, donde se proporciona un marco legal para proyectos sostenibles de redes inteligentes, su desarrollo, puesta en marcha y comercialización.
- Kansai, Yokohama y Toyota, con integración de tecnología fotovoltaica y de recarga de vehículos eléctricos, gestión de demanda y sistemas de monitorización a tiempo real en los hogares.

No se ha encontrado información más detallada de estos proyectos piloto.

3.5. ÁREAS DE MEJORA

En este apartado se tratarán los principales puntos que diferencian una red inteligente de una red convencional, destacando los mayores avances obtenidos en la actualidad y comparando lo expuesto con la tecnología existente en la Red Eléctrica de España.

3.5.1. INFRAESTRUCTURA

Las características de la red inteligente requieren de una nueva arquitectura capaz de integrar nuevos tipos de control para asegurar el correcto funcionamiento y explotación del sistema eléctrico.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

La arquitectura adicional de la red inteligente se diferencia de la red convencional en los siguientes puntos: (10)

Infraestructura de medición avanzada (AMI)

Este sistema está constituido por varios componentes físicos y virtuales, conectados mediante redes de comunicación a distintos niveles jerárquicos. Normalmente se compone de:

- Contadores inteligentes: Juegan un papel esencial en la comunicación bidireccional entre el cliente y la distribuidora. Miden los consumos a tiempo real y permiten precios dinámicos y la ejecución de comandos de control mediante telegestión.
- Red de banda ancha: Es el soporte de las comunicaciones bidireccionales. Puede incluir diferentes arquitecturas y medios, como redes móviles, comunicaciones mediante líneas de potencia o redes basadas en IPs.
- Sistema de gestión del medidor de datos (MDMS): Componente central de la AMI. Actúa como una base de datos capaz de almacenar, gestionar y analizar datos de los usuarios. Podría equipararse a los concentradores de datos utilizados por REE. Éstos elaboran la siguiente información a partir de los datos recibidos:
 - Mejor valor horario de energía en cada punto frontera/agregación
 - Balances de energía por puntos frontera
 - Balances de energía por unidades de programación
 - Cálculo de pérdidas de las redes de transporte y distribución
 - Estimación de medidas en aquellos puntos en los que no se disponga de lecturas reales
 - Estimación de agregaciones cuando no se disponga de medidas de las mismas
 - Detección de discrepancias de los equipos de medida con comprobantes/redundantes
 - Detección de errores por otros métodos de estimación

La red española posee esta infraestructura, sin tener en cuenta que la infraestructura de medición avanzada no está totalmente integrada.

Infraestructura de comunicaciones

Esta arquitectura está compuesta por conexiones cableadas e inalámbricas. Los componentes que funcionan con cableado se clasifican en:

- Comunicación de líneas de potencia
- Fibra óptica

Los sistemas inalámbricos se clasifican en:

- Redes por satélite (GPS)
- Microondas
- Comunicación celular (Similar a un teléfono móvil)
- Radios cognitivas
- Comunicaciones IEEE 802.15
- Redes inalámbricas malladas

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Las tecnologías inalámbricas ofrecen más ventajas que los medios cableados, como bajos costes de instalación y mantenimiento, o mayor flexibilidad y rapidez de implementación. Además, las comunicaciones inalámbricas proporcionan alta velocidad de transmisión de datos, amplia cobertura y gran ancho de banda.

No obstante, existen distintos retardos de tiempo a la hora de enviar datos de un punto de la red a otro. Estos retardos se deben principalmente a los siguientes motivos:

- Transmisión de paquetes de datos
- Enrutamiento
- Propagación
- Envío en serie

Debido al rápido procesamiento de datos, estos retardos se minimizan en gran medida.

Red Eléctrica de España utiliza el Sistema de Información de Medidas Eléctricas (SIMEL), que recibe a través de concentradores los datos horarios de energía de todos los contadores inteligentes instalados en España y situados en los siguientes nodos frontera:

- Entre instalaciones de generación
- Conexiones internacionales
- Entre redes de distribución y transporte
- Entre distribuidores
- Puntos de suministro

Red Eléctrica de España utiliza canales de comunicación entre los concentradores y los registradores basados en RTC (reloj en tiempo real), RDSI (red digital de servicios integrados), GSM (sistema global para comunicaciones móviles) o cualquier tecnología que combine las anteriores o las sustituya de forma efectiva.

Con lo cual, se observa que la red eléctrica española posee la infraestructura adecuada para soportar las funcionalidades de la red inteligente, a excepción de la infraestructura de medición avanzada, la cual se encuentra en fase de implantación, como ya se ha explicado anteriormente.

3.5.2. AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

El control y la automatización es un punto fundamental de cualquier sistema eléctrico, indispensable para garantizar la estabilidad de la red. Se puede afirmar que un sistema de potencia es estable cuando todos los parámetros de control se encuentran en estado estacionario. Además, se define la robustez del sistema como la variación de la estabilidad de la red ante fallos y perturbaciones.

Actualmente, existen diversos elementos para mantener el control del sistema eléctrico:

- Generador síncrono
- Compensador síncrono (para potencia reactiva)
- Baterías de condensadores
- Agentes independientes que pueden ofrecerse para entregar potencia según los parámetros indicados por el operador del sistema

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Mediante estas herramientas, puede realizarse el control, que se divide en dos partes fundamentales: (11)

- Carga-frecuencia (PF): Relaciona las variaciones de frecuencia con las variaciones de potencia activa.
- Reactiva-tensión (QV): Relaciona las variaciones de los módulos de tensión con las variaciones de potencia reactiva. Esta relación presenta un carácter local, ya que depende de las tensiones en los extremos de las líneas, y se debilita a medida que los nudos están más alejados.

Estas interacciones presentan un ligero acoplamiento. No obstante, sus tiempos de control son muy diferentes. QV es muy rápida (unos segundos), mientras que PF requiere algunos minutos debido a la inercia de algunos elementos del sistema.

Para controlar las tensiones y las frecuencias se utiliza una estructura jerarquizada y desacoplada, realizando un control independiente para cada una de las interacciones:

- 1º nivel: Nivel local.
- 2º nivel: Referido a regiones de control. Más lento que el 1º nivel.
- 3º nivel: Integra todo el sistema. Se optimiza el sistema con un reparto óptimo de las cargas.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de control aproximados que se manejan para cada uno de los niveles.

Nivel de Control	PF	QV
1º	2-20 s	1-2 s
2º	20 s-2 min	5-10 s
3º	>10 min.	

Tabla 8. Tiempos de control para cada nivel (Extraído de los apuntes de Sistemas eléctricos y tecnología eléctrica (11))

A continuación se profundizará en los tres niveles de control que se emplean para mantener la estabilidad de las tensiones y las frecuencias, así como para asegurar un funcionamiento correcto.

Control primario

En cuanto a la tensión, su objetivo es mantener un valor determinado en cada nudo del sistema. Este control se denomina AVR (Automatic Voltage Regulator) y se realiza de forma automática en el generador síncrono en cuestión de segundos, mediante un bucle cerrado.

Para el control PF, la frecuencia debe mantenerse dentro de un rango aceptable, en caso contrario, los motores podrían funcionar a velocidades no nominales y los automatismos podrían perder su referencia temporal. Además, se asume que todos los nudos del sistema poseen el mismo valor de frecuencia, por lo que el problema se considera global.

La frecuencia está relacionada con el equilibrio entre generación y demanda. Por tanto, debe haber un sistema de control que regule la potencia mecánica de entrada a los generadores síncronos, para que la frecuencia permanezca estable ante las variaciones de carga.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Por otra parte, se debe cumplir con los compromisos de intercambio de energía entre áreas para asegurar el funcionamiento del despacho económico, así como reservar determinada generación para hacer frente a posibles desequilibrios.

Control secundario

Se realiza de forma automática mediante algoritmos, es robusto y estable, y su tiempo de respuesta es del orden de segundos. Únicamente opera cuando el control primario se ha estabilizado.

Su funcionamiento se basa en el control de nudos piloto, que representan el funcionamiento de áreas de control, que contienen un número significativo de nudos. A cada nudo piloto se le asigna un conjunto de generadores, encargados de mantener la tensión de consigna. En cada paso de tiempo se resuelve un problema de programación cuadrática para determinar las acciones de los generadores dentro de un área determinada. Los nudos piloto deben estar muy bien elegidos para representar adecuadamente el conjunto del sistema.

El control primario permite equilibrar la generación y la demanda, pero no logra resolver los siguientes efectos:

- La frecuencia se desvía de su valor
- Se desajustan los flujos de potencia programados entre áreas

Para resolver esto se utiliza el Control Automático de Generación (AGC), que regula de forma centralizada devolviendo los valores de referencia de frecuencia y emite las consignas de variación de generación.

Control terciario

Para que el control secundario sea factible, la generación debe disponer de la energía de reserva suficiente para compensar las variaciones de demanda. El objetivo del control terciario es restituir esta reserva adaptando la programación de los generadores. Actúa con un margen de tiempo más amplio, de 15 minutos aproximadamente.

Este control es válido para la red convencional, pero para hacer efectivas el resto de características de la red inteligente es necesaria la implementación de determinados algoritmos, la mayoría problemas de optimización, con el objetivo de hallar la mejor solución ante un suceso determinado, como en el caso de la autorreparación de la red, entre otros, que se expondrán a continuación.

3.5.3. FLUJO DE CARGA

El estudio del flujo de carga consiste en obtener las condiciones de operación de un sistema de energía eléctrico, concretamente las tensiones (módulo y fase) en cada nodo y el flujo de la potencia en líneas y transformadores.

La solución de este problema es compleja y requiere el uso de ecuaciones no lineales, por lo que se recurre al análisis numérico, utilizando métodos iterativos hasta converger a la solución final. Entre ellos se encuentran: (11)

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Método de **Gauss-Seidel**, para problemas lineales, útil para sistemas pequeños, pero no se utiliza para sistemas grandes debido a su lenta convergencia, que puede no llegar a materializarse dependiendo de los valores iniciales.
- Método de **Newton-Raphson**, para la resolución de problemas no lineales, con la misma rapidez de convergencia sin depender del tamaño del sistema, es el método que se usa en la práctica.

Mediante el uso de estas herramientas se obtiene la optimización del flujo de carga (OPF), que configura la situación óptima para aprovechar al máximo los recursos disponibles en el sistema eléctrico, y puede y debe realizar una red eléctrica inteligente.

No obstante, existe una diferencia crucial entre el estudio del flujo de carga para una red convencional y una red inteligente. La red inteligente otorga al sistema la posibilidad de que el flujo de potencia sea bidireccional, debido a la descentralización de la generación. Esto añade complejidad al problema, tanto a nivel computacional como logístico.

Para abordar este problema, es común hablar de funciones objetivo, variables que pueden ser objeto de optimización y utilizarse para resolver el problema de forma parcial. En (12) se enumeran las siguientes funciones objetivo.

- Coste de generación de potencia activa
- Coste de generación de potencia reactiva
- Potencia suministrada a la red desde una fuente externa
- Pérdidas de potencia activa
- Emisiones de carbono
- Ajuste/Reducción de la carga
- Conmutación de la posición de toma y de los bancos de condensadores
- Bienestar social

Cada una de estas variables se puede formular matemáticamente, para después crear modelos o algoritmos que busquen la solución que optimiza la variable deseada. Estas funciones objetivo, así como sus restricciones más relevantes, pueden verse afectadas por el método escogido para realizar la optimización. Aquí se presentan los enfoques matemáticos más importantes propuestos en (12), propensos de ser implementados en una red inteligente.

Optimización del flujo de carga distribuido y paralelo (DPOPF)

Este método se propone para sistemas de transmisión de redes inteligentes que integran Unidades de Procesamiento (PU) en cada uno de sus nodos, y minimiza el sub-problema de optimización sin restricciones para cada nodo. Se combinan dos métodos en el proceso de resolución:

- El método de **programación recursiva cuadrática** (RQP)
- El método del **gradiente proyectado de Lagrange** (LPG)

Para mantener la sincronización computacional del algoritmo bajo la llegada de datos asincrónicos, se propone un modelo de control de Red de Petri. También se propone un árbol de convergencia directa para implementar condiciones de fin del algoritmo.

Este algoritmo es más efectivo según aumenta la incertidumbre de los datos. Las principales incertidumbres consisten en la variabilidad de generación de las fuentes renovables, demanda

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

variable en el tiempo y coeficientes de costes variables de los recursos energéticos no renovables. Los resultados numéricos demuestran que el algoritmo es capaz de considerar variaciones rápidas de la potencia generada por fuentes renovables, así como diversas incertidumbres en los parámetros de la red inteligente.

Optimización del flujo de carga mediante linealización y aproximación

Enfoque basado en la linealización de las ecuaciones de la red, asume que las cargas se comportan como impedancias y clasifica los nodos del sistema en tres categorías: Cargas, puntos de acoplamiento comunes (PCC) y de recursos energéticos distribuidos (DER). Después, utiliza una red lineal para obtener un problema de optimización convexo, utilizando las variables de referencia y las restricciones convexas.

Con la utilización de este método se ha demostrado lo siguiente para una microrred conectada a la red:

- Aumentar el número de restricciones activas conduce a un aumento del coste total
- Al activar las restricciones de voltaje, la relación entre el coste total y el de los nodos PCC se linealiza y las pérdidas se reducen significativamente
- Activar las restricciones de la corriente de línea reduce ligeramente las pérdidas
- A menor tensión, las restricciones de voltaje se vuelven más rigurosas y el coste total de la microrred aumentará

En modo aislado el coste total de la solución es mucho más alto cuando el PCC se reemplaza por un PEI (Power Electronic Interface) y ésta aplica la restricción de voltaje, descuidando el coste, lo cual es una desventaja.

Optimización del flujo de carga considerando sistemas de almacenamiento

Este enfoque cubre el problema de almacenamiento tanto en el dominio de la red como en el temporal. Para lograr una solución numérica eficiente, se propone aplicar programación dinámica recursiva para solucionar el problema del flujo de potencia. La potencia suministrada a los nodos PCC se optimiza mediante algoritmos de programación dinámica y la energía se suministra a lo largo del dominio del tiempo.

La principal desventaja de este método es la complejidad numérica debido al número de sistemas de almacenamiento.

