

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

### Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

#### Trabajo Fin de Máster

## Detección y predicción de errores en smart grids mediante modelos de inteligencia artificial

ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Paula Bartolomé Mora

**Tutor:** Elisa Rojas Sánchez

**Cotutor:** David Carrascal Acebron

2024



**Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación**



Universidad  
de Alcalá

Madrid, 1 de julio de 2024

# **UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

## **ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación**

**Trabajo Fin de Máster**

**Detección y predicción de errores en smart grids mediante  
modelos de inteligencia artificial**

**Autor: Paula Bartolomé Mora**

**Tutor: Elisa Rojas Sánchez**

**Cotutor: David Carrascal Acebron**

**Tribunal:**

**Presidente:**

**Vocal 1º:**

**Vocal 2º:**



*AQUI DEDICATORIA*



# Agradecimientos

AQUI AGRADECIMIENTOS





# Resumen

AQUI RESUMEN

**Palabras clave:**



# Abstract

In this Master's Thesis (TFM) we present... AQUI ABSTRACT

**Keywords:**



*AQUI CITA CELEBRE*

AQUI AUTOR



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Presentación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Estructura del TFM . . . . .	3
<b>2. Estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1. Smart Grids . . . . .	5
2.1.1. Prosumidores y microgrids . . . . .	7
2.1.1.1. Mercado energético . . . . .	8
2.1.2. Internet of Energy . . . . .	11
2.1.3. Estructura de una Smart Grid . . . . .	11
2.1.3.1. Generación . . . . .	11
2.1.3.2. Distribución . . . . .	13
2.1.3.3. Consumo . . . . .	15
2.1.4. Protocolos . . . . .	17
2.1.5. Topología de red . . . . .	17
2.1.6. Tecnologías . . . . .	17
2.1.7. Seguridad en Smart grids . . . . .	17
2.1.8. Situación en España . . . . .	17
2.1.9. A futuro . . . . .	18
2.2. Inteligencia Artificial . . . . .	18
2.3. Machine Learning/IA . . . . .	18
2.4. Herramientas software . . . . .	18
<b>3. Diseño y análisis de datos</b>	<b>19</b>
3.1. DEN2NE . . . . .	19
3.2. Análisis de fuentes de datos . . . . .	19
3.3. Preprocesado . . . . .	19

<b>4. Desarrollo y evaluación del modelo</b>	<b>21</b>
4.1. Selección de modelos . . . . .	21
4.2. Modelo 1 . . . . .	21
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>23</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>25</b>
<b>Lista de Acrónimos y Abreviaturas</b>	<b>29</b>
<b>A. Anexo I - Pliego de condiciones</b>	<b>31</b>
<b>B. Anexo II - Presupuesto</b>	<b>33</b>
<b>C. Anexo III - Manuales de usuario e Instalación</b>	<b>35</b>

---



## Índice de figuras

2.1. Flujo bidireccional de datos y energía en una <i>smart grid</i> [8] . . . . .	6
2.2. Estructura de la respuesta a la demanda en el contexto de una <i>smart grid</i> con prosumidores [?] . . . . .	7
2.3. Modelo basado en las interacciones de los agregadores con los prosumidores y el mercado eléctrico [12] . . . . .	9
2.4. Estrategia de <i>Demand Side Management</i> (DSM) basada en interacciones individuales de cada consumidor con la compañía [15] . . . . .	10
2.5. Estrategia de DSM para smart grids basada en interacciones entre los usuarios y la compañía [15] . . . . .	11
2.6. Estructura de componentes de una <i>Smart Grid</i> (SG) [5] . . . . .	12
2.7. Esquema de funcionamiento de una unidad <i>Combined Heat and Power</i> (CHP) [17] . . . . .	13
2.8. Gestión de operaciones en una unidad CHP [18] . . . . .	14
2.9. Instalación de un <i>Static Var Compensator</i> (SVC) en Sylling (Noruega) [20] . . . . .	16
2.10. Red nacional de transmisión energética [24] . . . . .	17



# Índice de tablas

2.1. Tecnologías FACTS de 1ª y 2ª generación . . . . .	15
--	----



# Índice de Códigos



# 1. Introducción

En este primer capítulo, se presentarán a modo de introducción los aspectos más relevantes del Trabajo Fin de Máster (TFM) desarrollado, como son la transformación de las redes energéticas en nuevas redes inteligentes de energía (del inglés SG) y su consecuente necesidad de monitorización, además del creciente auge de la Inteligencia Artificial (IA) y de las técnicas de aprendizaje automatizado (del inglés *Machine Learning* (ML)).

De la misma manera, se hará hincapié en los objetivos que se establecen para este TFM, describiendo así la secuencia de acciones que se seguirá para poder llevarlos a cabo. Dichos objetivos serán los pilares sobre los que se sustente el diseño y el desarrollo de un modelo eficiente basado en ML para la detección y predicción de errores en SGs. De forma adicional, se incluirá un último apartado en referencia a la estructura de capítulos que seguirá este TFM, así como una explicación breve sobre los temas que se abordarán en cada uno de ellos.

## 1.1. Presentación

En los últimos años, el concepto de red eléctrica convencional está siendo completamente transformado como resultado del creciente desarrollo de las SGs [1] [2]. La posibilidad de brindar a tiempo real una monitorización del proceso de distribución eléctrica y a su vez, integrar una participación activa del consumidor convierte a estas redes en uno de los pilares de la transición hacia la descarbonización.

En este contexto, se ha convertido en un objetivo primordial el diseño de nuevos protocolos que provean un encaminamiento y una distribución energética eficientes. Es por ello que, desde el equipo de investigación NetIS de la *Universidad de Alcalá* (UAH) se ha desarrollado el algoritmo *Distributed ENergy ENvironments and Networks* (DEN2NE) [3], con el fin de automatizar la gestión de los recursos en entornos del Internet de las Cosas (del inglés Internet of Things (IoT)), enfocándose especialmente en SGs.

DEN2NE pretende realizar una distribución óptima de los recursos energéticos de cada uno de los nodos que presenta la red para conseguir finalmente un balance a nivel global.