Método de multiplicadores de dirección alternante (ADMM)

Este método subdivide el problema de optimización, y cada controlador local resuelve el sub-problema, intercambiando después la información con los controladores locales más cercanos. Los resultados numéricos muestran que siempre se alcanza la solución global óptima del problema original de optimización del flujo de carga. Mediante la subdivisión del problema, el algoritmo asegura la escalabilidad con respecto al tamaño de la red, solidez en cuanto a los cortes de comunicación, y preserva la privacidad de los datos.

Además de estos métodos, existen otros:

- Los multifase y los utilizados para sistemas desequilibrados, cuya viabilidad técnica no es posible a gran escala, debido al coste computacional.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Métodos de optimización basados en la formulación simultánea de los flujos tras una contingencia
- Modelos basados en la incertidumbre, con un enfoque estadístico, que consideran variaciones probabilísticas en la carga y modelizaciones en la generación de energías renovables

Actualmente, estos algoritmos no se utilizan ya que todavía no se tienen medios para su implementación, y se continúa utilizando el método de Newton-Raphson y derivados. Uno de estos algoritmos podría emplearse para llevar a cabo la optimización del flujo de carga en una red inteligente.

3.5.4. SEGURIDAD Y FIABILIDAD

Las nuevas infraestructuras concebidas con el desarrollo de las redes inteligentes incluyen comunicaciones de red mediante esquemas de computación distribuida. Esto, a la vez de tener una serie de ventajas, también presenta una serie de desventajas, entre ellas, problemas de seguridad derivados del uso de esta tecnología. Ataques físicos, problemas de ciberseguridad o desastres naturales podrían provocar daños en la infraestructura, apagones, fraudes de facturación o fallas en la privacidad de los usuarios. En este punto se van a analizar los posibles peligros o amenazas y se propondrán soluciones para mitigar o paliar los daños.

Según el NIST (National Institute of Standards and Technology) la red inteligente muestra comunicación bidireccional entre sus unidades operacionales. Pero el concepto al que se pretende llegar propone una comunicación multidireccional, como se muestra en la Ilustración 10.



Ilustración 11. Modelo conceptual de la arquitectura de una Smart Grid según el NIST

Los orígenes de las amenazas se pueden clasificar de la siguiente forma:

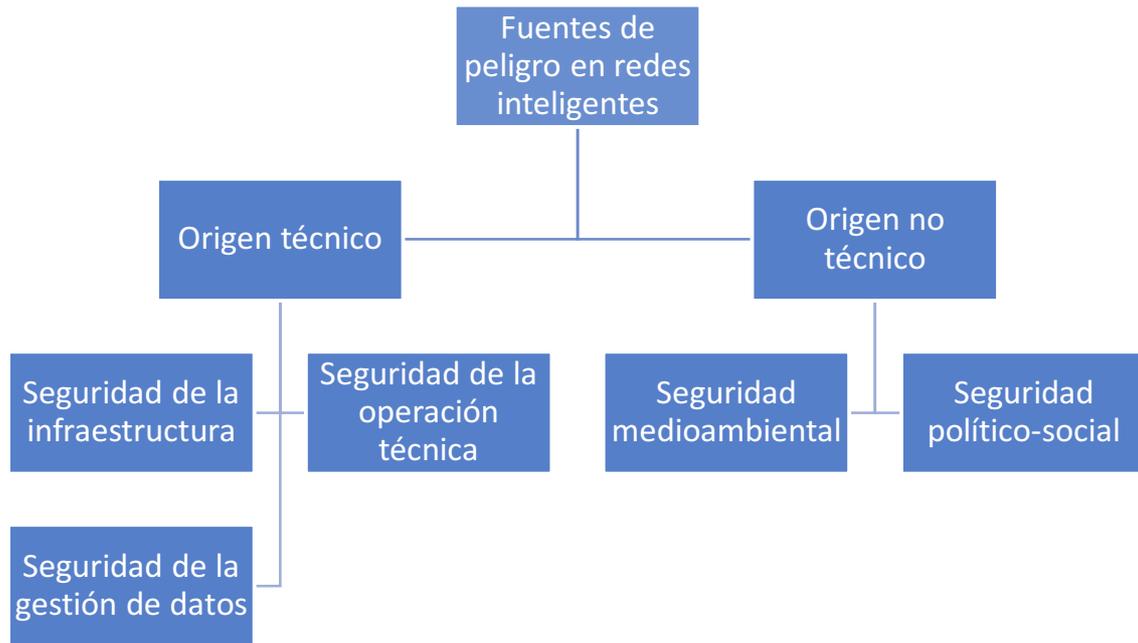


Ilustración 12. Clasificación de las amenazas de las redes inteligentes según su origen

3.5.4.1. SEGURIDAD EN LA INFRAESTRUCTURA

La infraestructura de una red inteligente es un sistema muy complejo, que interconecta usuarios, plantas de generación, sistemas de transmisión y distribución, distintos tipos de estaciones de transformación, además de los dispositivos de telecomunicaciones y la infraestructura de medición avanzada.

El sistema de medición inteligente, compuesto por contadores inteligentes, sus redes de comunicación, y sus sistemas de gestión y control de datos, es el elemento más vulnerable a los ciberataques, debido a su red de sensores y dispositivos necesarios para el registro y análisis de los datos.

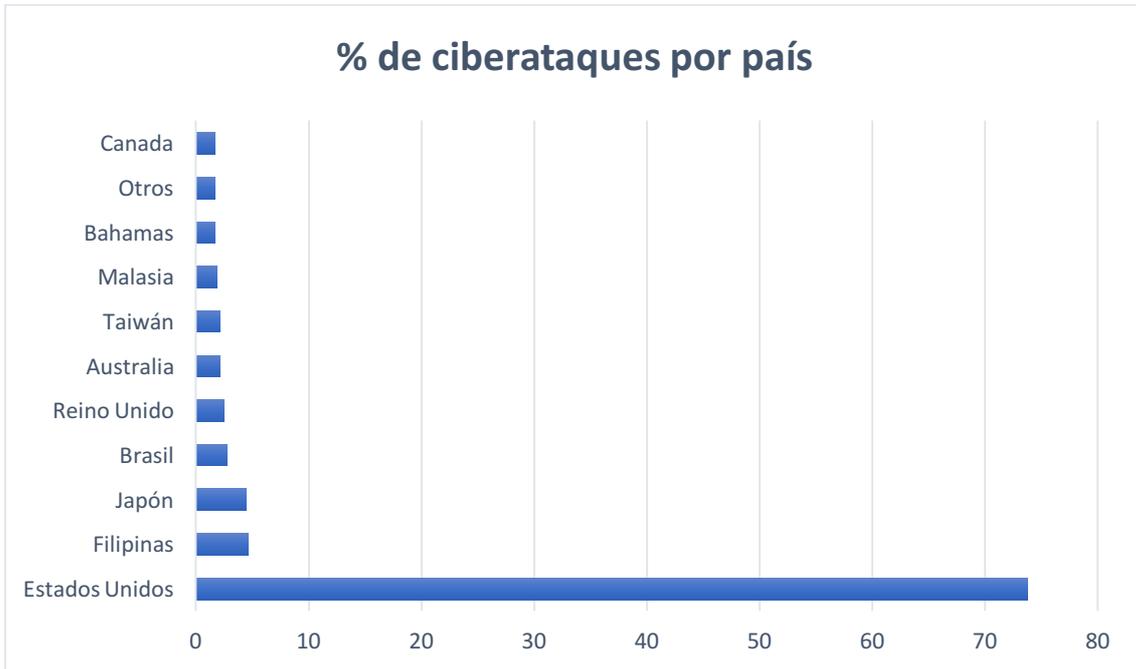
Principalmente, la mayoría de ataques se han dirigido al propio contador inteligente, para realizar fraudes en la facturación eléctrica, un fenómeno que causa grandes pérdidas a nivel técnico y económico. No obstante, la implantación de los mismos ha mitigado parte de los robos que se producían anteriormente, debido a que con los sistemas de telegestión actuales, es fácil comprobar si un contador inteligente está fuera de servicio. A pesar de esto, son propenso a sufrir ciberataques capaces de manipular los datos.

En una manera más general, los ciberataques pueden causar daños siendo cualquier punto de la infraestructura su objetivo, induciendo a la entidad operadora de la red inteligente a tomar decisiones erróneas, o a pasar por alto fallos en el sistema.

Para prevenir esto se utilizan sistemas distribuidos de ciberseguridad, diseñados para monitorizar la arquitectura y preservar la integridad de los datos. Este hecho, unido a la violación de la privacidad y el control malicioso de los dispositivos personales, son los que más preocupan al usuario. Además, a nivel técnico puede provocar fallos en cascada y perturbaciones en la economía.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

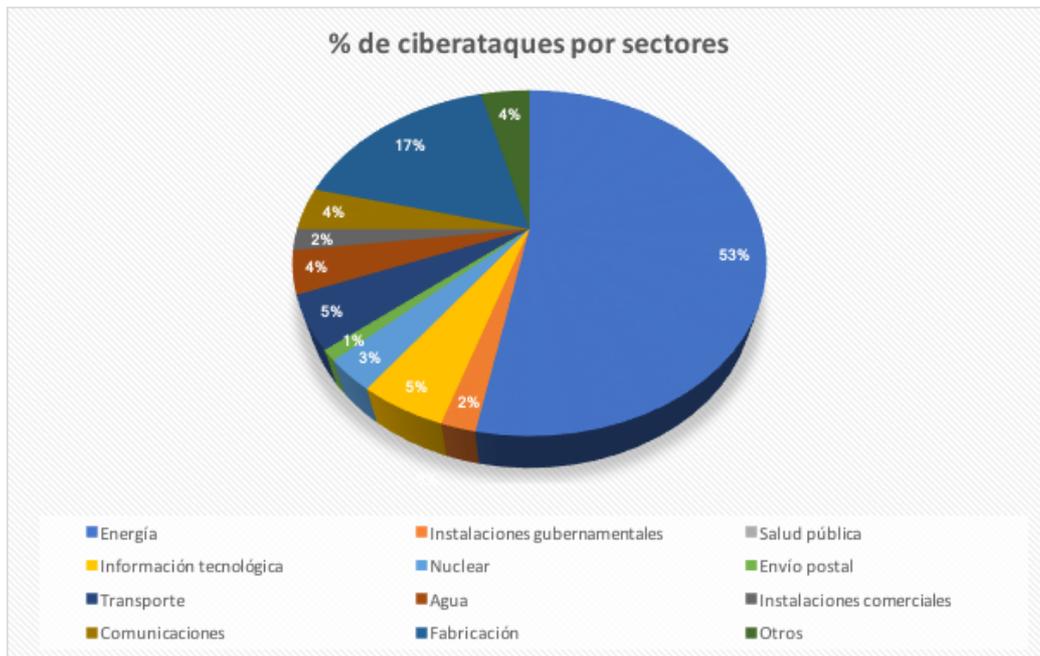
Según los datos recopilados por (13) se observa que el país que más ciberataques recibe es Estados Unidos:



Gráfica 8. % estimado de ciberataques por país en 2015

(Elaboración propia a partir de (13))

Por otra parte, en la gráfica 8 se muestra como el sector más afectado por ciberataques es el energético, con mucha diferencia.



Gráfica 9. Porcentaje de ciberataques por sectores de la sociedad

(Elaboración propia a partir de (13))

El enfoque utilizado en la investigación actual para mitigar estos ataques se basa en la prevención contra los siguientes puntos, que se detallarán más adelante:

- Detección de bots (programas informáticos que ejecutan tareas repetitivas de forma automática, cuya realización sería muy tediosa para un ser humano).
- Ataques de denegación de servicio distribuidos (DDoS), que consisten en el envío de un gran flujo de información a un mismo punto de destino, para producir una sobrecarga en los servidores. Este es el ciberataque más utilizado, debido a su sencillez tecnológica.
- Rootkits, programas que permiten acceso privilegiado a un sistema informático manteniendo su presencia “oculta” al resto de administradores mediante la corrupción del sistema.

En Estados Unidos se están realizando numerosas inversiones desde diversos departamentos para mejorar su ciberseguridad, debido a que es el país más afectado por amenazas de esta naturaleza.

3.5.4.2. SEGURIDAD DE LA OPERACIÓN TÉCNICA

La seguridad de la operación técnica abarca desde la confiabilidad y flexibilidad de las operaciones, el nivel de inteligencia del sistema, la seguridad de los datos, de las telecomunicaciones y el mantenimiento de cualquiera de las partes de la red.

El reconocimiento oportuno y el rápido diagnóstico de las condiciones que causan problemas en la red son factores clave a la hora de eliminar perturbaciones. Para ello deben utilizarse tecnologías avanzadas de computación, control y comunicaciones que permitan reconfigurar el sistema de forma automática en caso de fallo o amenaza.

Una red inteligente requiere esquemas operativos seguros. Parte de la coordinación del sistema se encuentra bajo control computacional, pero algunas operaciones requieren atención de operadores humanos en los centros de control, especialmente en situaciones de emergencia. Principalmente este punto tratará sobre prevenir interrupciones en el suministro.

Una interrupción puede producirse por fallos en los equipos de protección. Para paliar este efecto es posible diseñar el sistema con cierta “tolerancia” a estas interrupciones y mantener una provisión de energía para asegurar la subsanación del suministro.

A raíz de este tipo de medidas surge el concepto de red autorreparativa, función clave que surge como consecuencia del alto grado de automatización requerido. El cometido de esta función consiste en restaurar rápidamente el servicio tras un corte de suministro o restaurando el servicio a los usuarios afectados mediante una fuente alternativa.

En (14) se propone un protocolo de actuación estructurado en dos partes: el **modo de operación normal** y el **modo de emergencia**. En el modo normal los costes operativos se minimizan mediante una programación óptima, y el modo de emergencia se activa cuando se produce un corte. En este momento debe entrar en juego la planificación operacional para realizar acciones de autorreparación. Esto se realiza diseñando particiones del sistema de distribución inteligente, con lo cual el área aislada se dividirá en dichas partes, las cuales pueden autoabastecer a un número limitado de consumidores de forma autónoma. Además, estas secciones deben cooperar entre sí para asegurar que se ejecuta la opción más sostenible para el sistema, ya que

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

deben controlarse los flujos de potencia, las tensiones en los nodos, las cargas prioritarias y su control.

Para llevar a cabo la resolución de este problema, se realiza una optimización en dos etapas: estocástica para las condiciones normales y acciones de autorreparación basadas en los resultados obtenidos en la primera etapa. Para la formulación de la primera etapa, se tiene en cuenta la incertidumbre de los consumos de las cargas, de la generación de fuentes renovables y de los precios del mercado.

En la primera etapa, la planificación se realiza para un horizonte de previsión diario, obteniendo las condiciones del sistema para cada hora. Después, se optimiza el problema para el modo de emergencia, obteniendo los posibles escenarios de fallo en el sistema para cada hora, incluyendo las posibles simultaneidades que pudieran producirse. En caso de cualquier tipo de interrupción el sistema utiliza las soluciones obtenidas de forma instantánea.

Dentro del modo de emergencia se producen dos etapas. En primer lugar, cuando se produce una interrupción del suministro, se detecta y se minimizan sus efectos en otras partes del sistema. Generalmente se realiza aislando la sección afectada.

La segunda fase, que implica la restauración del sistema, se realizará de forma simultánea a la primera, detectando el escenario generado y ejecutando una acción de autorreparación, que puede consistir en una reconfiguración del sistema, el ajuste de la generación distribuida o la eliminación de carga. El algoritmo identifica la parte conectada a la red y la parte aislada en el sistema post-contingente. En la parte conectada, es fácil reajustar los parámetros principales de la calidad de la potencia, así como la falta de potencia activa o reactiva debido a la presencia de la red principal, que se considerará de potencia infinita. No obstante, cabe gestionar el desequilibrio producido entre la generación y la demanda, que como ya se ha dicho anteriormente, será solventado por el operador del sistema mediante ajuste de la generación distribuida y la limitación de la carga.

A continuación se muestra un algoritmo susceptible de ser implementado para la gestión de la autorreparación de la red.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

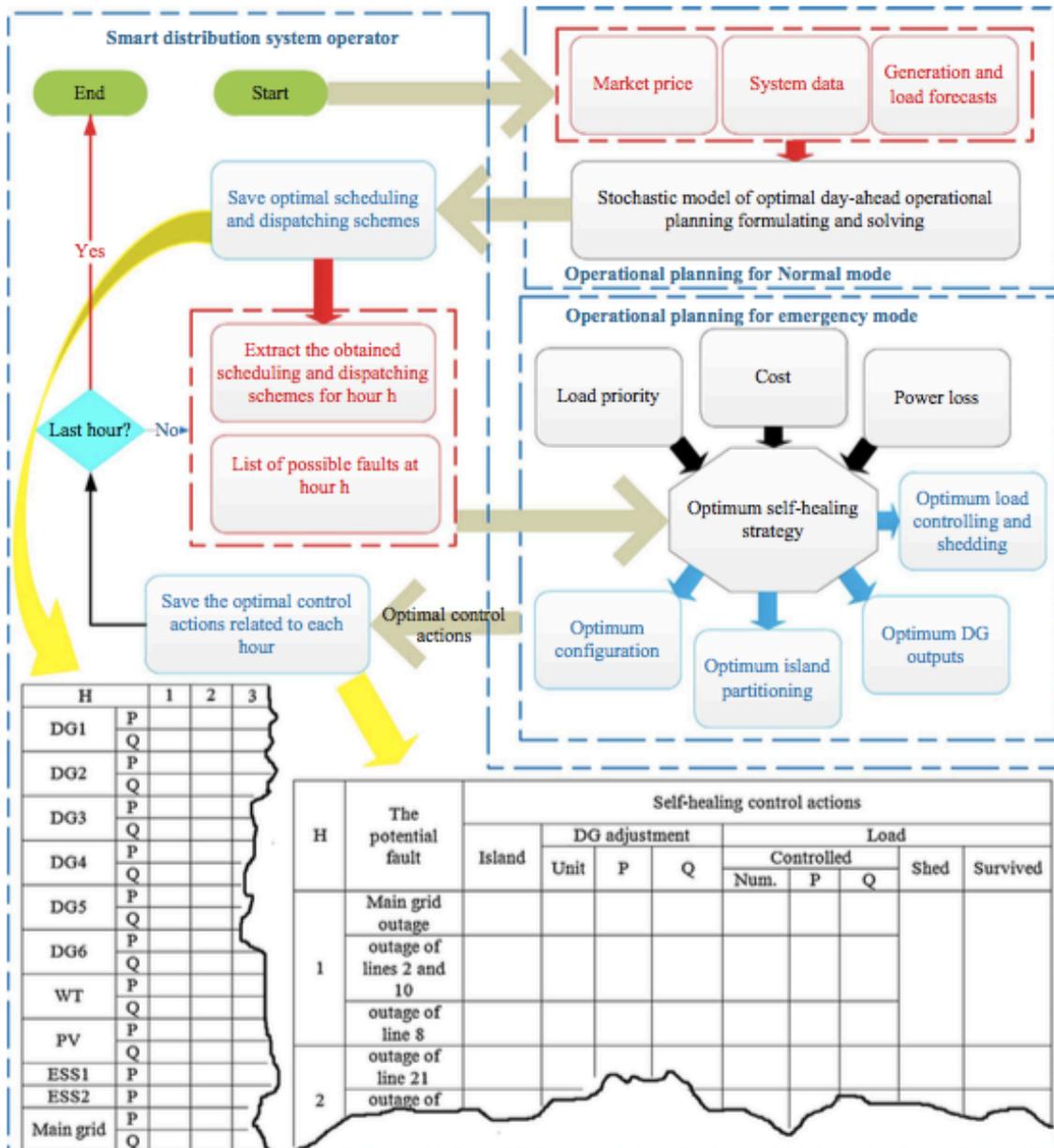


Ilustración 13. Algoritmo capaz de realizar la gestión de la autorreparación de una red inteligente (Extraído de (14))

3.5.4.3. SEGURIDAD DE LA GESTIÓN DE DATOS

En este campo se trata la monitorización, el tratamiento y almacenamiento de los datos, así como su seguridad ante ataques y el cumplimiento de las normas de privacidad para garantizar la satisfacción de los usuarios.

Datos como las variables clave de los sistemas de generación, transporte, distribución, los perfiles de carga de los usuarios o los parámetros de rendimiento requieren su recopilación, para realizar análisis y simulaciones con el fin de evaluar la fiabilidad de los sistemas. De esta forma es posible identificar posibles amenazas, como los ciberataques, que intentan vulnerar el sistema para conseguir la información contenida en los datos para satisfacer sus intereses personales. En general, el procedimiento utilizado por los “crackers” es el siguiente: (15)

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

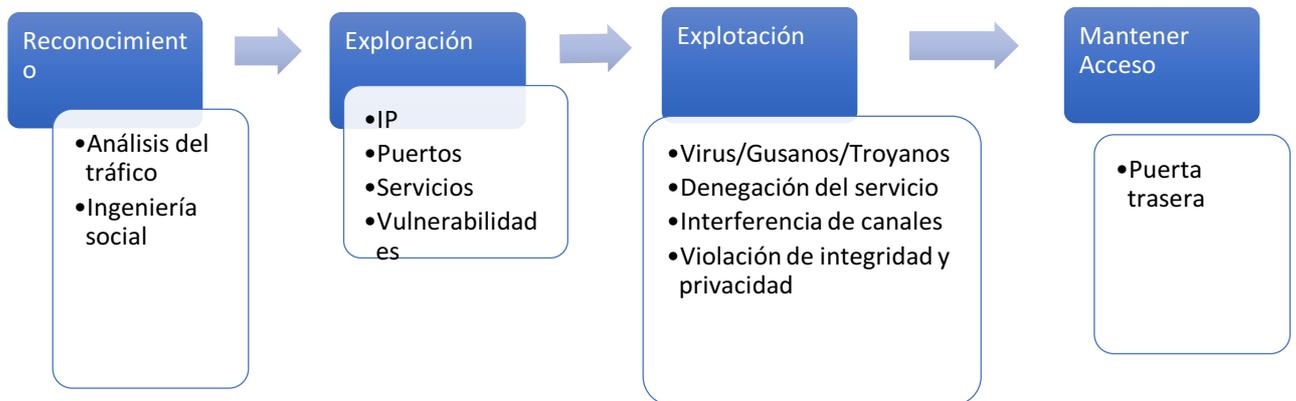


Ilustración 14. Ciclo de ciberataques y posibles variantes (Elaboración propia a partir de (15))

Reconocimiento

En esta fase, puede producirse ataques enfocados en el uso de ingeniería social, que consiste en la manipulación de los usuarios para que faciliten información relevante, como podría ser una contraseña o una identificación personal. Por otra parte, el análisis de tráfico tiene como objetivo determinar los dispositivos y servidores conectados a la red, así como sus direcciones IP. Los ataques de esta naturaleza comprometen seriamente la confidencialidad de los datos.

Exploración

Es el siguiente paso, consistente en conocer toda la información necesaria para vulnerar el sistema objetivo. En primer lugar, se identifican todas las IPs de los servidores conectados. Después, se buscan los puertos abiertos en cada uno de los servidores, y se determina qué clase de servicio llevan a cabo, por ejemplo, si el puerto 115 se encuentra abierto, el atacante podría determinar que dicho puerto pertenece a un sistema de automatización de subestación.

El último paso en la exploración es la detección de vulnerabilidades en cada servicio concreto, para su posterior explotación.

Explotación

En la fase de explotación se llevan a cabo actividades maliciosas que intentan explotar las vulnerabilidades de los componentes de las redes inteligentes. Entre los distintos tipos de ataques podemos encontrar los mencionados en la Ilustración 12:

- **Virus**, programas creados para infectar dispositivos o sistemas determinados. También existen los **gusanos** (worms), que son programas con la capacidad de autorreplicarse sin ayuda de una persona, produciendo efectos devastadores a gran escala. Otro tipo de malware es el **troyano**, un programa que se presenta al usuario como una acción legítima, pero concede al atacante acceso remoto al equipo infectado. En junio de 2010, Roel Schouwenberg detectó Stuxnet, el primer gusano cuyo objetivo era un SCADA. Este

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

hecho se considera el primer ciberataque contra un sistema de control industrial de la historia.

- En los **ataques de denegación de servicio (DoS)**, se utilizan diversos métodos, entre ellos los siguientes:
 - Los ataques SYN, que se aprovechan del funcionamiento de las conexiones TCP. Cuando una de las partes quiere iniciar una conexión con otro equipo, inicia la conversación con un "SYN", el otro equipo recibe el "SYN" y responde con un "SYN+ACK", finalmente el sistema que empezó la conexión contesta con un "ACK" y ya pueden empezar a transmitir datos. En un ataque SYN se envía un número muy elevado de solicitudes de conexión que no se finalizan, dejando al sistema atacado a la espera del "ACK" final y consumiendo gran cantidad de recursos computacionales.
 - Desbordamiento de búfer, un error de software causado por la inserción de un número de datos mayor de lo que espera una determinada aplicación, lo que sobrescribe los datos ya existentes. Esto puede provocar un bloqueo en el sistema.
 - Ataque Teardrop, que explota la forma de tratamiento de datos de los protocolos IP. Cuando llega un paquete demasiado grande, éste se divide en fragmentos más pequeños. Después, mediante sistemas de identificación, estos paquetes se reconstruyen. Con este ataque, se alteran estos sistemas de identificación y la reconstrucción del paquete se produce de forma errónea, induciendo un fallo en el sistema. No obstante, este tipo de ataque está obsoleto en la actualidad, y únicamente funciona en sistemas antiguos.
 - Ataque Smurf, en el que se puede atacar a toda una red al mismo tiempo. Consta de tres elementos: Sitio de origen, de rebote y de destino. El cracker envía información al sitio de rebote desde el origen, con la dirección IP del sistema que pretende atacar. Cuando el sitio de rebote recibe la información, la difunde a todos los servidores conectados a la red y estos la reproducen, provocando la saturación de todo el sistema.
 - Ataque Puppet, que se dirige a la red de infraestructura de medición avanzada (AMI). El atacante selecciona uno o más nodos de la red como sus "títeres" y les envía información específica de ataque, que genera un gran volumen de paquetes en la ruta. Este tipo de paquetes son prioritarios, debido al limitado ancho de banda, con lo que se produce una congestión de la red, con la siguiente denegación del servicio. Esto puede producir que el porcentaje de entrega de paquetes descienda a un 10-20% aproximadamente.
 - Ataque a la sincronización del tiempo, que afecta a la temporización de la información de la red inteligente. Mediante el ataque de las referencias temporales, pueden producirse retrasos en la información que pueden corromper el sistema, manipulando datos e inutilizando los equipos de control, por ejemplo, introduciendo una señal de GPS falsa.
 - El ataque con intermediario (Man In the Middle) consiste en adquirir la capacidad de interceptar la información entre dos sistemas que se comunican entre sí. Esto puede utilizarse para provocar un ataque de denegación de servicio bloqueando la comunicación entre las partes.
 - En un ataque de interferencia del canal se explota la naturaleza de la red inalámbrica enviando un flujo continuo de información para ocupar el canal, evitando que los verdaderos usuarios se comuniquen e intercambien datos. Una red inteligente requiere de una gran disponibilidad de su sistema de comunicaciones, con lo que un ataque de este tipo podría afectar gravemente a su rendimiento.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Explotar la Interfaz Humano-Máquina (HMI) consiste en la vulneración de un dispositivo conocido, instalando un sistema de acceso remoto. Esto permite al atacante acceder desde su terminal y controlar los sistemas comprometidos. Los SCADA, las subestaciones o cualquier sistema con interfaz pueden considerarse objetivos potenciales de este tipo de ataques. Además, esta manera de atacar un sistema no requiere conocimientos avanzados de redes ni de sistemas de control industrial.
- Los ataques de violación a la integridad, consisten en alterar intencionalmente los datos almacenados en un dispositivo determinado de la red. Por ejemplo, un cliente podría intentar cometer fraude vulnerando las mediciones de su contador inteligente para reducir el coste de su facturación eléctrica. También sería posible atacar a una unidad terminal remota (RTU), transfiriendo datos incorrectos al centro de control y produciendo fallos en el sistema. En cuanto a la privacidad, se procede a la recopilación de datos privados de los usuarios. Por ejemplo, al ver que una casa no presenta consumos, es posible deducir en qué momentos del día está vacía para cometer un robo.