Sin embargo, el algoritmo se encuentra actualmente con un desafío a afrontar, basado en la imperiosa necesidad de poder detectar y predecir de una forma precisa los posibles errores que se puedan producir en el proceso de distribución energética entre nodos. En caso de fallos en la red, DEN2NE debería tener la capacidad de responder de una forma rápida y específica, pues es de vital importancia tomar acciones a nivel de distribución para evitar que los errores se agraven y escalen al resto de la red.

## 1.2. Objetivos

Tomando en consideración el apartado anterior, se define como objetivo principal de este TFM el desarrollo de técnicas de ML para identificar de forma precisa los posibles errores que se pueden producir en una SG durante el proceso de distribución energética que, como se ha introducido, se aplicará mediante el algoritmo DEN2NE.

La identificación de patrones se apoyará en el análisis de grandes volúmenes de datos provenientes de implementaciones de SGs reales. Estos serán previamente procesados de una forma exhaustiva para reducir su tamaño y seleccionar la información verdaderamente necesaria para el posterior desarrollo de técnicas de ML.

Por tanto, el presente TFM permitirá determinar un modelo final de predicción de fallos para entornos de SGs. Entrando en detalle, se pueden definir los diferentes objetivos en los siguientes puntos:

- **Estudio del estado del arte y análisis de las diferentes fuentes de datos reales disponibles.** Se realizará un estudio en profundidad del contexto en el que se engloban las SGs y los protocolos de distribución de recursos, poniendo el enfoque en DEN2NE. Será necesaria una investigación sobre la disponibilidad de fuentes de datos reales, además de una evaluación de su viabilidad para este TFM.
  - **Definición y procesamiento del volumen de datos para el posterior desarrollo.** El procesamiento de los datos adquiridos será fundamental para simplificar su compresión. Además, se llevará a cabo la selección de la cantidad de información realmente útil para el desarrollo.
  - **Planteamiento de diferentes escenarios.** A partir del volumen final de datos que se elaborará, se plantearán una serie de escenarios mediante la generación de topologías de nodos con la herramienta BRITE [4].
  - **Generación y simulación de topologías.** Las topologías se importarán a un simulador propietario realizado en python para obtener el conjunto de datos final.
-



- **Desarrollo y entrenamiento de diferentes modelos de /glmml.** Se realizará un estudio sobre las posibles técnicas de ML a emplear y se procederá a seleccionar las más apropiadas, según el contexto en el que se engloba este TFM. Por consiguiente, se llevará a cabo el desarrollo y el entrenamiento de los mismos tomando como base los datos procesados anteriormente.
- **Análisis y evaluación de los resultados obtenidos.** Los resultados de detección y predicción de errores de los diferentes modelos de ML serán analizados. Se determinará de forma concluyente cuál aporta una mayor efectividad para poder diagnosticar con un alto porcentaje de precisión los errores que se producen en una SG.

### 1.3. Estructura del TFM

En esta sección se expone de forma general la estructura de capítulos que tendrá la memoria del presente TFM con una breve descripción del contenido que abarcarán cada uno de ellos.

**Capítulo 1: Introducción.** Se comenzará esta memoria con una presentación de los aspectos más significativos. Se expondrán las motivaciones que han originado la realización de este TFM y los objetivos que se pretenden alcanzar con el mismo.

**Capítulo 2: Estado del arte.** Se establecerá el marco teórico en el que se sitúa este TFM y se documentarán los conceptos principales para introducir en un contexto lo suficientemente consistente el diseño y desarrollo práctico posterior.

**Capítulo 3: Diseño y análisis de datos.** Se llevará a cabo un análisis sobre las posibilidades de diseño a través de una investigación exhaustiva sobre las fuentes de datos de implementaciones reales existentes. Por consiguiente, se definirá todo el procesamiento necesario para seleccionar la información útil sobre la que entrenar los modelos de ML a desarrollar.

**Capítulo 4: Desarrollo y evaluación de los modelos.** Se describirá en detalle el desarrollo de las técnicas de ML que han sido seleccionadas según el contexto en el que se engloba este TFM. Los modelos obtenidos serán entrenados, analizados y por consiguiente, evaluados. Los resultados definirán finalmente el modelo más apropiado para diagnosticar con alta precisión los errores que se pueden producir en el entorno de una SG.

---

**Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro.** Se finalizará la memoria con un capítulo enfocado a las conclusiones obtenidas tras la realización de este TFM. Además, se indicarán las posibles vías de trabajo a futuro.

**Bibliografía.** Se incluirán todas las referencias de artículos, libros, páginas web u otros materiales que han sido consultados y empleados para elaborar esta memoria. Se seguirá el estilo de citación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), así como las recomendaciones oficiales de la normativa sobre TFMs de la UAH.

**Anexos.** Se añadirán los manuales de usuario y de instalación de herramientas. También, se expondrán las especificaciones del *hardware* sobre el que se ha desarrollado este TFM y una estimación de su presupuesto.

---

## 2. Estado del arte

En el presente capítulo se entrará en profundidad en los conceptos más relevantes relacionados con el TFM. Además, se describirán las diversas herramientas de software que se emplearán. El propósito principal de presentar el estado del arte es establecer un marco teórico consistente que permita conseguir una mayor comprensión del contexto previamente a la exposición del desarrollo del proyecto.

### 2.1. Smart Grids

En las últimas décadas, se ha observado una transformación integral del modelo asociado a la red eléctrica convencional. El aumento de la energía demandada por los usuarios finales y los requisitos cada vez mayores de la industria ha tenido como consecuencia que algunos países hayan intentado diseñar redes eléctricas agrupadas en un conjunto de grandes redes nacionales. De este modo, todas las fuentes energéticas disponibles pueden estar conectadas para ser gestionadas conjuntamente en función de la demanda recibida, además de conseguir una coordinación a alto nivel. [5]

Sin embargo, una red eléctrica no se puede definir como una entidad única e independiente, pues se trata de una agregación de redes, compañías energéticas y operadores que trabajan en distintos niveles de comunicación. Es por ello, que la idea de desarrollar una gran red nacional encuentra cierto equilibrio energético, pero no llega a los altos porcentajes de eficiencia que pueden proveer las redes inteligentes energéticas o de otra forma, las *smart grids* (SG).