Mantenimiento del acceso

En la fase final, el atacante utiliza un tipo de ataque especial para obtener acceso de forma permanente a los equipos objetivo. Destacan los virus, los troyanos y la puerta trasera.

Una puerta trasera es un programa indetectable, que se instala de forma imperceptible para volver a acceder después al equipo infectado. Si un atacante es capaz de instalar una puerta trasera en un SCADA, puede lanzar ataques contra la red inteligente, causando grandes impactos en el sistema energético.

Dependiendo de la gravedad del ataque y de la probabilidad de que se materialice, los ataques pueden clasificarse según la siguiente tabla:

		Gravedad del Ataque		
		Baja	Media	Alta
Probabilidad de que se realice	Alta	Análisis del Tráfico Violación de la Privacidad		Virus, gusanos y troyanos DoS Puerta Trasera
	Media	Ingeniería Social Exploración	MitM	Interferencia de Canal Violación de la Integridad
	Baja			Explotar la HMI

Tabla 9. Clasificación de los ataques según su probabilidad y gravedad (Elaboración propia a partir de (15))

Tras analizar en profundidad las diversas amenazas según su origen técnico, se procede al estudio de una estrategia de detección y mitigación de peligros, con el fin de proteger a la red inteligente de posibles fallos. Para ello, se propone una estrategia definida en tres fases, que se ilustra a continuación. (15)

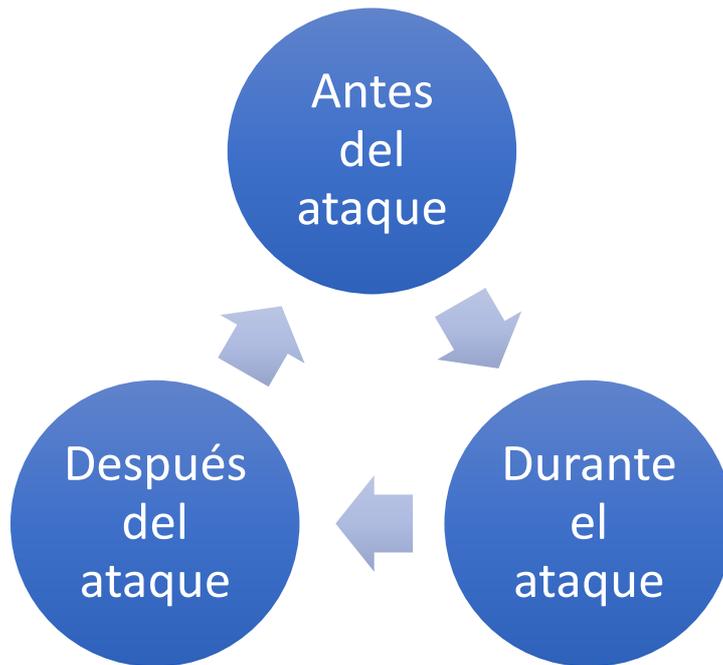


Ilustración 15. Estrategia a seguir para la ciberdefensa de la red inteligente

Antes del ataque

En esta primera fase, se recomiendan soluciones enfocadas en la prevención y la detección de procesos informáticos anómalos. Las medidas de seguridad se centran en la seguridad de la red, de los dispositivos y criptografía. Se presentan las siguientes tecnologías y protocolos de seguridad para la seguridad de la red:

- Sistema de detección de intrusos (IDS)
- Sistemas de gestión de eventos (SIEM)
- Prevención de pérdida de datos de red (DLP)

Para la seguridad de los datos se propone:

- Cifrado
- Autenticación
- Gestión de claves

Y para la seguridad del dispositivo:

- Servidores con IDS
- Verificaciones de cumplimiento
- Diversidad de técnicas

Seguridad de la red

Para garantizar la seguridad de la red inteligente se recomienda el uso de cortafuegos combinado con otras tecnologías de monitorización y detección.

Un cortafuegos se utiliza para permitir o denegar conexiones de red basándose en unas políticas determinadas. No obstante, una técnica de ciberataque poco frecuente o muy avanzada puede

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

inutilizar el cortafuegos, por lo tanto, éste debe combinarse con las tecnologías mencionadas anteriormente.

Criptografía aplicada a la seguridad de los datos

Los mecanismos de encriptación tienen como objetivo asegurar la confidencialidad e integridad de los datos en cuestión. Existen dos tipos de cifrado: Simétrico y asimétrico.

En el cifrado de clave simétrico, la misma clave es la que se utiliza para cifrar y descifrar los datos. Los algoritmos más utilizados para realizar un cifrado simétrico son el estándar de cifrado avanzado (AES) y el estándar de cifrado de datos (DES).

Por otra parte, el cifrado asimétrico utiliza dos claves, una para cifrar los datos y otra para descifrarlos. Un algoritmo de cifrado asimétrico muy conocido es RSA (Rivest, Shamir y Adleman).

En la red inteligente conviven numerosos componentes que utilizan métodos computacionales muy dispares entre sí, por lo que los dos tipos de cifrado son opciones potenciales para su uso. La selección del tipo de cifrado dependerá de la criticidad de los datos, las limitaciones temporales y los recursos computacionales. En *“Smart grid cyber security: Challenges and solutions”* los autores proponen tres métodos para aplicaciones de multidifusión: asimetría de información secreta, asimetría temporal y asimetría híbrida.

La administración de claves es un enfoque clave. La gestión de claves públicas (PKI) o la gestión de claves secretas compartidas se puede utilizar para garantizar la autenticidad de la comunicación entre las distintas redes. En la gestión de claves públicas, las dos partes verifican su autenticidad mediante certificados entregados por un tercero. En la administración de claves secretas compartidas, se utilizan cuatro pasos para mantener la seguridad de las comunicaciones: generación de claves, distribución de claves, almacenamiento de claves y actualización de claves. Debido a la naturaleza distribuida de la red inteligente, se deben considerar algunos requisitos específicos para diseñar una administración de claves criptográficas, en *“Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges”* se presentan varios requisitos básicos y relevantes del esquema de administración de claves, particularmente eficiencia, capacidad evolutiva, escalabilidad y gestión segura. En estos requisitos se basará la elección de un marco. Los autores llevaron a cabo una comparación entre los esquemas de gestión clave enumerados anteriormente. La comparación se basó en la escalabilidad, soporte para multidifusión, robusto para compromiso clave y aplicación del sistema de potencia. ASKMA + y SMOCK muestran resultados interesantes. ASKMA + es un esquema de gestión de claves eficiente y admite la multidifusión, pero aún adolece de escalabilidad. SMOCK, por otro lado, muestra buena escalabilidad; sin embargo, tiene algunas debilidades, como la falta de compatibilidad con la multidifusión y la baja eficiencia computacional.

Seguridad del dispositivo

La seguridad de los distintos dispositivos conectados a la red inteligente es crucial para asegurar el suministro eléctrico. Además de las técnicas anteriormente enumeradas para contribuir a la seguridad, los autores de *“Smart grid cyber security: Challenges and solutions”* recomiendan un control de cumplimiento de seguridad automatizado. Esta herramienta comprueba que todos los componentes de la red se encuentren actualizados, especialmente el firmware y su configuración actual. Este proceso es crucial ya que existe una alta conectividad entre todos los componentes de la red inteligente.

Durante el ataque

Esta fase presenta dos objetivos principales: detección y mitigación de ataques.

Durante la detección se recomiendan todas las tecnologías mencionadas en el punto anterior. No obstante, algunas de éstas presentan limitaciones, como el sistema de detección de intrusos. Se han publicado numerosos artículos con la intención de mejorar el IDS en el contexto inteligente. En *“Data-Stream-Based Intrusion Detection System for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid: A Feasibility Study”* los autores proponen un IDS basado en algoritmos de extracción de flujo de datos, y se proporciona una comparación entre distintos algoritmos de minería de flujo de datos.

Los resultados muestran que los recursos computacionales requeridos no son tan significativos, por lo que su implementación en contadores inteligentes (por ejemplo) sería factible.

Una vez el ataque se ha detectado, comienza la fase de mitigación. En *“Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges”* se proponen los métodos de retroceso y reconfiguración para mitigar los ataques de naturaleza DoS. En el método de retroceso el router está configurado para bloquear todo el tráfico proveniente de la IP del atacante. En el método de la reconfiguración la topología de la red se modifica para aislar al atacante. Para los ataques de interferencia de canal, se discuten esquemas anti-interferencia utilizando lógica difusa.

Después del ataque

Cuando no se detecta un ataque, es importante el periodo posterior al mismo. En primer lugar, es fundamental identificar el origen del ataque para determinar su naturaleza. La firma de IDS, la base de datos de antivirus y las políticas de seguridad deben mantenerse actualizadas para aprender de los ataques incidentes y protegerse de los futuros. Un análisis forense es la técnica más utilizada tras un ataque. El estudio forense recopila, analiza e intercepta datos con el fin de identificar el origen de la amenaza. Por otra parte, también se pueden emplear para detectar vulnerabilidades en la red inteligente y anticiparse a posibles ataques; por este motivo, desempeña un papel muy importante en la investigación de delitos cibernéticos.

3.5.4.4. SEGURIDAD MEDIOAMBIENTAL

El objetivo de la seguridad medioambiental consiste en evitar y controlar efectos catastróficos en las infraestructuras de la red originados por los distintos riesgos ambientales (naturales o artificiales), como inundaciones, terremotos, deslizamientos de tierra, caída de árboles o incendios. La respuesta inteligente basada en consideraciones ambientales consiste en la definición y generación de alertas para unas amenazas determinadas en función de los datos recibidos específicamente para prevenir este tipo de problemas. Además, la red inteligente debe ser capaz de abastecer el área afectada reservando unidades alternativas de generación distribuida. A pesar de que la seguridad medioambiental se clasifica teniendo en cuenta un origen no técnico, sí es cierto que se involucran aspectos relacionados con soluciones técnicas.

Debe entenderse que la prioridad principal de la red inteligente es el suministro de energía a los usuarios. Este tema está muy relacionado con lo mencionado en el punto de seguridad de la operación técnica, cuando se produce un fallo, se aísla la zona, se redistribuye la generación y mediante conmutación automatizada se reestablece el servicio.

Como desastres que podrían comprometer la seguridad de la red se pueden citar varios:

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Desastres naturales
- Agotamiento del petróleo
- Aumento drástico de la volatilidad de los mercados energéticos mundiales
- Terrorismo, sabotaje, vandalismo, etc.
- Situaciones de guerra

Los datos instantáneos basados en el Sistema de Información Geográfica (SIG) son una parte clave en este análisis, especialmente en relación con los pronósticos y análisis de desastres naturales que se utilizan para determinar la alerta de dichas amenazas ambientales.

3.5.4.5. SEGURIDAD POLÍTICA Y SOCIAL

A medida que avanza la tecnología y se amplían los servicios con connotaciones de inteligencia, se acrecienta la necesidad de nuevas políticas regulatorias y nuevos modelos comerciales. La implicación de los gobiernos en el desarrollo de dichas políticas y la movilización del sector privado son fundamentales para facilitar la expansión de la red inteligente.

Además, también se requieren políticas de apoyo a las inversiones en I+D, necesarias para toda tecnología creciente, que deben estar bien dirigidas para garantizar su coherencia en posteriores gobiernos.

Por otra parte, también es necesaria la participación del gobierno para crear una concienciación colectiva en el público, ya que éste debe ser un actor más en el sector energético. Una cooperación del público podría ser crucial para suavizar los picos de demanda (este tema se tratará con más profundidad posteriormente). Los puntos clave para asegurar una concienciación total del usuario son los siguientes: (13)

- La integración de fuentes de energía renovables y distribuidas
- La reducción significativa de emisiones de CO₂
- Promover el uso de vehículos eléctricos y sistemas de transporte que no requieran el uso de combustibles fósiles
- La renovación y actualización de la infraestructura del sistema eléctrico anterior
- La adopción de sistemas de medición inteligentes y bidireccionales, para medir tanto el consumo como la producción de energía por parte de los consumidores

Para ello se podrían emplear numerosos medios, principalmente mediante la transmisión de información a través de los medios de comunicación, pero también podría realizarse una concienciación indirecta desde el ámbito educativo, con la pretensión de inculcar ideas de sostenibilidad con el medio ambiente, que, de una forma generalista, abarcarían los puntos principales tratados anteriormente.

Finalmente se pretendía valorar el nivel de seguridad de la red eléctrica española, pero no se ha encontrado información concreta sobre la seguridad utilizada en dicha red. A nivel de especulación, es totalmente asumible el uso de la mayoría de métodos aquí expuestos, como el uso de claves o el cifrado de datos, pero se desconoce el alcance de sus protocolos y medidas.

3.5.5. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

La red inteligente necesita conseguir un manejo total de la energía, ya que ésta debe consumirse al mismo tiempo que se genera. De no ser así, esto repercutiría en la estabilidad de la red y en la calidad del suministro. Además, debido al auge de las energías renovables, se acrecientan las

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

fluctuaciones en la generación. Aquí es donde entra en juego el almacenamiento, crucial para la gestión de un sistema eléctrico moderno y dotado de carácter inteligente, y pensado para subsanar dichas variaciones en fuentes de generación como la eólica o las energías solares.

Si bien los combustibles fósiles son una fuente de almacenamiento de energía muy utilizada y su uso es indispensable a día de hoy, cabe decir que no son la mejor opción para el medio ambiente, además de que son una fuente limitada. Por tanto, las tecnologías que permitan el desarrollo de un sistema sostenible deben ser desarrolladas, así como las fuentes de generación de energía renovables. Por otra parte, debe asumirse una pérdida debido al rendimiento en estos sistemas, mayor o menor dependiendo de la tecnología, ya que normalmente, almacenar la energía implica realizar una conversión de un tipo de energía a otro.

El objetivo de este apartado es exponer los sistemas de almacenamiento de energía actuales para valorar las distintas tecnologías más susceptibles de ser utilizadas en una red inteligente. (16)

Actualmente, se está llevando a cabo una intensa investigación en este campo, concretamente distintos grupos de aplicaciones, los principales son:

- Aplicaciones de suministro de electricidad
- Servicios auxiliares
- Aplicaciones de soporte de red
- Integración de energías renovables

En primer lugar se va a realizar una clasificación en función de la forma en la que se almacenará la energía, para después abordar cada campo de forma concreta:

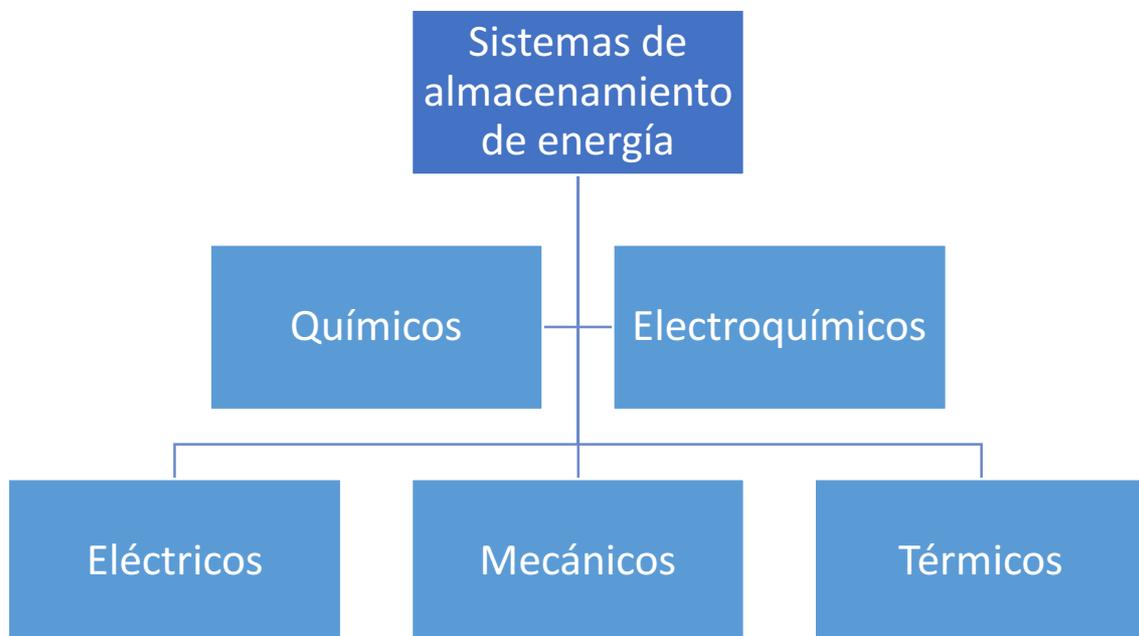


Ilustración 16. Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía

3.5.5.1. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA QUÍMICA

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

La energía química se acumula en los enlaces químicos de determinadas moléculas, y se libera mediante una reacción química. Los combustibles químicos son la forma predominante de almacenamiento de este tipo de energía, tanto en generación como en transporte.

La energía contenida en estos combustibles se transforma en energía termomecánica y después en energía eléctrica mediante el uso de motores. El almacenamiento químico es muy útil a la hora de almacenar grandes cantidades de energía durante un periodo de duración largo.

Las tecnologías principales de almacenamiento químico son:

Hidrógeno

El hidrógeno es un combustible limpio, renovable y altamente abundante. Puede producirse a partir de cualquier fuente primaria, y únicamente libera vapor de agua tras la combustión.

El almacenamiento basado en hidrógeno puede realizarse de forma física (en fase líquida o gaseosa) o en un material. El almacenamiento en fase gaseosa se realiza en tanques de alta presión de entre 350 y 700 bares. Por otra parte, el almacenamiento en fase líquida requiere de métodos de enfriamiento criogénico, ya que su punto de ebullición se encuentra a -253°C .

Por otra parte, el almacenamiento basado en materiales es posible en hidruros metálicos, superficies de otros sólidos mediante adsorción, otros hidruros y compuestos reactivos como LiBH_4 o MgH_2 .

Un sistema típico de almacenamiento de hidrógeno podría consistir en una unidad de generación de hidrógeno como un electrolizador, un tanque de almacenamiento de hidrógeno y una celda de combustible (si la aplicación lo requiere). Un electrolizador es un convertidor electroquímico que divide el agua con la electricidad en hidrógeno y oxígeno.

Gas Natural Sintético (SNG) o Syngas

El gas natural sintético implica la conversión parcial de materia prima sólida con gasificación seguida del acondicionamiento del gas, su síntesis y su mejora. Conceptualmente, el proceso es similar al del gas natural convencional.

El gas puede almacenarse en tanques a presión, bajo tierra o suministrarse directamente desde la red de gas.

Biocombustibles

La biomasa, desde un punto de vista ingenieril puede ser definida como aquella sustancia originaria de materia orgánica susceptible de ser convertida en combustible para posteriormente generar energía útil. Concretamente, se puede utilizar la fracción biodegradable de productos derivados de cultivos energéticos, residuos biológicos generados por industrias relacionadas, silvicultura, y residuos biológicos procedentes de la industria o de la población.

Actualmente se pueden utilizar diversos procesos químicos para transformar los combustibles fósiles tradicionales, así como la biomasa vegetal y animal, y los desechos orgánicos en hidrocarburos cortos capaces de reemplazar los combustibles de hidrocarburos existentes.

3.5.5.2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

Una gran variedad de materiales es utilizada para el almacenamiento de energía térmica. Dichos materiales deben poseer unas propiedades termofísicas adecuadas para la aplicación en cuestión, como un elevado punto de fusión, alta conductividad térmica y alto calor latente y específico. Además, hablando desde otros puntos de vista no menos importantes, también podrían ser cualidades deseables una alta disponibilidad, buena estabilidad termoquímica o baja inflamabilidad, entre otros. Los sistemas de almacenamiento térmico pueden clasificarse ampliamente en tres clases según el tipo de material seleccionado para el almacenamiento frío o caliente: calor sensible, latente o químico.

Calor sensible

Los materiales que utilizan calor sensible para almacenar energía lo hacen en función de su capacidad calorífica específica. La ecuación puede expresarse de la siguiente forma:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

donde m es la masa, C_p es el calor específico y ΔT es la variación de temperatura obtenida durante el proceso. Durante el proceso de absorción de energía térmica, no hay cambio de fase y los materiales experimentan un aumento en la temperatura. La cantidad de calor almacenado es proporcional a la densidad, el volumen, el calor específico y la variación de la temperatura del material de almacenamiento.

En cuanto a los materiales utilizados para realizar esta función, a día de hoy se utilizan los siguientes:

Agua

Debido a su fluidez, puede utilizarse como fluido caloportador o como sustancia almacenadora de energía térmica. Entre sus ventajas está un alto calor específico (4'18 kJ/KgK), su no toxicidad, coste económico y fácil disponibilidad. En la fase sólida se utiliza para almacenamiento en frío, y en fase líquida se utiliza para temperaturas menores a 100°C.

Debido a su carácter inofensivo para las personas, es la sustancia más utilizada para el almacenamiento de energía en el ámbito doméstico. La fase de vapor se utiliza para aplicaciones que requieren altas temperaturas, pudiendo almacenarse en tanques de alta presión. Por otra parte, el agua podría utilizarse para el almacenamiento en frío, pero presenta algunos inconvenientes, como la alta presión de vapor o la corrosividad.

Aceites térmicos

Son fluidos orgánicos, con una buena capacidad de transferencia de calor. La ventaja que tienen sobre el agua es que permanecen en fase líquida a temperaturas más altas, aproximadamente 250°C a presión atmosférica, pudiendo variar dependiendo del aceite. Además, su rango de temperaturas de funcionamiento es mayor, lo que implica mayor transferencia de calor y mayor almacenamiento. Como desventaja, su calor específico es menor, convirtiéndolos en sustancias con una transferencia de calor mediocre.

Sales fundidas

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Cuando la temperatura que requiere la aplicación sobrepasa las temperaturas de operación de los aceites térmicos, las sales fundidas son el tipo de sustancias adecuadas. Suele utilizarse en centrales termosolares, como las de torre o las cilindro-parabólicas.

Tienen una gran capacidad calorífica volumétrica, un alto punto de ebullición y una estabilidad térmica muy alta. La temperatura límite operacional más alta es de 565°C aproximadamente. Esto se traduce en rendimientos termodinámicos mayores. Son baratas, tienen una alta disponibilidad y no son tóxicas ni inflamables.

No obstante, existen algunas dificultades en cuanto a su utilización, como su elevado punto de fusión, que provoca congelación en las tuberías cuando no hay una fuente calor, como en las centrales solares por la noche, por lo que es necesario calentamiento eléctrico en las horas en las que no hay generación. Lo conveniente es tener un punto de fusión cercano a la temperatura ambiente y un punto de ebullición lo más alto posible, para aumentar el rango de operación al máximo. Para lograr esto, se pueden utilizar mezclas eutécticas de dos o más sales. Otra desventaja es su alta viscosidad, lo que aumenta los costes de bombeo. Además, se producen altas temperaturas en los tubos, que causan tensiones plásticas acumulativas. Esto puede producir fallos en los tubos debido a desgastes por fatiga de ciclo bajo.

A continuación, se muestran las sales más utilizadas, así como sus características principales.

Sal/Mezcla Eutéctica	Tª Fusión	Máx. Tª Op.	Cp (kJ/kg°C)	Dens. (kg/m ³)	Cond. Ter. (W/mK)	Alm. Calor Sensible (MJ/m ³ °C)	Coste (\$/kg)
HITEC, NaNO ₃ -KNO ₃ -NaNO ₂ (7-53-40) %	142	535	1,56	1.640	0,6	2,56	-
HITEC XL, NaNO ₃ -KNO ₃ -Ca(NO ₃) ₂ (7-45-48) %	120	500	1,44	1.992	0,519	2,9	1,19
Sal Solar, NaNO ₃ -KNO ₃ (50-50) %	220	600	1,5	1.899	0,55	2,8	-
LiNO ₃	250	600	-	2.380	-	-	-

Tabla 10. Sales más utilizadas, y sus características

(Elaboración propia a partir de (16))

Calor latente

Estos materiales almacenan calor latente durante un proceso a temperatura constante, como un cambio de fase. Generalmente, se utilizan cambios de fase líquido-sólido. La energía térmica almacenada por el calor latente puede expresarse como:

$$Q = m \cdot L$$

Donde m es la masa y L es el calor latente específico (kJ/kg). En cuanto a los materiales utilizados para esta tecnología, se utilizan los siguientes:

Materiales orgánicos

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Numerosos materiales orgánicos poseen la cualidad única de tener una temperatura de cambio de fase alrededor del rango de confort térmico humano, entre 18 y 30°C. Además, son químicamente estables, fácilmente accesibles, y no son tóxicos ni corrosivos. No obstante, se descomponen a temperaturas mayores y su conductividad térmica es muy baja. A continuación se enumeran los distintos tipos de materiales:

- Parafinas: Es el más utilizado en aplicaciones comerciales. Su punto de fusión a 28°C es el más cómodo para los humanos, no obstante, la parafina pura requiere un alto refinamiento y es costosa. En cambio, se utiliza una cera de parafina más económica para aplicaciones prácticas.
- No parafinas: Los materiales sin parafinas amplían el rango de temperatura de cambio de fase disponible. Abajo se citan los distintos tipos:
 - Ácidos grasos: Pueden obtenerse a partir de aceites naturales. Tienen bajo coste, estabilidad química, puede ser una alternativa más económica que la parafina pura. Presentan algunos inconvenientes, como baja densidad, conductividad térmica mediocre y variación de volumen durante el cambio de fase (10% aprox.).
 - Ésteres: Junto con la técnica de mezclas eutécticas, la esterificación es otra herramienta disponible para modificar las propiedades termofísicas de los ácidos grasos de acuerdo con nuestras necesidades. Tienen bajo enfriamiento y estabilidad química. Por otra parte, son costosos y tienen baja densidad y conductividad térmica.
 - Alcoholes: Tienen los puntos de fusión más altos, y la capacidad de almacenar mucho calor latente. Sus temperaturas de cambio de fase los convierten en medios adecuados para aplicaciones de temperatura media (90-250°C), como calentadores solares o recuperaciones de calor residual. Son baratos y no tóxicos. Hay que tener cuidado de no exponerlos al oxígeno atmosférico. La estabilidad química es uno de los factores que pueden limitar su uso.
 - Glicoles: Especialmente el polietilenglicol presenta un gran potencial para el almacenamiento de energía térmica. Su temperatura de cambio de fase se acerca a la temperatura ambiente y aumenta con el peso molecular del polímero.

Calor químico

Los sistemas de almacenamiento de calor químico utilizan reacciones reversibles que implican la absorción y liberación de calor para el almacenamiento de energía térmica. Tienen una temperatura operativa de rango medio entre 200 y 400°C. La dirección de la reacción (es decir, si acumula o libera energía) depende de la presión y la temperatura).

3.5.5.3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELECTROQUÍMICA

Las fuentes de energía electroquímica convierten la energía química en energía eléctrica, generalmente mediante la reacción química de dos sustancias. La energía de esta reacción está disponible como corriente eléctrica a un voltaje y tiempo definidos. Una gran desventaja es que es el componente con la vida útil más corta en casi cualquier instalación, y además, ésta descende considerablemente si se opera a una temperatura inadecuada o la profundidad de descarga es muy elevada.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Hay dos ramas principales de tecnologías de almacenamiento electroquímico: baterías y condensadores. Los tipos existentes de sistemas de almacenamiento electroquímico varían según la naturaleza de la reacción química, las características estructuras y la aplicación.

Las baterías pueden clasificarse en 4 grupos: primaria, secundaria, de reserva y de combustible. Además de esta clasificación, podría realizarse una segunda en función de la profundidad de descarga, dividiéndose en ciclo profundo o superficial. Las de ciclo profundo son adecuadas para aplicaciones con generación de energía renovable.

A continuación se citarán las características más relevantes de cada grupo.