La iniciativa sobre redes inteligentes del IEEE, califica a las *smart grids* [6] como "imperativas y revolucionarias que implican nuevas capacidades de comunicación y control, fuentes de energía, modelos de generación y adherencia a estructuras regulatorias transjurisdiccionales". No obstante, se puede definir una *smart grid* como una red inteligente con la capacidad de distribuir los suministros de energía de forma optimizada a los usuarios, basándose en la información que recoge de los mismos. Es por ello que supone una actualización digital de las redes de distribución y transmisión a larga distancia para incorporar sistemas de monitorización y control a tiempo real. [7]

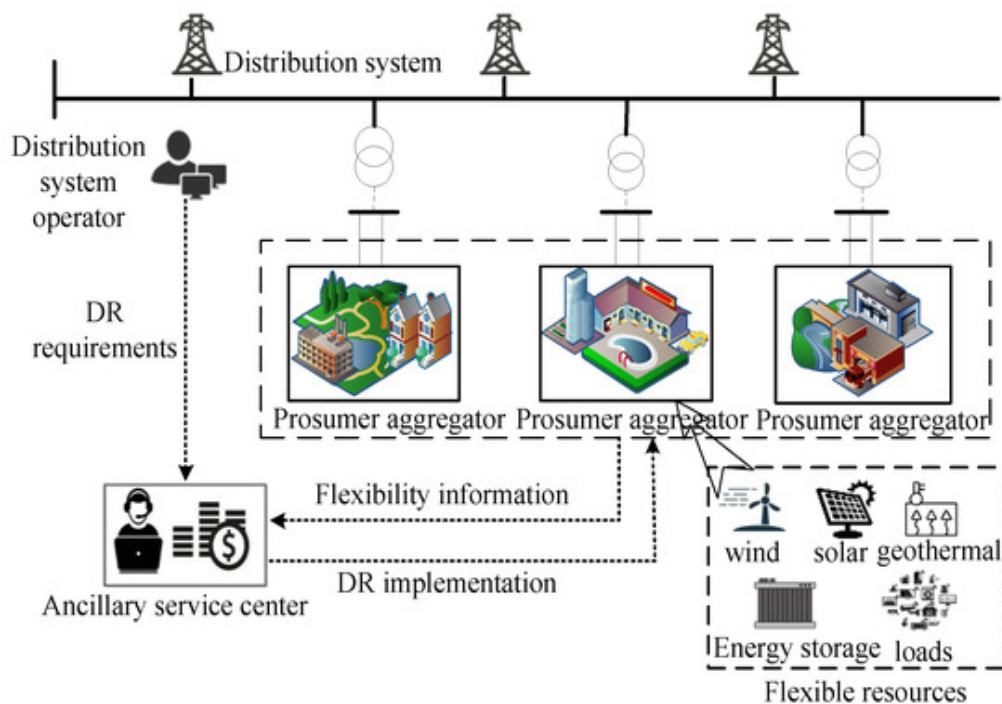


lando información para trasladarla al resto de la red. Esto tiene como ventaja una gran reducción de los costes derivados de la distribución y transmisión en el sistema, ya que se evita proporcionar más cantidad de energía de la requerida por las líneas finales. [7]

Sin embargo, como se expondrá más adelante en la Sección 2.1.3.3, este proceso de clasificación de usuarios requerirá del análisis de grandes volúmenes de datos adquiridos a tiempo real, por lo que se aumentará la complejidad del sistema a costa de alcanzar la eficiencia.

### 2.1.1. Prosumidores y microgrids

Dentro del presente contexto, en referencia a los usuarios es preciso introducir el término de prosumidor [? ]. Se puede determinar como prosumidora a toda entidad o usuario final que tiene la capacidad de producir de forma alternativa recursos energéticos, además de poder consumirlos. En la Figura 2.2 se puede visualizar cómo se estructura la SG en un conjunto de distintas comunidades o agregaciones de prosumidores con el fin de crear microrredes de distribución y almacenamiento energético (del inglés *microgrids*).



**Figura 2.2:** Estructura de la respuesta a la demanda en el contexto de una *smart grid* con prosumidores [? ]

En este caso es imprescindible que los equipos y dispositivos dedicados a la generación de electricidad se encuentren dentro de la microrred o en una ubicación cercana a la misma. Así, se podrá abastecer a los usuarios del conjunto de forma eficiente, reduciendo los costes relacionados con la transmisión energética.

Este tipo de esquema puede ser aplicado en diferentes entornos, como pueden ser los residenciales, industriales o agrícolas, para conseguir descentralizar la gestión de los recursos. Sin embargo, debe existir cierta gestión externa y coordinada de todas estas microrredes o comunidades de usuarios. Esta es llevada a cabo por una entidad denominada como operador del sistema distribuido (del inglés *Distribution System Operator* (DSO)) [9] [10]. Algunas de sus funciones principales se basan en asegurar el abastecimiento de recursos en el interior de las microrredes en función de la demanda existente y en supervisar el estado operativo la infraestructura de red para garantizar su estabilidad y seguridad.

Por otro lado, se encuentra también la figura del centro de servicios auxiliares [9], que se encarga de recibir la información sobre los recursos energéticos de los prosumidores y cuantificar en función de la oferta y demanda el beneficio económico que obtendrán los prosumidores. Estos normalmente son gestionados por los operadores del mercado eléctrico, pero puede variar según la región o el país.

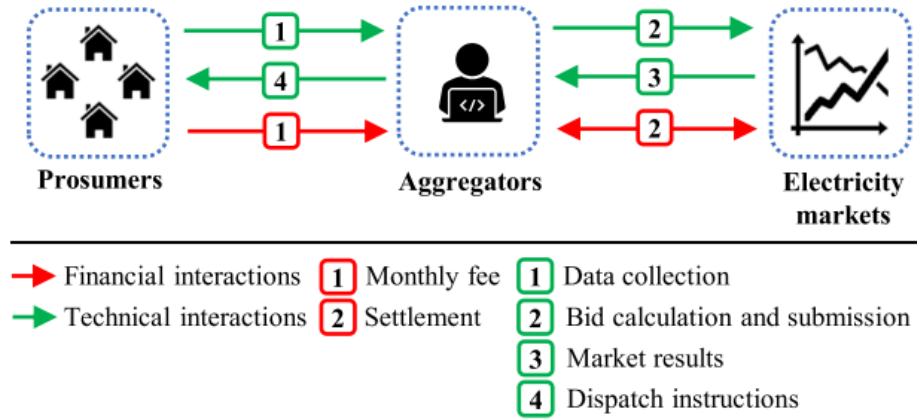
#### **2.1.1.1. Mercado energético**

Las agregaciones de prosumidores posibilitan el autoconsumo y la compartición de los recursos generados por sí mismos con los demás participantes de la microrred, incluso con el resto de la SG. La mayoría de los prosumidores, sobre todo en entornos residenciales son de pequeño tamaño y tienen mayores complicaciones para participar en los mercados eléctricos por sí mismos.

Por ello, los agregadores [11] [9] se encargan de facilitar esta tarea para que una cantidad de prosumidores locales puedan actuar en conjunto como fijadores de precios de compra/-venta en el mercado eléctrico global. Es decir, cada agregador se encarga de representar a los prosumidores que lo componen y actúa como intermediarios entre los mismos y el conjunto de mercados energéticos.

A cambio, cada prosumidor debe pagar un plan mensual a la compañía para cubrir los costes eléctricos y así, dejar la responsabilidad de las transacciones a los agregadores para que operen de forma flexible. En esta operativa también incide el DSO, el cual se encarga de que las transacciones de compra/venta sigan el cumplimiento de los estándares y regulaciones establecidos en el mercado energético.

---



**Figura 2.3:** Modelo basado en las interacciones de los agregadores con los prosumidores y el mercado eléctrico [12]

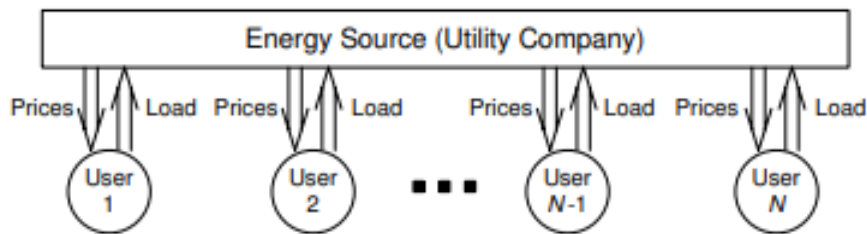
A partir del funcionamiento expuesto y de la Figura 2.3, se pueden diferenciar los tipos de interacciones que se producen en este modelo [12]:

- Interacciones técnicas
  1. Recopilación y adquisición de datos sobre los recursos de los prosumidores para su posterior procesamiento en los agregadores.
  2. Cuantificación y presentación de ofertas desde los agregadores hacia los mercados mayoristas de electricidad.
  3. Comunicación de los resultados de diferentes mercados a los agregadores.
  4. Envío de instrucciones o recursos distribuidos en función de los resultados del mercado.
- Interacciones financieras
  1. Pago de tarifa mensual de cada prosumidor al agregador.
  2. Liquidación de las transacciones trasladadas desde los prosumidores en el mercado eléctrico (cobro por demanda y pago por generación).

En cuanto al proceso de fijación de precios, generalmente, se adoptan tarifas minoristas dinámicas según el instante temporal, como pueden ser la fijación de precios por tiempo de uso (del inglés *Time-of-Use Pricing* (TOU)) o en tiempo real (del inglés *Real Time Pricing* (RTP)). Dentro de este contexto es preciso introducir los programas de gestión del lado de la demanda (del inglés DSM). Como término, un programa DSM es un programa basado en el control de las interacciones de consumo y de gestión de cargas residenciales desde el lado del cliente.

Teniendo en cuenta el modelo de interacciones expuesto anteriormente, se puede expresar que un DSM tiene como pilar fundamental la distribución de recursos energéticos de manera eficiente y acorde a la demanda y a la oferta. Permite reducir el coste de la adquisición energética y los costes asociados a la distribución como consecuencia de minimizar el número de interacciones necesarias entre el prosumidor y el resto de entidades del sistema. [13]

Por lo tanto, volviendo a los modos de dinamización de las tarifas, si por ejemplo se emplea RTP, se buscará lograr el equilibrio de la demanda en tiempo real, modificando las cargas de los consumidores en las horas pico [14]. Es decir, cada uno de los usuarios actúa individualmente en función de los precios dinámicos en el tiempo, comunicándose directamente con la compañía energética como se puede visualizar en la Figura 2.4.



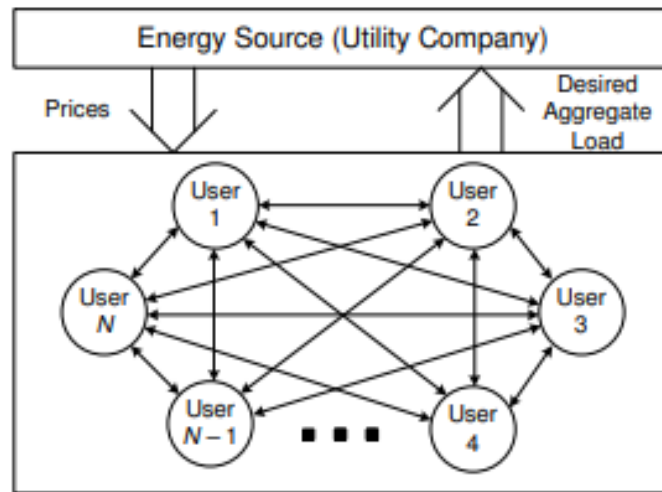
**Figura 2.4:** Estrategia de DSM basada en interacciones individuales de cada consumidor con la compañía [15]

Con este proceso, el consumidor como puede saber en tiempo real la tarifa a la que está consumiendo energía, puede trasladar su propia carga desde las horas donde el precio es más alto (horas pico) a las de precio menor (horas valle). Esta gestión produce por tanto, menores picos de demanda y contribuyendo a la bajada de los precios. [13] [15]

No obstante, el diseño de un programa DSM ideal en el contexto de las SGs debería permitir también las interacciones entre los mismos prosumidores dentro de una zona residencial o microgrid. Estas interacciones generalmente se automatizan a través de equipos dedicados a una comunicación digital bidireccional. Como se aprecia en la Figura 2.5, este proceso tiene como fin conducir a una coordinación de las acciones respectivas a las cargas de un área determinada.