Baterías primarias

Las baterías primarias generalmente no son recargables. La mayoría de las células primarias utilizan electrolitos, que están contenidos en el material absorbente o en un separador. Podrían clasificarse dependiendo de si el electrolito es un medio acuoso o no. Debido a que solo pueden utilizarse una vez, no son la mejor tecnología para una red inteligente, que requiere cargas y descargas constantes de sus sistemas de almacenamiento.

Baterías secundarias

Una pila secundaria o batería es recargable al pasar corriente a través del circuito en la dirección opuesta a la corriente durante la descarga. Los sistemas de baterías recargables pueden separarse por el tipo de electrolito en dos grupos. Tienen electrolitos tanto acuosos como no acuosos, que se basan en agua y disolventes, respectivamente. Las más utilizadas son:

- Plomo-Ácido: Las más utilizadas actualmente. Muy asequibles económicamente, pero con baja densidad energética.
- Ion-Litio: De reciente desarrollo, con muchos nuevos fabricantes, pero todavía en desarrollo. Alta densidad energética, baja tasa de autodescarga y no requieren demasiado mantenimiento. Más costosas económicamente, requieren control electrónico y son muy sensibles a las altas temperaturas.

En cuanto a las baterías Ion-Litio merece especial mención el avance que está consiguiendo Tesla con Powerwall, una batería recargable para uso doméstico y pequeñas industrias, y Powerpack, para grandes industrias, y escalabilidad hasta GWh. En la siguiente imagen se pueden ver las especificaciones técnicas de un Powerwall para uso doméstico en venta en la actualidad, extraída de (17)

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE



Ilustración 17. Características técnicas de un Powerwall

(Extraída de (17))

Destaca su alta capacidad de almacenamiento y su garantía de 10 años, además de su total automatización y no requerir ningún mantenimiento. Una unidad cuesta 6500€ a día de hoy, y es uno de los productos punteros en el campo de las baterías, aunque todavía no ha pasado el tiempo suficiente para verificar si se cumple la vida útil que se espera.

Celdas de combustible

Las celdas o pilas de combustible generan energía eléctrica mediante una reacción química controlada entre un combustible y un oxidante. Su diferencia con una batería convencional es que están diseñadas para permitir el reabastecimiento de los reactivos consumidos, con lo cual pueden producir energía eléctrica de forma constante, en contraposición a la capacidad limitada de una batería.

3.5.5.4. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Estos sistemas pueden clasificarse en electrostáticos, referenciando los condensadores y supercondensadores, y el almacenamiento de energía magnética por superconducción. La superconducción se define como la capacidad de ciertos materiales para permitir, en unas condiciones determinadas, el paso de corriente eléctrica sin resistencia ni pérdidas energéticas.

Los condensadores se pueden utilizar en aplicaciones que requieran altas corrientes, pero solo durante periodos cortos, debido a su baja capacidad. Un supercondensador puede reemplazar un condensador normal, pero con una densidad energética muy superior a los condensadores convencionales. Por otra parte, los sistemas superconductores de energía magnética permiten almacenar ésta en forma de campo magnético creado por la circulación de una corriente continua en un anillo superconductor refrigerado a una temperatura por debajo de la temperatura crítica de superconductividad.

Condensadores

Los condensadores consisten de dos placas de metal separadas por una capa de material aislante llamado dieléctrico. Al inducirse cargas de distinto signo en sus superficies metálicas, se

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

almacena la energía eléctrica. Debido a su baja densidad energética, pueden entregar energía a altas corrientes, pero durante un tiempo muy corto.

Supercondensadores

Los condensadores electroquímicos de doble capa se encuentran en un punto intermedio entre los condensadores convencionales y las baterías. Están compuestos por una capa intermedia compuesta por un material poroso en una disolución electrolítica y dos superficies muy grandes. Comparando con los condensadores tradicionales, éstos poseen capacidades dos o tres órdenes de magnitud mayores. Son capaces de proporcionar una gran potencia y pueden recargarse y descargarse numerosas veces sin perder sus propiedades, al contrario que las baterías.

Almacenamiento de energía eléctrica por superconducción

Los sistemas de almacenamiento por superconducción se basan en los principios de la electrodinámica, rama de la física que estudia la interacción de campos electromagnéticos con cargas en movimiento. La energía se almacena en el campo magnético creado por el flujo de corriente continua a través de una bobina superconductora (siempre y cuando el sistema se encuentre por debajo de la temperatura crítica de superconducción). Para mantener esta temperatura se utilizan sistemas de enfriamiento criogénico. Estos sistemas presentan un ciclo de vida alto, lo que los convierte en adecuados para modos de operación continuos, cíclicos y constantes. Puede utilizarse para resolver problemas de estabilidad de tensión y calidad de energía en grandes industrias.

Los principales problemas de esta tecnología residen en su elevado coste y los problemas ambientales asociados a un campo magnético fuerte, por lo que debería estar alejado de los seres vivos.

3.5.5.5. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MECÁNICA

Los sistemas de almacenamiento de energía mecánica se pueden clasificar según el principio físico en el que se basan:

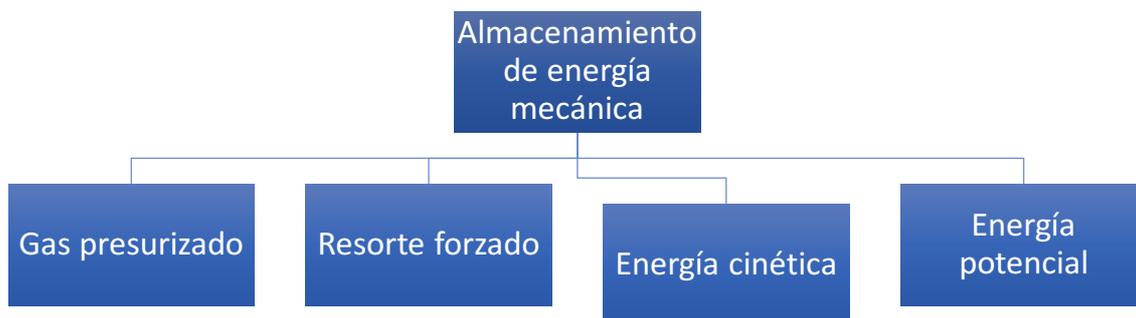


Ilustración 18. Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía mecánica

Una de las ventajas más útiles de estos mecanismos es que pueden liberar la energía fácilmente cuando su uso se enfoque en trabajos mecánicos. En la actualidad, existen tres tecnologías principales: volantes de inercia, bombeo hidráulico y aire comprimido.

Volantes de inercia

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Consiste en un cilindro giratorio de gran tamaño capaz de almacenar energía cinética, debido a la inercia generada cuando se frena el par motor que lo impulsa y al rozamiento prácticamente nulo que se consigue con cojinetes magnéticos. La energía almacenada se puede reutilizar disminuyendo la velocidad del volante mediante un par de desaceleración y devolviendo la energía cinética al motor eléctrico, que se utiliza como generador.

Los volantes pueden clasificarse en alta velocidad y baja velocidad de giro. Actualmente existen líneas de investigación abiertas para emplear esta tecnología en sistemas de frenado de trenes eléctricos, con la intención de recuperar la energía de la frenada y ayudar a reanudar la marcha.

Bombeo hidráulico

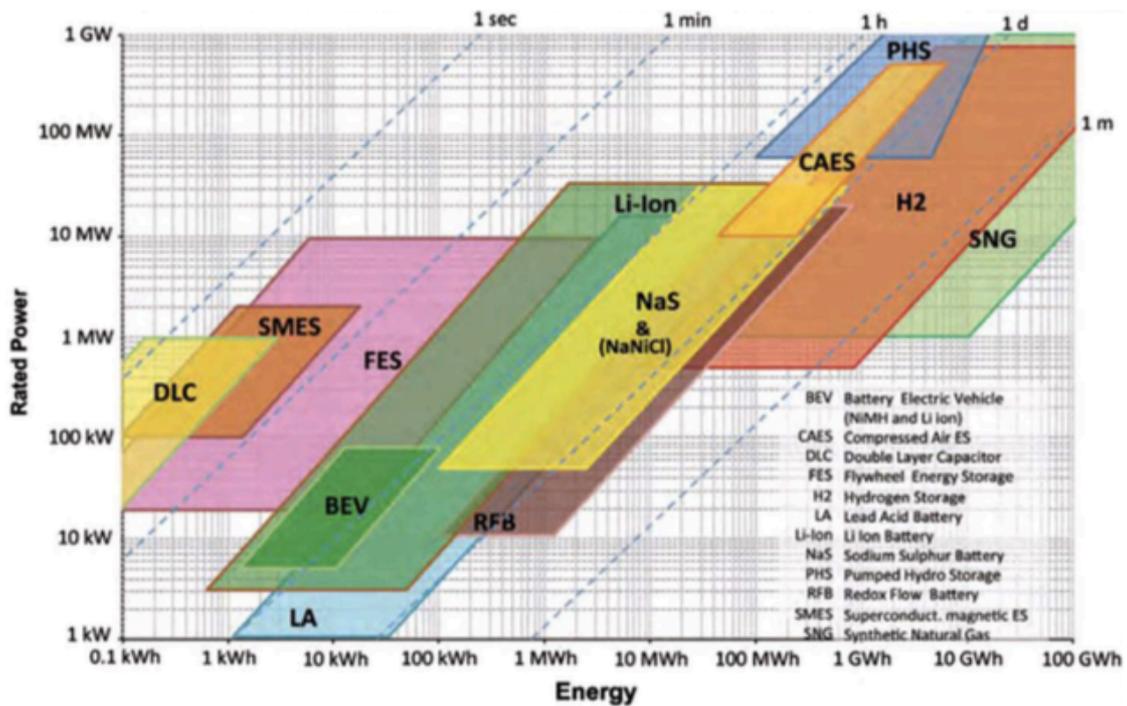
Estos sistemas almacenan y generan energía elevando o liberando agua entre dos embalses a distinta cota, utilizando la energía potencial para acumular energía cuando el precio es barato, y vendiéndola posteriormente en las horas punta, con lo que el coste de bombear el agua a una altura mayor se compensa y se rentabiliza al vender la energía en horas en las que el precio de la energía es más alto, o para cubrir interrupciones no planificadas. Actualmente es el método más efectivo de almacenamiento de energía a gran escala.

Se puede clasificar en tres tipos:

- Bucle cerrado: Dos depósitos separados por una distancia vertical, sin conexión a otra masa de agua.
- Semi-Abierto: Consiste en un embalse artificial y un embalse conectado a un flujo continuo de agua.
- Sistema abierto: Flujo de agua existente en ambos depósitos.

A modo de conclusión se adjunta la siguiente gráfica, en la que se muestra la capacidad, energía y periodo de tiempo en el cual puede suministrarse energía para cada una de las distintas tecnologías mencionadas anteriormente.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE



Gráfica 10. Capacidad, energía y tiempo de suministro de las distintas tecnologías

(Extraído de (16))

Como se puede ver en la gráfica anterior, existen tecnologías con un gran rango de aplicaciones, como las baterías Ion-Litio, el hidrógeno o los volantes de inercia.

En España no es usual el uso de sistemas de almacenamiento de energía a nivel industrial o doméstico, a no ser que se emplee tecnología fotovoltaica. Sí se usa en centrales generadoras o a gran escala, como es el caso del bombeo hidráulico, o en los sistemas de almacenamiento térmicos para centrales termosolares. Por otra parte, su gestión y explotación tampoco está aprovechada y podría realizarse de una forma mucho más eficiente, como se muestra en el punto de la gestión de demanda o el del coche eléctrico.

3.5.6. GESTIÓN DE LA DEMANDA

La gestión de la demanda se basa en condicionar el consumo de los usuarios de la red, con el fin de reducir el consumo de energía pico en las horas críticas. Al conseguir esto, la red obtendría menos pérdidas, su coste disminuiría y la calidad y seguridad del sistema aumentarían.

Entre los programas de gestión de la demanda, la fijación de precios a tiempo real (RTP) se ha considerado una estrategia adecuada para reducir el pico promedio de la demanda. No obstante, esta medida es poco efectiva, debido a que los consumidores no están dispuestos a redistribuir sus hábitos de consumo, Según (18), estudio en el cual se aplica una política de RTP en un sector residencial tradicional ubicado en Shanxi, China, solo el 5% de la carga máxima pudo transferirse a otros periodos. De hecho, la rigidez temporal de los hábitos de consumo de esa comunidad se mantendría, aunque el precio de la electricidad se duplicara, según la encuesta realizada.

Para abordar el estudio de esta área, se van a tener en cuenta las restricciones asociadas al sistema conjunto, los sistemas de almacenamiento de energía, y la posibilidad de comunicación

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

bidireccional entre la empresa distribuidora y el consumidor, que se considerará en disposición de una infraestructura dotada de inteligencia.

Dichos consumidores podrían optar por cargar su sistema de almacenamiento cuando el precio de la energía es más bajo, y descargar dicho sistema cuando el precio es más caro. Sin embargo, el suministro de energía, la demanda y la capacidad de la batería limitan el problema, convirtiéndose en las restricciones mencionadas anteriormente.

Por lo tanto, se propone un algoritmo distribuido en tiempo real (19) para encontrar el esquema de gestión óptima de energía para cada usuario y empresa distribuidora, cuyo objetivo se centra en maximizar el bienestar social. Con la descomposición dual entre ambas partes, el problema primario se desacopla en varios subproblemas independientes que cada usuario y empresa pueden resolver de forma distribuida en cada intervalo de tiempo para determinar localmente la mejor configuración entre demanda de energía, la carga y descarga de la batería y el suministro de energía, sin revelar o intercambiar información privada de ninguna de las partes.

Definición del problema

Para definir el problema, se considera un sistema con tantas empresas distribuidoras y usuarios inteligentes como sea necesario. Un usuario inteligente se define como su consumo, un contador inteligente, y un sistema de almacenamiento de energía, como puede ser una batería y su inversor correspondiente. Se asume que cada contador inteligente posee un controlador de consumo de energía (ECC), capaz de controlar el tiempo y modo de funcionamiento de cada electrodoméstico, incluida la energía del sistema de almacenamiento, y en conexión con la distribuidora a través de una red de área local.

Un día se considera un ciclo, y se divide en intervalos de tiempo de una hora, con lo que la configuración más adecuada se convierte en un problema de optimización que busca la gestión óptima de la energía para cada hora.

Restricciones del sistema

En primer lugar, cabe clasificar los consumos del usuario en “imprescindibles”, que deben emplearse durante un periodo de tiempo determinado, independientemente del precio de la electricidad, como podría ser una nevera, los aparatos de cocina o la iluminación, si hablamos de un consumidor residencial, y “prescindibles”, consumos que pueden realizarse en cualquier momento del día y se pueden adaptar al precio de la electricidad para producir ahorros, como la lavadora, secadora o lavavajillas en un consumidor residencial. Una vez se realiza esta clasificación, es posible definir unos umbrales de energía inferior, superior y una “línea base” constituida por el consumo máximo de los consumos imprescindibles. Además, existe una elasticidad en la demanda, con el fin de que los consumos prescindibles puedan realizarse en los plazos requeridos.

Por otra parte, es necesario definir el sistema de almacenamiento, la función de carga y descarga y las restricciones derivadas de su capacidad, estableciendo límite inferior y superior, y controlando su nivel de carga en todo momento.

Desde la perspectiva de la empresa distribuidora, se define el suministro de energía para cada intervalo de tiempo. Este suministro está limitado por las restricciones técnicas de operación de la red, como pueden ser el calentamiento de las líneas o la optimización del flujo de potencia.

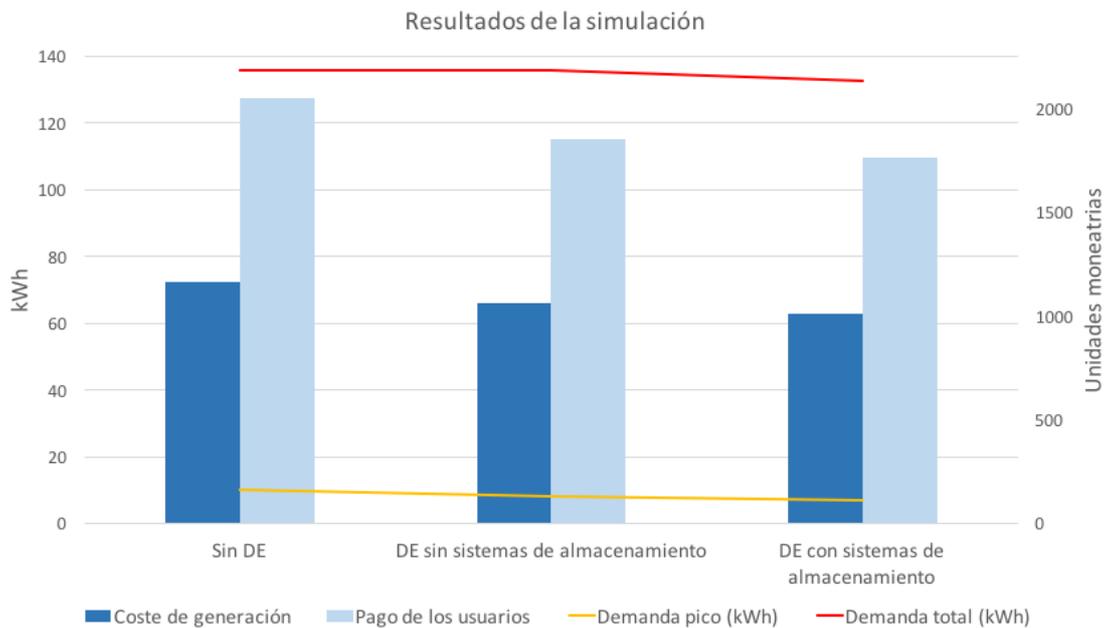
Formulación del problema

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Ya que cada usuario desea maximizar su propio beneficio, la configuración óptima individual podría no ser la más adecuada para el sistema a nivel global, por tanto, la función objetivo se define como los beneficios totales de todos los usuarios menos el coste de generación de energía, siempre cumpliendo las restricciones mencionadas anteriormente.

Resultados de la simulación

Para observar la efectividad del algoritmo, en (19) se simulan tres estrategias diferentes para una misma comunidad residencial. La primera estrategia no utiliza gestión de la demanda, la segunda la utiliza sin considerar sistemas de almacenamiento y la tercera sí los considera. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica.



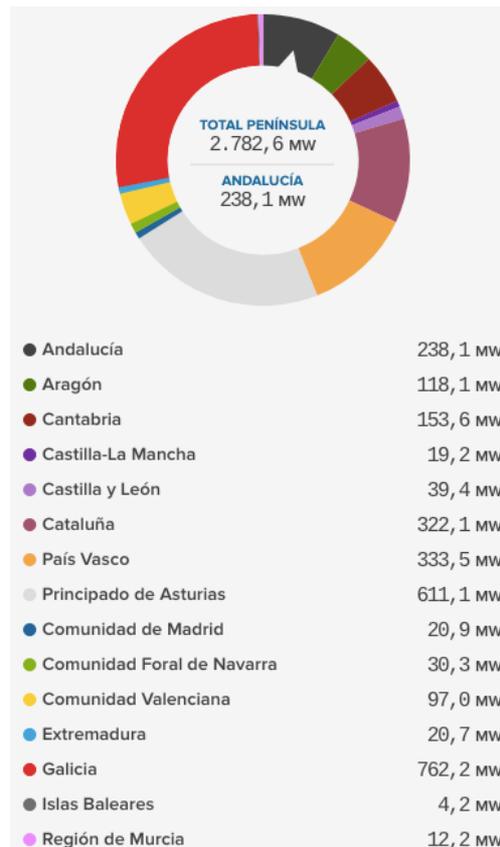
Gráfica 11. Resultados de la simulación del algoritmo de gestión de la demanda

(Extraído de (19))

Como se puede observar, disminuyen los costes de generación y de los usuarios de la red, así como la demanda pico y la demanda total cuando se consideran los sistemas de almacenamiento. Por lo tanto, se demuestra que el algoritmo beneficia a la totalidad de la sociedad.

Actualmente, Red Eléctrica de España posee un servicio de interrumpibilidad (20). Esta herramienta aporta flexibilidad y soporte cuando se producen desequilibrios entre la generación y la demanda. Sólo se aplica a grandes consumidores, los cuales reducen drásticamente su consumo para que la demanda se ajuste a la generación. A cambio, reciben una retribución económica. En la siguiente gráfica se muestra la potencia interrumpible por Comunidades Autónomas.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE



Gráfica 12. Potencia interrumpible para cada Comunidad Autónoma (Extraído de (20))

Más allá de esto, no se practica ninguna gestión de la demanda, con lo que la implementación del algoritmo anteriormente planteado podría producir grandes beneficios como demuestran los resultados de la Gráfica 11.

3.5.7. IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

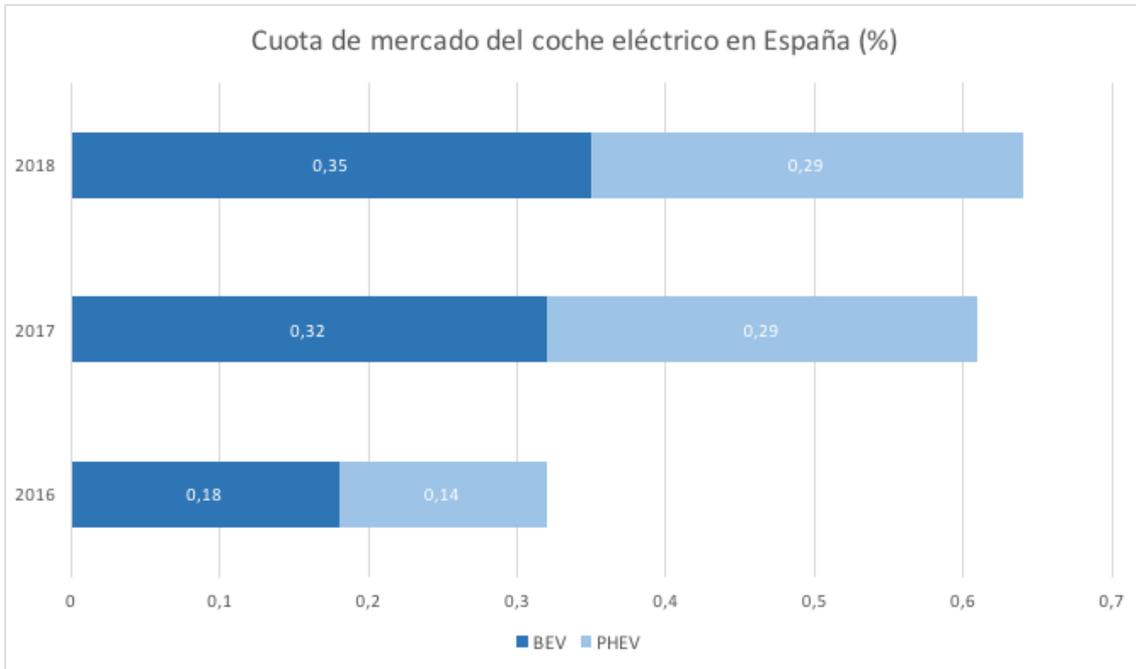
Un vehículo eléctrico es aquel que emplea uno o más motores eléctricos utilizando la energía almacenada en baterías recargables (BEV) o combinando un motor convencional y uno eléctrico, denominándose como híbrido enchufable (PHEV). En este apartado se van a valorar las consecuencias que tendría su implantación masiva en una red inteligente y en qué estado se encuentra España con respecto al resto de países en cuanto a la aceptación de esta tecnología.

En primer lugar, es posible explotar la utilidad del vehículo eléctrico como elemento de una red eléctrica. Una de las ventajas principales consiste en la posibilidad de realizar una **recarga inteligente** (21). Esto consiste en recargar el vehículo en las horas valle, cuando hay menos demanda de energía y, por tanto, ésta es más barata, y descargar sus baterías (Vehicle to Grid, V2G) en las horas punta para aumentar la seguridad del suministro; esto se traduciría en una serie de beneficios:

- Reducción de los picos de demanda en las horas punta.
- Aumento de la eficiencia del sistema, como consecuencia del punto anterior.
- Mayor integración de energías renovables, ya que la energía que antes se extraía de centrales térmicas en las horas punta se sustituye con las baterías de los vehículos.
- Reducción de las emisiones, debido al descenso de energía de origen térmico.

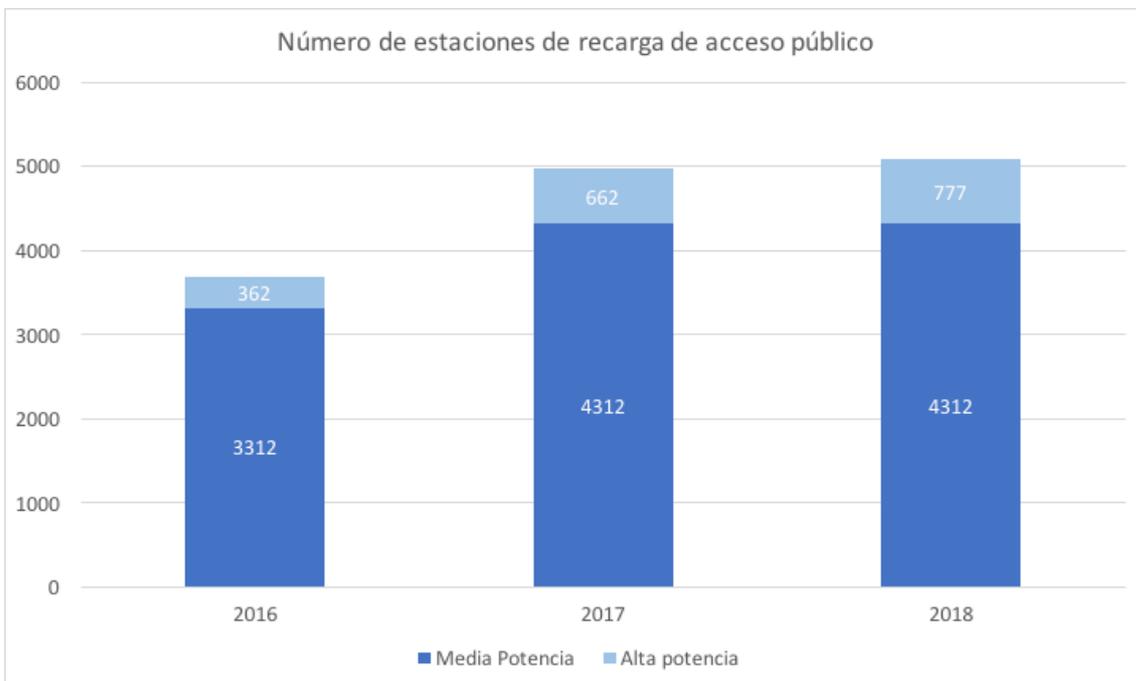
DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

Según (22) estas son las cifras de la cuota de mercado del coche eléctrico y el número de estaciones de recarga disponibles de forma pública en los últimos 3 años:



Gráfica 13. Cuota de mercado del coche eléctrico en España

(Elaboración propia a partir de (22))



Gráfica 14. Estaciones de recarga públicas en España

(Elaboración propia a partir de (22))

Como se puede ver en las gráficas, tanto las estaciones como la cuota de mercado han aumentado, pero su cómputo total es muy bajo, quizá debido a los siguientes inconvenientes:

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Falta de desarrollo tecnológico en el campo de las baterías, los vehículos eléctricos poseen menos autonomía que los convencionales.
- Su coste es mayor que el de un vehículo convencional.
- Para recargar sus baterías, debe existir una conexión a la red eléctrica.
- El tiempo de recarga es considerablemente mayor que el tiempo de repostaje en un vehículo convencional.

Actualmente, REE posee un “Simulador de recarga del Vehículo Eléctrico”, en el cual se pueden definir determinados parámetros para comprobar la variación de la curva de demanda del país con la integración del vehículo eléctrico. Los parámetros son los siguientes:

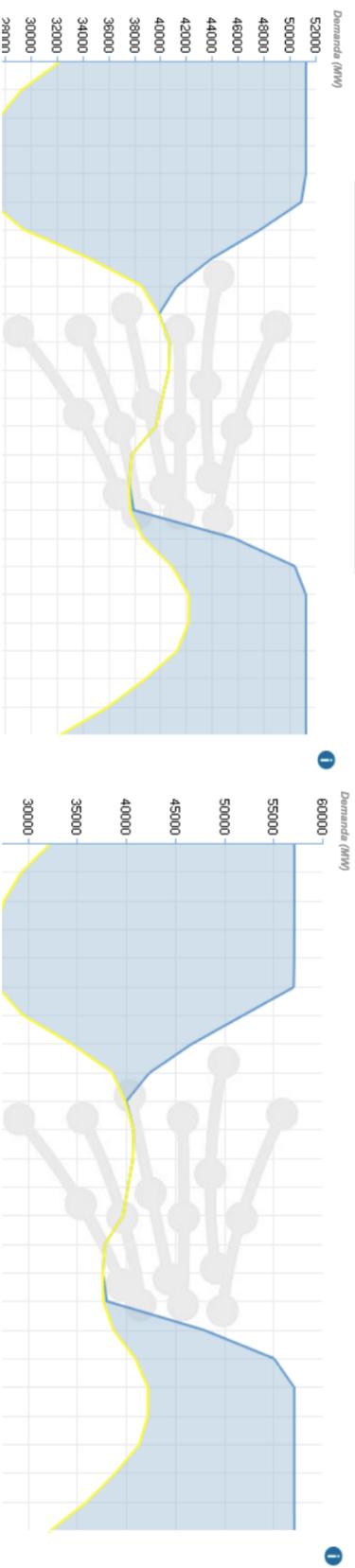
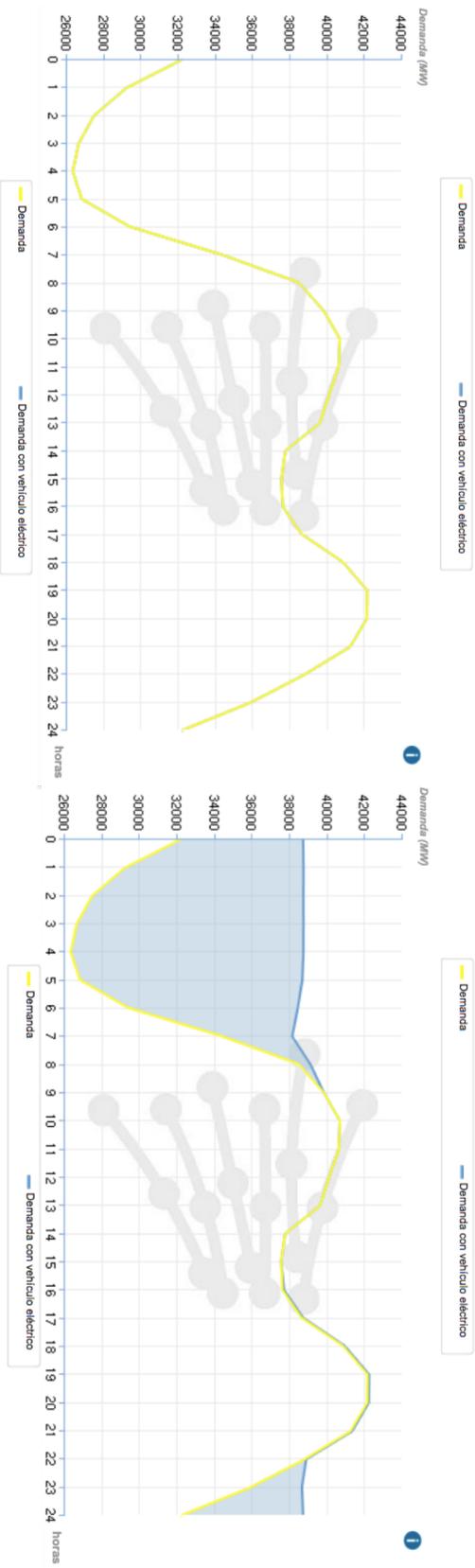


Ilustración 19. Variables del simulador de recarga del Vehículo Eléctrico

(Extraído de (23))

Para evaluar el impacto de la implantación del vehículo eléctrico se van a asumir unas condiciones “ideales” sobre las que poder evaluar la evolución del sistema en torno a una única variable, el porcentaje de vehículos eléctricos respecto a la totalidad del parque motor. Como parámetros se van a fijar las características de una red inteligente, suponiendo 100% de recarga inteligente, y 100% de acceso a recarga en el trabajo y en electrolinerías.

Los resultados obtenidos se ven en la siguiente imagen:



Gráfica 15. Resultados de la Simulación del Impacto del Vehículo Eléctrico (Grado de penetración en el mercado, de arriba abajo y de izquierda a derecha. de 0, 25, 75 y 100%).

(Extraído de (23))

Como se puede ver en la Gráfica 14, la curva de demanda se aplana cuando existe un 25% de vehículos eléctricos, y la demanda va aumentando en las horas nocturnas para porcentajes mayores. Esto implicaría una mayor integración de las renovables y un gran impacto sobre el mercado de los combustibles fósiles, cuya demanda se reduciría de forma drástica.

No obstante, aún estamos muy lejos de este punto; como se observa en las gráficas anteriores, la cuota del mercado del coche eléctrico es bajísima, y, si bien empiezan a emerger los puntos de recarga, todavía presenta un coste elevado y falta mucha concienciación por parte del usuario.

Además, actualmente no se realiza una gestión de la recarga inteligente, la cual se asemeja en la forma de su automatización al algoritmo expuesto en el punto de la gestión de la demanda. Su implantación sería muy ventajosa para aumentar la seguridad del sistema eléctrico, así como su fiabilidad y eficiencia.

4. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Con el propósito de recopilar toda la información y exponer lo más importante se concluye con las siguientes afirmaciones generales:

- La transición de una red eléctrica convencional a una red eléctrica inteligente se puede realizar siguiendo una metodología y un orden adecuado para su correcta implantación. Los pasos a seguir podrían resumirse en:
 - Infraestructura que permita un control adecuado a nivel operacional
 - Infraestructura de comunicaciones que permita un flujo de información bidireccional
 - Implantación de una infraestructura de medición inteligente, que sea capaz de dar soporte a las nuevas funcionalidades de la red inteligente
 - Implementación de algoritmos que permitan la resolución automática de numerosos problemas de optimización, como la autorreparación de la red o la gestión de la demanda
- Actualmente, la REE se encuentra en la fase de integración de la medición inteligente, paso fundamental para continuar con la dotación de inteligencia a la red.

Además, se pueden extraer las siguientes conclusiones de cada área de mejora:

- **Infraestructura de la red inteligente**- La arquitectura del sistema eléctrico debe incluir un sistema de telecomunicaciones que permita la transmisión bidireccional de datos, además de una infraestructura de medición avanzada, compuesta principalmente por el contador inteligente. España cuenta con una implantación extendida de tecnología de telecomunicaciones, así como de medición inteligente en prácticamente la totalidad del sector residencial y de puntos de suministro de menos de 15 kW.
- **Automatización** – A nivel de gestión del sistema a nivel técnico es necesario un control similar al de una red eléctrica convencional para mantener la estabilidad de determinadas variables clave. Para ello, se emplean tres niveles de control:
 - Control primario: Mantiene los valores de tensión de referencia para cada nudo de la red. Además, equilibra la generación y la demanda.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

- Control secundario: Ajusta los valores de frecuencia de referencia en cada nodo y reajusta los flujos de potencia programados entre áreas.
- Control terciario: Restituye la reserva de generación ajustando la programación de los generadores.

Actualmente la red eléctrica de España cuenta con este tipo de control.

- **Flujo de carga, autorreparación y gestión de la demanda** - Es fundamental la implementación de algoritmos que permitan la resolución de problemas de optimización; en concreto, la optimización del flujo de carga, la autorreparación de la red y la gestión de la demanda. En sus respectivos apartados se ha abordado su explicación teórica y las ventajas que ofrece su implantación.

En España no se aplican estos algoritmos, exceptuando el flujo de carga con las peculiaridades mencionadas en el propio apartado.

- **Seguridad** - La seguridad desde el punto de vista técnico debe abordarse mediante protocolos de actuación, empezando por la prevención, y asumirse como una prioridad, debido al alto número de amenazas potenciales, tanto artificiales como naturales. Por otra parte, la seguridad desde el punto de vista político-social debe asegurarse mediante políticas reguladoras, incentivos y subvenciones para promover su desarrollo. Además, es necesaria una concienciación profunda en todos los agentes del sistema para potenciar la efectividad de la red inteligente.
- **Implantación del vehículo eléctrico** - Actualmente, se están dando los primeros pasos hacia la implantación del vehículo eléctrico en España. No obstante, la cuota de mercado todavía es muy baja, quizá debido a las incomodidades que supone con respecto a un vehículo convencional. Por otra parte, no se explota la recarga inteligente que podría traducirse en un aumento de fiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico español, así como de un descenso del uso de tecnologías térmicas.

Para clarificar las conclusiones se presenta la siguiente tabla resumen, que recoge las principales diferencias entre una red inteligente “ideal” y la red eléctrica española:

Característica	Red Eléctrica de España	Smart Grid
Infraestructura técnica	✓✓✓	✓✓✓
Telecomunicaciones	✓✓✓	✓✓✓
AMI	✓✓	Completamente implementada
Control 1º, 2º y 3º	✓✓✓	✓✓✓
Flujo de carga	✓ (Mejorable)	✓✓✓
Autorreparación	x	✓✓✓
Gestión de la demanda	✓ (Interrumpibilidad)	✓✓✓
Seguridad técnica	✓✓ (Falta autorreparación)	✓✓✓
Ciberseguridad	✓ (Incompleta)	Capaz de neutralizar amenazas
Seguridad político-social	✓	Total
Implantación del vehículo eléctrico	x	Total

Tabla 11. Tabla resumen con las principales diferencias entre una red inteligente y la red española

5. BIBLIOGRAFÍA

1. **REE**. Mapas de la red. *Red Eléctrica de España*. [En línea] 31 de Diciembre de 2017. <http://www.ree.es/es/actividades/gestor-de-la-red-y-transportista/mapas-de-la-red>.
2. **REINTEL**. Mapa de red de fibra oscura. *Red Eléctrica de Infraestructuras de Telecomunicación*. [En línea] 22 de Mayo de 2018. <http://www.reintel.es/es/infraestructuras/mapa-red>.
3. **Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia**. *Informe sobre la efectiva integración de los contadores con telemedida y telegestión de consumidores eléctricos con potencia contratada inferior a 15 kW (Equipos de medida tipo 5) a finales del primer semestre de 2016*. Madrid : CNMC, 2017.
4. **REE**. Mapa de consumidores domésticos con contador inteligente telegestionado por Comunidad Autónoma. *Sistema de Información del Operador del Sistema*. [En línea] 1 de Mayo de 2018. <https://www.esios.ree.es/es/mapas-de-interes/mapa-de-consumidores-domesticos-con-contador-inteligente-telegestionado-por-comunidad-autonoma>.
5. **ESIOS**. Generación y consumo. *ESIOS electricidad*. [En línea] 6 de Mayo de 2018. <https://www.esios.ree.es/es/generacion-y-consumo>.
6. **Operador del Mercado Ibérico Español**. OMIE. *OMIE*. [En línea] 6 de Mayo de 2018. <http://www.omie.es>.
7. *A survey on the development status and challenges of smart grids in main driver countries*. **Yao Zhang, Wei Chen, Weijun Gao**. 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 3-7.
8. **Navigant**. *Ontario Smart Grid Assessment and Roadmap*. Ontario : Ontario Ministry of Energy, 2015.
9. *Smart grid development in Quebec: A review and policy approach*. **Maya Jegen, Xavier D. Philion**. 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 3-5.
10. *VerSAMI: Versatile and Scalable key management for Smart Grid AMI systems*. **Mourad Benmalek, Yacine Challal, Abdelouahid Derhab, Abdelmadjid Bouabdallah**. 2018, Computer Networks, pág. 3.
11. **UPV, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la**. Apuntes de "Sistemas eléctricos y tecnología eléctrica" de 3º de GIE.
12. *A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids*. **Hamdi Abdi, Soheil Derafshi Beigvand, Massimo La Scala**. 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
13. *Smart grids security challenges: Classification by sources of threats*. **Abdulrahman Okino Otuoze, Mohd Wazir Mustafa, Raja Masood Larik**. 2018, Journal of Electrical Systems and Information Technology, pág. 9.
14. *A comprehensive framework for optimal day-ahead operational planning of self-healing smart distribution systems*. **Vahid Hosseinneshad, Mansour Rafiee, Mohammad Ahmadian, Pierluigi Siano**. 2018, Electrical Power and Energy Systems.
15. *Cyber-security in smart grid: Survey and challenges*. **Zakaria El Mrabet, Naima Kaabouch, Hassan El Ghazi, Hamid El Ghazi**. 2018, Computers and Electrical Engineering.
16. *Classification and assessment of energy storage systems*. **Mukrimin Sevket Guney, Yalcin Tepe**. 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
17. **Tesla Inc**. Powerwall. *La batería Tesla para el hogar*. [En línea] 2018. https://www.tesla.com/es_ES/powerwall.
18. *How real time pricing modifies Chinese households' electricity consumption*. **Hongxia Wang, Hong Fang, Xueying Yu, Sai Liang**. 2017, Journal of Cleaner Production.
19. *Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid*. **Mian Hu, Jiang-Wen Xiao, Shi-Chang Cui, Yan-Wu Wang**. 2018, Electrical Power and Energy Systems.
20. **REE**. *Gestión de la demanda | ESIOS*. [En línea] Junio de 2018. <https://www.esios.ree.es/es/gestion-de-la-demanda>.
21. —. Vehículo eléctrico. [En línea] 2018. <http://www.ree.es/es/red21/vehiculo-electrico>.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA CONVERTIR UNA RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL EN UNA SMART GRID: APLICACIÓN A LA REE

22. **European Alternative Fuels Observatory.** Spain | EAFO. [En línea] 2018.
<http://www.eafo.eu/content/spain>.
23. **REE.** Simulador del Impacto del VE. [En línea] 2018.
<http://www.ree.es/sites/all/SimuladorVE/simulador.php>.