Por tanto, en este caso la monitorización de las cargas totales para todos los nodos participantes en un instante determinado aportará la información necesaria sobre la relación entre la potencia pico y promedio (del inglés *Peak-to-Average Ratio* (PAR)) y contribuirá a la fijación del precio unitario para ese mismo instante. [15]





**Figura 2.5:** Estrategia de DSM para smart grids basada en interacciones entre los usuarios y la compañía [15]

[5]

### 2.1.2. Internet of Energy

[16]

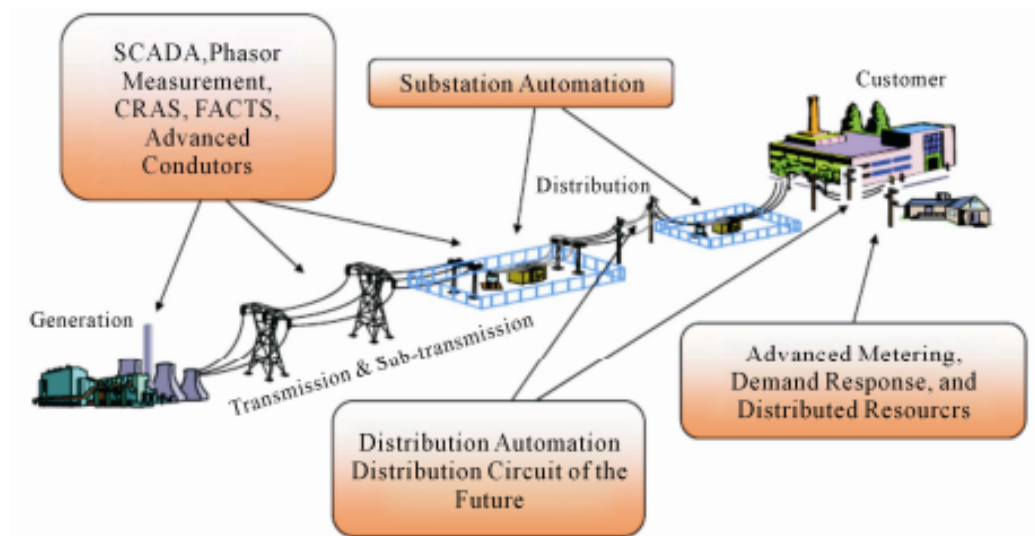
### 2.1.3. Estructura de una Smart Grid

Una SG está constituida por múltiples elementos diferentes como se puede visualizar en la Figura 2.6. Cada uno de ellos está dedicado a uno de los procesos principales, que se pueden dividir en generación, distribución y consumo. [5]

#### 2.1.3.1. Generación

Como ya se introducía en la Sección 2.1.1, dentro de una SG, el prosumidor se trata de la figura que potencia principalmente el uso de energías renovables, las cuales pueden ser obtenidas por ejemplo a partir de generadores térmicos fotovoltaicos (del inglés *Photovoltaic Thermal* (PVT)) o de turbinas eólicas. Para posibilitar posteriormente el uso de la energía generada, esta debe ser convertida y acondicionada mediante dispositivos dedicados, como son unidades combinadas de calor (del inglés CHP) o de conversión a gas (del inglés *Power-to-Gas* (P2G)). [9]

Las unidades CHP [17] llevan a cabo un aprovechamiento del calor residual que deriva



**Figura 2.6:** Estructura de componentes de una SG [5]

del proceso de generación de electricidad. Se emplean como respaldo eléctrico, ya que se componen de sistemas de almacenamiento de energía térmica (del inglés *Thermal Energy Storages* (TES)) para poder separar la producción y el uso del calor y la energía. Luego, este calor almacenado se puede emplear en aplicaciones térmicas como la calefacción u otros procesos industriales. Es por ello que las unidades CHP mejoran la eficiencia del sistema energético, contribuyendo a un uso mucho más eficaz de los recursos y a una reducción de las pérdidas que se producen en la transmisión. En la Figura 2.7 se representa a modo esquemático el funcionamiento de una unidad CHP. [18]

Además del TES, utilizado para almacenar el calor producido, una unidad CHP también se constituye de un motor acoplado a un generador eléctrico para llevar a cabo el proceso de generación de electricidad y calor. Como se puede apreciar en la Figura 2.8, todas las operaciones de la unidad y las interacciones que se producen entre módulos se coordinan desde el gestor de operaciones para que se produzca un correcto funcionamiento.

Por otro lado, la unidad P2G, mencionada anteriormente, se encarga de la conversión de la electricidad en gases sintéticos, como son el hidrógeno o el metano. Es de gran importancia, ya que este tipo de gases son más fáciles de transportar y almacenar que la electricidad, por lo que se simplifica la gestión energética. [9]

Por otro lado, dentro del contexto de la generación de energía también destacan los sistemas de control y adquisición de datos (del inglés *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA)) [19]. Estos pueden ser instalados en generadores, como son paneles

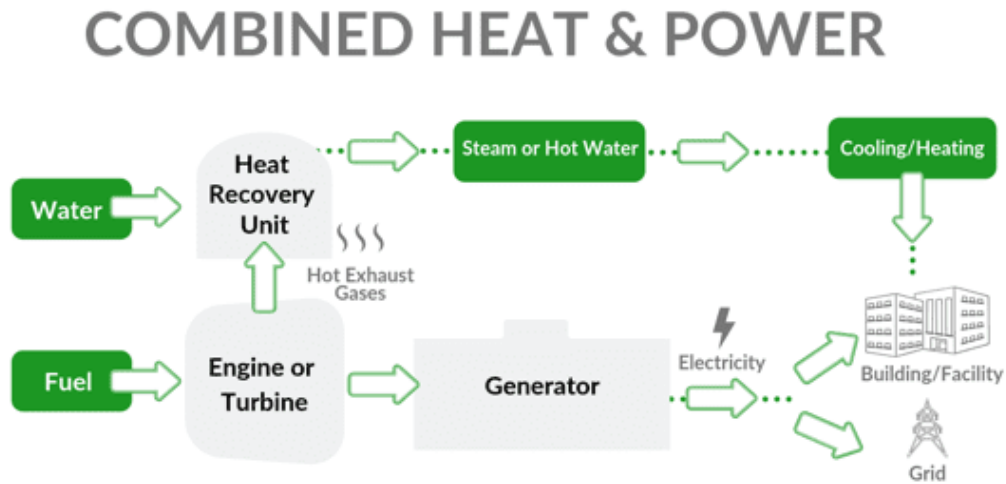


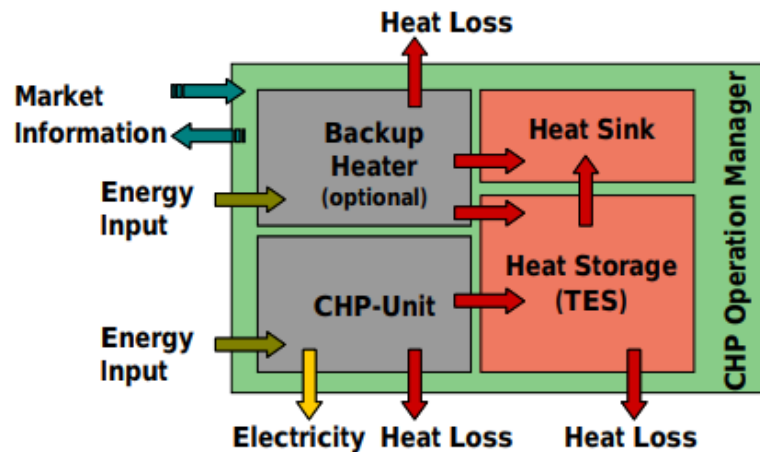
Figura 2.7: Esquema de funcionamiento de una unidad CHP [17]

solares fotovoltaicos o turbinas eólicas, consiguiendo una monitorización remota de los mismos. Mediante la información recopilada a tiempo real permiten conocer los niveles de generación y establecer una predicción de la disponibilidad energética que habrá en el sistema o en un área determinada del mismo.

#### 2.1.3.2. Distribución

Un dispositivo importante en el campo de la distribución energética es la Unidad de Medición de Fasores (del inglés *Phasor Measurement Unit* (PMU)). Se emplea para medir con una alta precisión los fasores de tensión y corriente en la red eléctrica, proporcionando información relevante sobre las magnitudes y fases de las ondas sinusoidales. También, es empleado en los generadores y debe contar con una alta tasa de muestreo para capturar eventos transitorios o cambios rápidos en la red. En otros términos, debe tener la capacidad de identificar o detectar a tiempo real posibles anomalías que se puedan dar en la distribución y por ello, se trata de un componente imprescindible para comprobar y garantizar la estabilidad de la SG.

La confiabilidad y la seguridad de la red también reside en los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexibles (del inglés *Flexible AC Transmission System* (FACTS)) [20] [21]. Estos vienen dados por la necesidad de superar las limitaciones técnicas introducidas por las redes eléctricas, como son las térmicas o las respectivas al voltaje. En otros términos, incrementan la potencia transmitida y aportan flexibilidad al permitir modificar de forma dinámica los parámetros eléctricos ante cambios en la configuración de la red.



**Figura 2.8:** Gestión de operaciones en una unidad CHP [18]

Los FACTS incluyen todos los elementos electrónicos basados en tecnología de alta potencia y que son empleados dentro de una SG para la transferencia de energía de CA y el control de la potencia reactiva. También, realizan tareas de reducción de impedancia en las líneas de transmisión y de optimización del factor de potencia y pueden actuar tanto a nivel individual como de forma coordinada con otros controladores.

La primera generación de FACTS emplea interruptores controlados por tiristores, mientras que la segunda tiene como base convertidores estáticos de conmutación. En la Tabla 2.1 se visualizan las tecnologías FACTS más relevantes. [22] [21]

Poniendo el enfoque en la garantía de estabilidad de una SG, uno de los sistemas más importantes de los expuestos en la Tabla 2.1 es el SVC [20]. Los compensadores estáticos son capaces de detectar grandes caídas de tensión resultantes a la producción de un cortocircuito o a la pérdida de líneas de transmisión en un área de la red. Esto es importante, ya que una detección rápida de una avería permite restaurar en un corto período de tiempo la tensión del área afectada sin que el problema escale a otras partes de la red.

En otros términos, aísla este área del resto de la red eléctrica. Además, el SVC asegura que el proceso de restauración se produzca paulatinamente para que los efectos producidos por el cortocircuito sean prácticamente imperceptibles en los puntos de carga del área afectada. En la Figura 2.9 se puede apreciar un ejemplo de instalación de un SVC en el municipio noruego Sylling y se encuentra conectada a un sistema de 420 kV.

Generación	Tipo	Descripción
1º	<i>Thyristor-Controlled Series Capacitor</i> (TCSC)	Controla el flujo de potencia tanto reactiva como activa por la línea de transmisión mediante el ajuste de impedancia en serie y amortigua las oscilaciones.
	SVC	Absorbe o suministra potencia reactiva según las necesidades de una línea de transmisión a través de la variación de la susceptancia en paralelo. Ayuda a mantener el voltaje estable en la red y proveen un aumento de la capacidad de transferencia de energía.
2º	<i>Static Synchronous Compensator</i> (STATCOM)	Compensa la potencia reactiva al igual que el SVC, pero en este caso empleando electrónica de potencia para proporcionar una respuesta más rápida.
	<i>Unified Power Flow Controller</i> (UPFC)	Combina las funciones de un TCSC y un SVC, teniendo la capacidad de controlar en una línea de transmisión tanto la impedancia en serie como la susceptancia en paralelo.
	<i>Static Synchronous Series Compensator</i> (SSSC)	Modifica dinámicamente la impedancia y es capaz de controlar la fase y la amplitud de la tensión en la línea.
	<i>Interline Power Flow Controller</i> (IPFC)	Conecta varias líneas de transmisión en paralelo. No obstante, modula la impedancia y la fase de la tensión de cada línea de transmisión de forma independiente, lo que permite operar sobre el flujo de potencia de una forma controlada. Mejora la capacidad de transmisión y reduce las pérdidas energéticas.

**Tabla 2.1:** Tecnologías FACTS de 1ª y 2ª generación

### 2.1.3.3. Consumo

Entrando en detalle en las ubicaciones finales del sistema y por tanto, en el proceso de consumo, es imprescindible conocer la cantidad de energía demandada por los clientes que pertenecen a una SG. La instalación de sensores o medidores inteligentes (del inglés *smart*



**Figura 2.9:** Instalación de un SVC en Sylling (Noruega) [20]

*meters*) en las viviendas posibilitan el registro constante de datos respectivos al consumo de energía, niveles de voltaje, corriente y factor de potencia. Estos son almacenados, analizados y procesados por las distribuidoras de energía para obtener a partir de los mismos la información necesaria sobre el comportamiento de los usuarios. [23]

La gestión de los sensores finales en las SGs se caracteriza por su alta complejidad, debido a los grandes volúmenes de datos a manejar. No obstante, como se ha introducido en el Apartado 2.1 esta se trata de uno de los pilares más relevantes de cara a la optimización energética del sistema.

Los objetivos principales que se pretenden con este proceso se engloban en la reducción del consumo, la optimización de la distribución y la maximización del beneficio. Respecto a este último, las compañías energéticas a partir de su base de clientes estudian las estrategias de categorización de los mismos para definir el sistema de fijación de precios dinámicos.

#### 2.1.4. Protocolos

#### 2.1.5. Topología de red

#### 2.1.6. Tecnologías

#### 2.1.7. Seguridad en Smart grids

#### 2.1.8. Situación en España

En el caso de España, nuestro país ocupa el quinto lugar en el mercado eléctrico europeo, solamente por detrás de Alemania, Francia, Reino Unido e Italia.

Además, en los último años ha crecido en consideración y está creciendo rápidamente. La demanda eléctrica estimada para el año 2001 fue de 210.4 mil millones de kilovatios-hora (bkwh), un aumento del 5

[24]

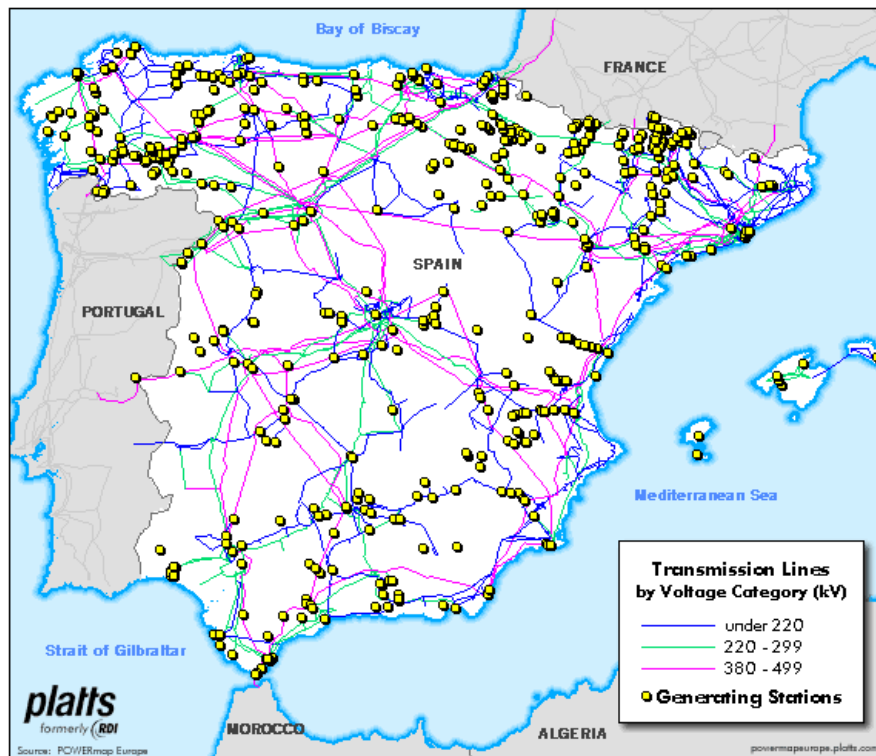


Figura 2.10: Red nacional de transmisión energética [24]

**2.1.9. A futuro****2.2. Inteligencia Artificial****2.3. Machine Learning/IA**[\[2\]](#)**2.4. Herramientas software**

---



## **3. Diseño y análisis de datos**

### **3.1. DEN2NE**

aquí sería explicar el protocolo, esto en análisis o en estado del arte?

[\[3\]](#) [\[25\]](#)

### **3.2. Análisis de fuentes de datos**

[\[26\]](#)

### **3.3. Preprocesado**



## **4. Desarrollo y evaluación del modelo**

### **4.1. Selección de modelos**

esto aquí o en análisis?

### **4.2. Modelo 1**



## **5. Conclusiones y trabajo futuro**



## Bibliografía

- [1] Repsol, “¿Qué son las Smart Grids o redes inteligentes? | Repsol,” <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/smart-grids/index.cshtml>, [Accessed 27-10-2023].
- [2] D. Ingeniería, “El impacto de las Smart Grids y la evolución de la Inteligencia Artificial en las redes eléctricas,” <https://es.linkedin.com/pulse/el-impacto-de-las-smart-grids-y-la-evoluci%C3%B3n-inteligencia-1f>, 2023, [Accessed 27-10-2023].
- [3] D. Carrascal, E. Rojas, J. A. Carral, I. Martinez-Yelmo, and J. Alvarez-Horcajo, “Topology-aware scalable resource management in multi-hop dense networks [Unpublished],” 2023.
- [4] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta, and J. Byers, “BRITE: an approach to universal topology generation,” in *MASCOTS 2001, Proceedings Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2001, pp. 346–353.
- [5] T. Vijayapriya, “Smart grid: An overview,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 02, pp. 305–311, 01 2011.
- [6] I. S. Grid, “IEEE Smart Grid 2015 Annual Report,” <https://smartgrid.ieee.org/about-ieee-smart-grid>, 2015, [Accessed 10-01-2024].
- [7] I. Futura, “Smartgrids, transacciones de energía basadas en blockchain,” <https://iotfutura.com/2018/12/smargrid-basada-en-iot-y-blockchain/>, 2018, [Accessed 10-01-2024].
- [8] H.-P. c. Roy Pratt, “Resisting Temptation: the Seven Sins of Smart Grid,” <https://www.power-grid.com/news/resisting-temptation-the-seven-sins-of-smart-grid/#gref>, 2010, [Accessed 10-01-2024].
- [9] W. Lou, S. Zhu, J. Ding, T. Zhu, M. Wang, L. Sun, F. Zhong, and X. Yang, “Transactive demand–response framework for high renewable penetrated multi-energy prosumer

- aggregators in the context of a smart grid,” *Applied Sciences*, vol. 13, p. 10083, 09 2023.
- [10] Iberdrola, “DSO, ¿cómo transformar la gestión de redes hacia un modelo más inteligente?” <https://www.iberdrola.com/innovacion/operadores-de-sistemas-de-distribucion>, [Accessed 14-01-2024].
- [11] G. Sun, S. Shen, S. Chen, Y. Zhou, and Z. Wei, “Bidding strategy for a prosumer aggregator with stochastic renewable energy production in energy and reserve markets,” *Renewable Energy*, vol. 191, pp. 278–290, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122005274>
- [12] J. Iria and F. Soares, “An energy-as-a-service business model for aggregators of prosumers,” *Applied Energy*, vol. 347, p. 121487, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923008516>
- [13] Z. M. Bakare Mutiu Shola, Abdulkarim Abubakar, “A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction,” *Energy Informatics*, vol. 6, 03 2023.
- [14] L. Tao and Y. Gao, “Real-time pricing for smart grid with distributed energy and storage: A noncooperative game method considering spatially and temporally coupled constraints,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, p. 105487, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519317867>
- [15] A.-H. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, “Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 320 – 331, 01 2011.
- [16] H. Shahinzadeh, J. Moradi, G. B. Gharehpetian, H. Nafisi, and M. Abedi, “Internet of energy (ioe) in smart power systems,” 02 2019, pp. 627–636.
- [17] “Overview of CHP (Combined Heat & Power),” <https://www.a1energy.net/blogs/post/Overview-of-CHP-Combined-Heat-Power>, 2021, [Accessed 12-01-2024].
- [18] P. Wolfrum, M. Kautz, and J. Schäfer, “Smart operation of chp units,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 21, pp. 61–66, 2012, 8th Power Plant and Power System Control Symposium. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016319450>
-



- 
- [19] K. Sayed and H. Gabbar, “Chapter 18 - scada and smart energy grid control automation,” in *Smart Energy Grid Engineering*, H. A. Gabbar, Ed. Academic Press, 2017, pp. 481–514. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053430000188>
- [20] B. T. Rolf Grünbaum, Mojtaba Noroozian, “FACTS, poderosos sistemas para una transmisión flexible de la energía,” [https://library.e.abb.com/public/89318066821a283ec1256fda003b4d40/5\\_1999s.pdf](https://library.e.abb.com/public/89318066821a283ec1256fda003b4d40/5_1999s.pdf), 1999, [Accessed 04-01-2024].
- [21] M. Donsion, J. Guemes, and J. Rodriguez, “Power quality. benefits of utilizing facts devices in electrical power systems,” in *2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, 2007, pp. 26–29.
- [22] M. A. Masoum and E. F. Fuchs, “Chapter 9 - the roles of filters in power systems and unified power quality conditioners,” in *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)*, second edition ed., M. A. Masoum and E. F. Fuchs, Eds. Boston: Academic Press, 2015, pp. 779–886. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128007822000099>
- [23] N. Mostafa, H. S. M. Ramadan, and O. Elfarouk, “Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning,” *Machine Learning with Applications*, vol. 9, p. 100363, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666827022000597>
- [24] G. E. N. Institute, “National Energy Grid Spain,” [http://www.geni.org/globalenergy/library/national\\_energy\\_grid/spain/index.shtml](http://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/spain/index.shtml), 2024, [Accessed 11-01-2024].
- [25] E. Rojas, “DEN2NE - Distributed ENergy ENvironments and NEtworks,” <https://github.com/NETSERV-UAH/den2ne-Alg>, [Accessed 10-11-2023].
- [26] L. Pereira, F. Quintal, R. Gonçalves, and N. J. Nunes, “SustData: A public dataset for ICT4S Electric Energy Research,” *Proceedings of the 2014 conference ICT for Sustainability*, 2014.
- [27] “GIT,” <https://git-scm.com/>, [Accessed 10-11-2023].
- [28] “Visual Studio Code,” <https://code.visualstudio.com/>, [Accessed 10-11-2023].
-



## Lista de Acrónimos y Abreviaturas

<b>CHP</b>	<i>Combined Heat and Power.</i>
<b>DEN2NE</b>	<i>Distributed ENergy ENvironments and Networks.</i>
<b>DSM</b>	<i>Demand Side Management.</i>
<b>DSO</b>	<i>Distribution System Operator.</i>
<b>FACTS</b>	<i>Flexible AC Transmission System.</i>
<b>IA</b>	<i>Inteligencia Artificial.</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things.</i>
<b>IPFC</b>	<i>Interline Power Flow Controller.</i>
<b>ML</b>	<i>Machine Learning.</i>
<b>P2G</b>	<i>Power-to-Gas.</i>
<b>PAR</b>	<i>Peak-to-Average Ratio.</i>
<b>PMU</b>	<i>Phasor Measurement Unit.</i>
<b>PVT</b>	<i>Photovoltaic Thermal.</i>
<b>RTP</b>	<i>Real Time Pricing.</i>
<b>SCADA</b>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition.</i>
<b>SG</b>	<i>Smart Grid.</i>
<b>SSSC</b>	<i>Static Synchronous Series Compensator.</i>
<b>STATCOM</b>	<i>Static Synchronous Compensator.</i>
<b>SVC</b>	<i>Static Var Compensator.</i>
<b>TCSC</b>	<i>Thyristor-Controlled Series Capacitor.</i>
<b>TES</b>	<i>Thermal Energy Storages.</i>
<b>TFM</b>	<i>Trabajo Fin de Máster.</i>
<b>TOU</b>	<i>Time-of-Use Pricing.</i>
<b>UAH</b>	<i>Universidad de Alcalá.</i>
<b>UPFC</b>	<i>Unified Power Flow Controller.</i>



## **A. Anexo I - Pliego de condiciones**



## **B. Anexo II - Presupuesto**





## **C. Anexo III - Manuales de usuario e Instalación**

[\[4\]](#) [\[27\]](#) [\[28\]](#)



Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá