

ENSEÑANZA PRÁCTICA DE LOS SISTEMAS DE TELEMETRÍA PARA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

ANTONIO PAREJO

Universidad de Sevilla, España

SEBASTIÁN GARCÍA

Universidad de Sevilla, España

1. INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico está actualmente sufriendo profundos cambios en su funcionamiento. Uno de los ejemplos más evidentes de este hecho es el incesante crecimiento de la presencia de fuentes de generación eléctrica basadas en energías renovables, como son la energía eólica y la solar (Panwar et al., 2011). Uno de los motivos de este cambio tiene que ver con el auge de la conciencia ecológica y los objetivos de descarbonización que diversos países se han propuesto cumplir durante los próximos años.

Sin embargo, estos cambios no afectan únicamente a las fuentes de generación de energía que se utilizan, sino también al resto de niveles y estructuras del sistema eléctrico. Con esto se pretende dotarlos de nuevas mejoras en lo que se refiere a su seguridad, capacidad de monitorización y gestión, u otros aspectos de diversa índole.

Esta serie de cambios tecnológicos frecuentemente se engloba en el llamado paradigma de la red eléctrica inteligente (en inglés, *smart grid*, abreviado como SG), cuyo objetivo es precisamente incorporar nuevas funcionalidades a la red eléctrica de cara a mejorar su fiabilidad, estabilidad y calidad de suministro. La SG lleva desarrollándose desde hace ya varios años (Kezunovic et al., 2012), y su popularidad y expansión es cada vez mayor, permitiendo un mejor control de los recursos de generación y consumo conectados a la red eléctrica (Parejo et al., 2021).

Una de las vertientes de la SG es la mejora de los sistemas de medición del consumo eléctrico de los clientes. En esta sección se verá brevemente en qué consisten estos sistemas, su evolución reciente, y por qué se ha considerado conveniente incluirlos dentro de los contenidos docentes que se imparten en el Máster en Sistemas Inteligentes en Energía y Transporte (MSIET) de la Universidad de Sevilla.

1.1. INFRAESTRUCTURA AUTOMÁTICA DE MEDIDA

Uno de los pilares centrales de la SG es lo que se conoce como infraestructura automática de medida (en inglés, *Automatic Metering Infrastructure*, abreviado como AMI) (Mak y So, 2014). Este concepto engloba distintas clases de sistemas cuyo objetivo es tomar mediciones en la red eléctrica de forma automatizada como son los contadores inteligentes, las comunicaciones entre elementos de la red, etc. Debido a que estos sistemas suelen también enviar las medidas a través de canales de comunicación (por lo que no es necesario registrar las medidas de forma presencial) se les llama en ocasiones sistemas de telemedida.

Los dos tipos principales de funcionalidades que componen la AMI son la lectura automática de medidas (en inglés, *Automatic Metering Reading*, abreviado como AMR) y la gestión automática de medidas (en inglés, *Automatic Metering Management*, abreviado como AMM). La AMR incluye las funcionalidades que permiten tomar las medidas deseadas (por ejemplo, consumo eléctrico de clientes) de forma remota y automática, mientras que la AMM permite realizar gestiones adicionales, como por ejemplo llevar a cabo ajustes en el suministro de clientes cuando sea necesario (cambios de tarifa, facturación, etc.).

Naturalmente, el despliegue de sistemas de medición inteligente supone una enorme ventaja para los clientes y para los operadores del sistema de distribución (en inglés, *Distribution System Operators*, abreviado como DSO), siendo estos últimos los encargados de tomar las medidas de consumo de los clientes conectados a su red. Gracias al AMR, los consumos eléctricos de los clientes pueden medirse con una mayor frecuencia, sin necesidad de realizar estimaciones de consumo ni tampoco visitas presenciales por parte de los operadores para la consulta de los contadores, que eran los métodos habitualmente aplicados en el pasado

por parte de las compañías eléctricas. Además, la AMM permite a las compañías operaciones de gestión más complejas, como aplicar tarifas de discriminación horaria a aquellos clientes que la soliciten. Este cambio ha implicado la sustitución de los antiguos contadores eléctricos (que eran a menudo mecánicos) por los llamados contadores inteligentes, medidores inteligentes o, en inglés, *smart meters*.

1.2. DESPLIEGUE DE AMI EN LA UNIÓN EUROPEA

Teniendo en cuenta las ventajas anteriormente descritas, la medición inteligente se ha ido aplicando progresivamente en la mayoría de los países miembros de la Unión Europea en los sectores de electricidad (Ardito et al., 2013) y gas. Este despliegue generalizado comenzó con la publicación de una directiva europea (Directive 2009/72/EC) en la que se expuso la conveniencia de desplegar estos sistemas de medición en las redes de distribución y se indicó que los países miembros debían asegurar que este despliegue se hiciera efectivo.

La instalación de estos sistemas se ha llevado a cabo con gran éxito, estando ya los contadores inteligentes instalados (o cercanos a terminar el proceso de instalación) en muchos de los países de la Unión Europea.

Puede decirse por tanto que la medición inteligente es ya una realidad en los sistemas eléctricos europeos, debiendo ser utilizados por prácticamente todas las compañías distribuidoras, tanto grandes como pequeñas. Por tanto, en este contexto se ha hecho necesario contar con un mayor número de trabajadores familiarizados con estas tecnologías, tanto para la gestión de los sistemas ya instalados, así como para las futuras mejoras que se vayan incorporando dentro del sistema eléctrico gracias al paradigma de las SG.

1.3. NECESIDAD DE CONTENIDOS DOCENTES SOBRE AMI

Por los motivos descritos, se ha considerado conveniente incluir ciertos contenidos sobre AMI en la asignatura Red Eléctrica Inteligente del MSIET de la Universidad de Sevilla (impartido en la Escuela Politécnica Superior). Este máster está dirigido a ingenieros que buscan especializarse en ciudades inteligentes (en inglés, *smart cities*) y su gestión,

cubriendo distintos aspectos como la SG, movilidad, control de energía en edificios, diseño de software y aplicaciones de minería de datos.

Numerosos autores han señalado la importancia de adecuar la educación superior de forma que se mejore la conexión entre el mercado laboral y la educación terciaria para reducir la precariedad del empleo y un mejor aprovechamiento del capital humano (Baquero y Ruesga, 2020). Esta idea es la que ha guiado el desarrollo de la propuesta docente que se expondrá en este capítulo.

Dada la complejidad de los sistemas de medición inteligente, llevar a cabo su enseñanza en las aulas aplicando únicamente una perspectiva teórica resultaría en un enfoque muy pobre para el perfil de especialización esperado en el máster. Ello motivó a incluir también una serie de contenidos prácticos donde los estudiantes pudieran usar y gestionar dispositivos e infraestructuras reales, facilitándoles así el acceso a trabajos especializados en compañías de distribución eléctrica en el futuro.

Estos objetivos docentes se han logrado gracias a un sistema real de medición inteligente que se ha instalado en el aula del máster, de forma que los estudiantes puedan tener completo acceso a él para su uso y estudio en profundidad. Ejemplos de este tipo de infraestructura pueden encontrarse habitualmente en artículos científicos (Uribe-Pérez et al., 2017) y en laboratorios de las DSO, pero no son tan comunes en el ámbito de la enseñanza universitaria.

1.4. ESTRUCTURA DE LA RED ELÉCTRICA Y EQUIPOS DE MEDIDA

Las redes de distribución eléctrica conectan la red de transporte (que trabajan en alta tensión) con los clientes (que habitualmente reciben el suministro en media o baja tensión).

La red de distribución consta de una gran extensión, teniendo un número total de kilómetros de línea mucho mayor que las de transporte. Esto hace que su monitorización continua mediante el despliegue de una instrumentalización adecuada sea imprescindible para su correcto mantenimiento. Una de las técnicas de monitorización existentes en la red de distribución es precisamente la instalación de medidores eléctricos para contabilizar el consumo por parte de los clientes.

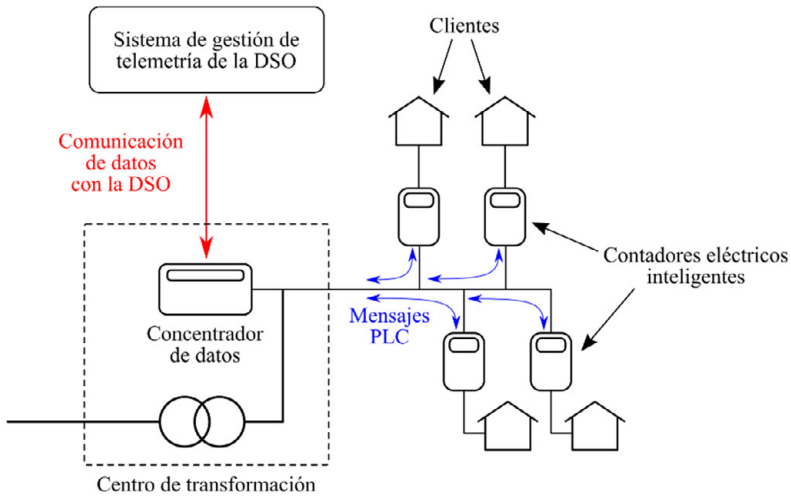
Los sistemas de medición cuentan habitualmente con dos niveles co-existent.

El primero se encuentra en los centros de transformación. El consumo, tensión, corriente, etc. de cada transformador (o incluso de cada una de las líneas de distribución en baja tensión derivada del transformador) se miden y registran mediante aparatos específicos para ello. La conexión con el sistema de gestión de telemetría (que es el centro de control y de almacenamiento de datos medidos) de la DSO se realiza habitualmente mediante una unidad terminal remota (en inglés, *remote terminal unit*, RTU) o mediante un concentrador de datos.

El segundo nivel lo constituyen los contadores eléctricos inteligentes de los clientes, que han sido instalados en la mayoría de los países europeos (o en algunos países se está finalizando su instalación) como consecuencia de la directiva europea previamente citada. En España estos contadores eléctricos se comunican gracias a comunicaciones de tipo PLC (en inglés, *power line communication*), lo que significa que los mensajes con la información de mediciones se transmiten usando los propios cables eléctricos como canal de comunicación. Esto tiene la enorme ventaja de no requerir de la instalación de cables de comunicación adicionales hasta los contadores, ni tampoco de ningún tipo de comunicación inalámbrica. Mediante el canal PLC los concentradores de datos que se encuentran en los centros de transformación captan las medidas de los contadores bajo su dominio, y ellos se encargan posteriormente de transmitirlos al sistema de gestión de telemetría de la DSO. Para esto último habitualmente se utilizan frecuentemente comunicaciones a través de la red móvil. Debido a las ventajas descritas, las comunicaciones PLC son las más habituales en el ámbito de los contadores eléctricos en Europa.

En la Figura 1 pueden verse ambos tipos de sistemas de medida y su conexión con el centro de datos de la DSO, llamado sistema de gestión de telemetría.

FIGURA 1. Infraestructura de telemedida de consumo eléctrico de clientes.



Fuente: elaboración propia

La propuesta docente que se describirá se centra precisamente en el segundo de estos niveles (medición de consumo de clientes), dando a los alumnos la oportunidad de comprender mejor la infraestructura pudiendo utilizar equipamientos reales como los que usan las compañías eléctricas.

Otro aspecto importante que ha de tenerse muy en cuenta en la propuesta es la adaptación de la metodología docente a un contexto no presencial. Esta vertiente educativa estaba en desarrollo desde hace varios años, habiendo sido además impulsada definitivamente por la crisis sanitaria del COVID-19, tal y como se describirá en el siguiente apartado.

1.5. ADAPTACIÓN DE ENSEÑANZA NO PRESENCIAL EN STEM

El estallido de la crisis mundial sanitaria causada por el virus COVID-19 provocó una serie de medidas de contención por parte de la gran mayoría de países, siendo declarada pandemia por la Organización Mundial de la Salud el 11 de marzo de 2020 (World Health Organization, 2020). Una de las soluciones más comunes pasó por establecer medidas de confinamiento entre la población, lo que provocó que gran

variedad actividades laborales pasaran a realizarse de forma no presencial en aquellos casos en que fuera posible.

Naturalmente, el sector educativo fue uno de los grandes afectados por dichas medidas. En el caso de España, el período de confinamiento comenzó el 14 de marzo de 2020 (García et al., 2021), lo que afectó al curso académico en todos los niveles, desde infantiles hasta universitarios.

En el contexto de la educación presencial, la tecnología, tal y como se señala en (García-Peñalvo y Ramírez-Montoya, 2017), se veía anteriormente como un complemento más que como una verdadera herramienta de cambio metodológico. Esto cambió radicalmente con la crisis sanitaria, pues forzó a que debiera producirse una adaptación muy rápida del formato clásico de docencia, impartida sobre todo presencialmente en aulas, a un formato online. Este proceso supuso una gran dificultad no sólo por el poco tiempo disponible para ello, sino también por las complicaciones para acceder a medios técnicos apropiados en el contexto de la crisis sanitaria, lo que no puso nada fácil realizar la adquisición de equipamiento adecuado, y siendo comunes los problemas de suministro y reparto.

Posteriormente, con el comienzo del curso 2020-2021 en España se procedió planificar y dirigir la adaptación de los modelos existentes a formas más digitalizadas, de forma que pudiera cumplirse con las medidas sanitarias pertinentes.

En el sector de las STEM, y más concretamente en las enseñanzas de ingenierías del ámbito industrial (en la cual se centra la propuesta que se verá en este capítulo) podemos distinguir dos tipos de contenidos docentes que han debido adaptarse.

El primero de ellos incluye la docencia impartida en aulas, sea en formato de clase magistral, resolución de problemas por parte del profesor, etc. La adaptación de estas al formato digital ha podido resolverse de formas variopintas, desde del uso de cámaras en el aula para la emisión de las clases en directo al uso de tabletas digitalizadoras que el profesor podía utilizar como sustituto de la pizarra. Todos estos métodos, acompañados de medios auxiliares como chat de la clase en directo han

podido suplir en general apropiadamente las necesidades docentes en la mayoría de los casos.

El segundo lo constituyen las prácticas de laboratorio, que habitualmente en el ámbito de las ingenierías incluyen dispositivos o máquinas muy especializadas. Estos son por ejemplo los equipos de automatización industrial, las máquinas para ensayos de materiales, u otro tipo de equipo informático o tecnológico instalado en los laboratorios.

Precisamente es en este segundo grupo donde ha podido apreciarse los mayores problemas para su impartición en formato no presencial. En aquellos equipos que no podían incluir conexión a Internet debido a su naturaleza (como las máquinas de ensayos de materiales) ha sido necesario realizar las prácticas con grupos de alumnos reducidos, o bien limitarse a la grabación o emisión de la práctica realizada por el profesor. Por otro lado, aquellos dispositivos que sí podían contar con conexión a Internet han posibilitado en algunos casos habilitar conexión remota a ellos, de forma que los alumnos experimentaran la menor diferencia posible en este formato.

La propuesta docente que presenta este capítulo pretende instalar una red de dispositivos de telemedida de consumo eléctrico en un laboratorio para la realización de prácticas con los mismos. Estas redes de dispositivos por su propia naturaleza permiten habilitar una conexión externa hacia Internet de forma relativamente sencilla, precisamente gracias a que el concentrador de datos (dispositivo que recoge las medidas de los contadores eléctricos inteligentes conectados a él) admite esta posibilidad.

Sentadas estas bases, el siguiente apartado repasará los objetivos que se pretenden conseguir con esta propuesta, y qué características deben cumplirse para su implementación.

2. OBJETIVOS

Esta propuesta docente pretende llevar a cabo la inclusión de contenidos prácticos sobre los sistemas de medición inteligente aplicados al

sistema eléctrico en la docencia universitaria de máster. Con esto se pretende:

- Completar los contenidos teóricos impartidos con contenido adicional de tipo práctico.
- Permitir que los alumnos experimenten con equipos de medición reales como los que utilizan las compañías eléctricas.
- Se considera conveniente utilizar modelos de dispositivos que se encuentren comúnmente instalados en los países europeos, asegurando una cobertura de funcionalidades acorde a lo que suele encontrarse en las instalaciones reales de los clientes de esta región. Esto incluye la selección de los protocolos de comunicaciones tal y como se verá más adelante.
- Disponer para ello de un laboratorio con flexibilidad para el diseño de estas prácticas, permitiendo que los consumos medidos tengan distintos perfiles (distintas formas y magnitudes de consumo).
- Los equipos no han de ser elementos aislados dentro del aula en que se encuentran, sino que deben estar dotado de capacidad de uso en modo remoto. De este modo tanto los docentes como los alumnos podrán usarlo no sólo de manera local, sino también en lecciones no presenciales cuando sea necesario.
- Las actividades prácticas que se diseñen cubrirán las funcionalidades básicas vistas en teoría, pero se abrirá además la posibilidad de que los alumnos puedan utilizar el sistema fuera de las horas de clase específicamente dedicadas a dichas prácticas. Esto permitirá que aquellos interesados puedan explorar más a fondo los sistemas instalados.
- Se abrirá la posibilidad a que puedan enmarcarse trabajos fin de máster (TFM) en este laboratorio para aquellos alumnos que muestren interés en ello. De este modo pueden explorarse funcionalidades nuevas, o expandir las ya existentes.

Considerando estos objetivos, la siguiente sección expondrá la metodología seguida para el diseño del laboratorio de telemedida y cómo se han llevado a cabo las decisiones pertinentes.

3. METODOLOGÍA

Dada la importancia de estas materias para los ingenieros que trabajan en el ámbito de la energía eléctrica, se ha realizado el montaje de una instalación de uso docente para la realización de prácticas de laboratorio en las que se puede experimentar con las funcionalidades de los contadores eléctricos inteligentes. Este laboratorio está dirigido a los alumnos de la asignatura “Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid)” del MSIET de la Universidad de Sevilla.

El primer paso será la decisión de los protocolos de comunicación que tendrán los medidores, así como las funcionalidades principales que se desearán utilizar (con objeto de asegurar que el diseño del laboratorio responderá efectivamente a dichas necesidades). Posteriormente se trazará el diseño de dicho laboratorio y se mostrarán las instalaciones resultantes.

3.1. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PLC

El envío de mensajes PLC se basa en el uso de bandas de alta frecuencia, de forma que no interfieran con la frecuencia eléctrica del propio suministro eléctrico (que es de 50 Hz en Europa). La banda de frecuencia en la que se permite operar a los dispositivos PLC de telemetría se regula por el estándar correspondiente (CENELEC - EN 50065-1, 2011), que establece el rango de frecuencias conocido como la Banda A (de 3kHz a 95kHz) como aquella que deben usar las compañías eléctricas para esta finalidad.

Por último, debe mencionarse que existe una gran variedad de estándares disponibles para PLC, siendo estos estándares los que dictan cuál es la estructura de mensajes, cómo se encapsula la información a enviar dentro de ellos, cómo se interpreta la validez de dichos mensajes, y otros aspectos de diversa índole. Algunos de los estándares que se utilizan en las redes de distribución en Europa son los siguientes:

- PRIME: del inglés *Powerline Intelligent Metering Evolution* (PRIME), protocolo definido por la “Prime Alliance”. Utiliza modulación de señal de tipo OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales, en inglés *orthogonal frequency division multiplexing*). Una de las compañías que utilizan este protocolo en España es por ejemplo Iberdrola.
- Meters&More: este protocolo está definido por la “Meters and More Association”. Utiliza modulación de tipo PSK (modulación por desplazamiento de fase, en inglés *phase shift keying*). En España la compañía ENEL utiliza este protocolo en sus contadores.
- G3PLC: utiliza modulación de tipo OFDM. En Francia es utilizado por compañías como por ejemplo Électricité de France.

Para la propuesta docente que se presentará el protocolo escogido ha sido PRIME debido a sus diversas ventajas (sobre todo por la alta velocidad de transmisión de información que permite). En todo caso, de cara a la replicación de esta propuesta, la elección del protocolo es en muchos casos meramente anecdótica. Esto se debe a que las funcionalidades de los contadores inteligentes son muy similares bajo cualquiera de los protocolos, pues todos ellos cubren las funcionalidades requeridas por las compañías de distribución eléctrica. Su desempeño y capacidad de gestión serán, por tanto, válidas para la finalidad docente que se busca aquí, que será el montaje de una instalación a pequeña escala.

3.2. FUNCIONALIDADES DE LOS CONTADORES INTELIGENTES

Los contadores inteligentes cuentan con diversas funciones y comandos de configuración para su gestión. Los registros y reportes permiten extraer información medida por los mismos, mientras que los comandos de configuración permiten alterar parámetros del contador como por ejemplo el tipo de contrato de un cliente. A modo de ejemplo, los registros y reportes básicos de que disponen los medidores pueden encontrarse en la Tabla 1.

TABLA 1. Tipos de reporte y registros.

Código	Descripción
S01	Valores instantáneos
S21	Valores instantáneos avanzados
S02	Incremento diario
S03	Absolutos diarios
S04	Facturación mensual
S05	Facturación diaria
S27	Facturación bajo demanda
S06	Parámetros
S07	Fallo de tensión
S08	Calidad de suministro
S09	Eventos
S23	Contratos

Fuente: elaboración propia

Más adelante en la sección de resultados se mostrará un ejemplo de reporte de datos extraído de un contador.

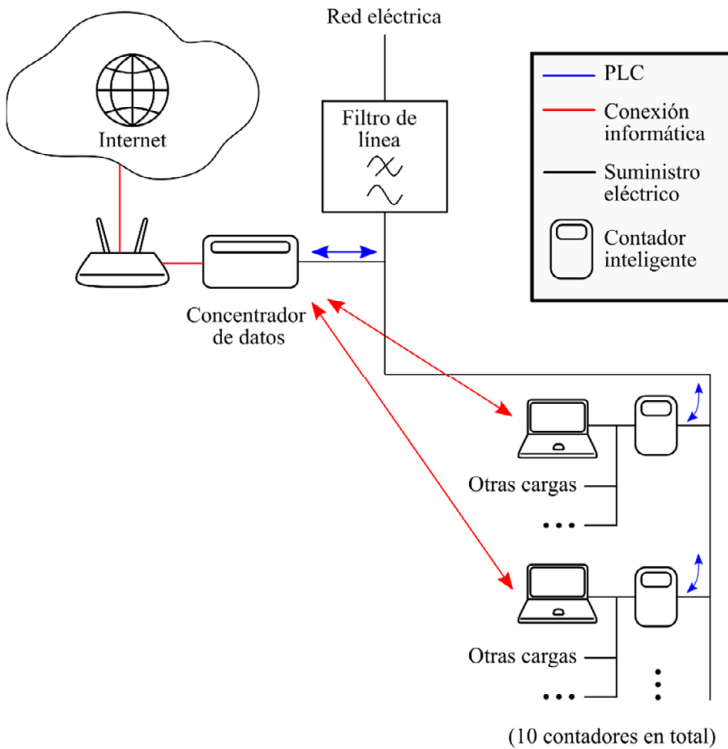
3.3. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

El sistema AMI se compone de un total de diez contadores inteligentes con comunicaciones de tipo PLC distribuidos dentro del aula. Estos contadores usan el protocolo de comunicación PRIME, uno de los más usados en España (por ejemplo, por la compañía Iberdrola). Cada uno de ellos monitoriza y controla un pequeño conjunto de enchufes donde se encuentran conectados ordenadores y otras posibles cargas de consumo. Las medidas son recogidas a través de un concentrador por un sistema central en donde se almacenan, siendo posible acceder a ellas e incluso realizar ciertas gestiones sobre los contadores, como por ejemplo conectar o desconectar el suministro a los enchufes bajo el dominio de cada contador. Por último, se encuentra instalado un filtro de línea en la entrada del suministro del aula para evitar que las señales de comunicación PLC pasen hacia fuera de la red, ya que de otro modo estas

señales podrían interferir con las de aquellos contadores propios de la compañía eléctrica que se encuentran en la red externa al aula. Por tanto, es importante mantener las comunicaciones aisladas dentro del aula mediante dicho filtro.

El coste total aproximado de los dispositivos PRIME instalados fue de unos mil quinientos euros (1500€) aproximadamente, aunque por supuesto esto dependerá del modelo de dispositivos y el número total de medidores que se escojan. La Figura 2 muestra un esquema general de la estructura de los dispositivos, conexiones con la red eléctrica y comunicaciones.

FIGURA 2. Infraestructura de contadores inteligentes del aula.



Fuente: elaboración propia

Estos sistemas se usan en sesiones prácticas donde los estudiantes pueden observar y analizar el intercambio de información entre los distintos dispositivos y su interpretación. Como se mencionó más arriba, cada

uno de los contadores inteligentes registra el consumo de un pequeño grupo de enchufes en los cuales se pueden conectar diversas cargas, permitiendo así analizar distintas situaciones según cuáles se conecten y cuáles sean sus perfiles de consumo.

A continuación, en la siguiente sección se analizarán algunos ejemplos de uso de esta instalación una vez finalizada.

4. RESULTADOS

La red consta de un total de diez medidores distribuidos por el laboratorio que realizan mediciones de un grupo de cargas de consumo. Las prácticas consisten en la extracción y procesado de los informes disponibles (medidas instantáneas o diarias, resúmenes mensuales, etc.), y en la configuración del sistema con las distintas opciones disponibles, como los tipos de tarifa con sus distintos tramos horarios.

En la Figura 3 puede verse la instalación de los dispositivos en el laboratorio.

FIGURA 3. *Contadores inteligentes instalados en el aula de máster.*



Fuente: elaboración propia

La información de cada medidor es obtenida a través del concentrador de datos. Dicho concentrador dispone de una conexión a Internet, permitiendo así que profesores y alumnos accedan a la información mediante una interfaz web, o utilizando el protocolo FTP (protocolo de transferencia de archivos, en inglés *file transfer protocol*) para extraer los reportes de datos deseados.

La interfaz web que viene preinstalada por defecto en el concentrador de datos es un método sencillo para hacer esta tarea y obtener la información requerida de cada contador. En la Figura 4 puede verse un ejemplo de reporte, concretamente algunos de los campos contenidos en el reporte S01 (valores instantáneos) de uno de los medidores. Este reporte contiene datos sobre el factor de potencia, potencia activa y reactiva, etc.

FIGURA 4. Fragmento del reporte s01. campos, valores y nombres de elemento de acuerdo con el protocolo.

Field	Value	Protocol Element
Meter ID:	LGZ0019800499	(Cnt)
Creation Date:	20200305074452000W	(Fh)
Phase Presence:	1	(PP)
Meter Phase:	1	(Fc)
Current Switch State:	1	(Eacti)
Previous Switch State:	0	(Eanti)
Active Import:	355366 Wh	(Aia)
Active Export:	0 Wh	(AEa)
Reactive Quadrant I:	4 varh	(R1a)
Reactive Quadrant II:	0 varh	(R2a)
Reactive Quadrant III:	4 varh	(R3a)
Reactive Quadrant IV:	217227 varh	(R4a)
Voltage:	226 V	(Lv)
Current:	0.7 A	(Li)

Fuente: elaboración propia

La interfaz web es un método simple y visual, pero no es el método utilizado habitualmente por estos sistemas en instalaciones reales, dado que sería más complejo integrar las distintas aplicaciones y fuentes de

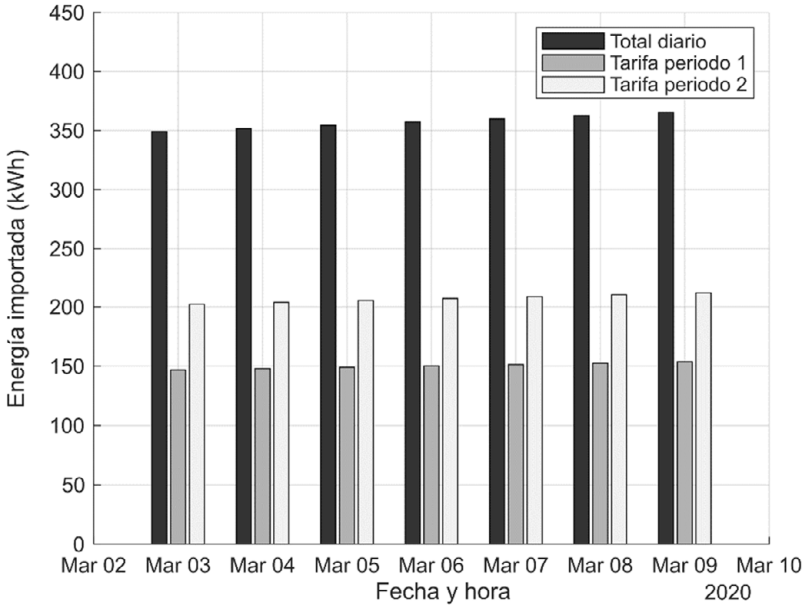
datos entre sí en una red de distribución de cierto tamaño. Por ello, se estudian en las prácticas otros dos métodos que está más extendido en instalaciones reales, llamados respectivamente servicios web (en inglés, *web services*) y el protocolo FTP.

En estos métodos, la información viene encapsulada siguiendo ciertas estructuras estándares, lo que hace más sencillo conectar el concentrador de datos con sistemas de almacenamiento y análisis de información de forma eficiente.

Otro reporte de gran interés es el S05, que contiene la facturación de consumo energético para cada periodo tarifario del cliente (recordamos que una de las ventajas de los medidores inteligentes es precisamente poder aplicar tarifas de discriminación horaria a aquellos clientes que deseen contratarlas, cosa compleja de hacer con los medidores mecánicos antiguos). Dependiendo de la tarifa del cliente, es posible tener varios tramos horarios distintos dentro del mismo día (aplicando por tanto un precio independiente a la energía consumida en cada uno de los tramos).

En la Figura 5 se muestran los datos de energía activa importada de uno de los medidores. Dicho medidor ha sido configurado para operar bajo una tarifa con dos tramos de discriminación horaria, lo que significa que en su tarificación se aplicarían dos precios distintos para la energía que haya sido consumida dentro de cada uno de los periodos a lo largo del día.

FIGURA 5. energía activa diaria importada durante una semana. se han aplicado una tarifa con discriminación horaria de dos periodos.



Fuente: elaboración propia

Como se dijo anteriormente, cada contador puede configurarse con distintas tarifas (con más o menos tramos tarifarios) y las cargas conectadas pueden cambiarse para obtener distintos perfiles de consumo.

Durante el curso, una sesión de dos horas es dedicada enteramente a utilizar estos sistemas. Dado el carácter semipresencial del máster, algunos de los alumnos estarán presentes en el aula mientras que otros podrán estar conectados por videoconferencia de forma remota.

Por ello, para la realización de estas prácticas de forma simultánea se ha optado por habilitar la conexión con el concentrador de datos tanto en modo local (desde los ordenadores disponibles en el aula) como de forma externa (desde fuera de la red de la universidad a través de Internet).

Además, el profesor puede habilitar posteriormente de nuevo la conexión remota para que los estudiantes puedan seguir accediendo a través de ella durante el resto del curso. De este modo, disponen de tiempo

para probar aquellas características del sistema de telemedida que deseen analizar con mayor detalle. Esto es de especial interés para los alumnos que tengan intención de especializarse en el campo de la distribución eléctrica.

5. DISCUSIÓN

Esta metodología práctica se ha aplicado durante los dos últimos cursos en el máster. Al finalizar la asignatura de Red Eléctrica Inteligente se pasaron cuestionarios de satisfacción a los alumnos para que pudieran expresar su opinión sobre los diversos aspectos de la asignatura, incluyendo la sesión práctica de AMI. A este respecto, la mayoría de los estudiantes contestaron de forma satisfactoria, mostrando una buena recepción de los sistemas instalados y de los ejercicios prácticos propuestos para ellos.

Hoy en día la importancia de los sistemas de telemetría dentro de la operación de las redes de distribución (y, por tanto, también del sistema eléctrico en general) es innegable, siendo parte inherente de su funcionamiento y operación. Por este motivo, estas prácticas han supuesto un gran avance para la enseñanza del citado máster, dando así a los alumnos un conocimiento básico de los sistemas de telemetría que les podrá ser de gran utilidad en una amplia variedad de trabajos enfocados en el sistema eléctrico.

Cabe destacar además que la infraestructura descrita, además de poder usarse para la realización de las prácticas básicas, da la posibilidad de proponer trabajos de fin de máster a aquellos alumnos interesados en esta temática. Estos trabajos pueden implicar desde el análisis de los históricos de datos obtenidos de ella, hasta el diseño e implementación de sistemas informáticos o aplicaciones que se integren con el concentrador de datos, ya sea para la extracción de la información o para la configuración de los contadores. De este modo el trabajo se desviaría del ámbito puramente centrado en la medición mediante los aparatos a introducirse también los niveles superiores de los sistemas usados por las DSO, que precisamente implican la integración de diversas

funcionalidades adicionales como por ejemplo el análisis posterior de los datos obtenidos.

6. CONCLUSIONES

El uso de AMI y, con carácter más específico, de los medidores inteligentes para consumo eléctrico de clientes, ha tomado en los últimos años una gran relevancia dentro del sistema eléctrico. Estos sistemas constituyen un enorme valor añadido para las redes de distribución eléctrica, dado que a ellas se encuentran conectados numerosos clientes.

Por tanto, se ha considerado necesario introducir contenidos docentes centrados en estos sistemas en la asignatura “Red Eléctrica Inteligente” del MSIET impartido en la Universidad de Sevilla. Precisamente uno de los objetivos de dicho máster es que los alumnos alcancen un buen nivel de especialización acerca del sistema eléctrico y sus tecnologías asociadas.

Para ello se ha diseñado y realizado el montaje de una pequeña infraestructura de telemedida compuesta por contadores eléctricos inteligentes y un concentrador de datos. Cada uno de los contadores mide el consumo eléctrico de una serie de enchufes, lo que permite monitorizar los diversos tipos de cargas que se desee conectar a ellos. Se han habilitado además las conexiones necesarias para acceder al sistema a través de Internet para su uso docente remoto.

El despliegue de la infraestructura de contadores inteligentes descrita ha supuesto una notable mejora en la calidad de la enseñanza de la asignatura. Gracias a ella, los alumnos pueden realizar ejercicios prácticos usando sistemas reales usados por las DSO, consiguiendo un mejor entendimiento del AMM y AMR aplicado a redes de distribución.

La metodología docente consiste en contenido teórico seguido de una serie de ejercicios prácticos realizados en una sesión de dos horas de duración. En esa sesión los estudiantes pueden conectarse al sistema, acceder a los datos y configurar los medidores de diversas formas. Se

permite a los alumnos trabajar tanto en modo local (en el aula) como en modo remoto (desde fuera de la universidad).

Esta metodología, que se ha aplicado ya durante dos cursos, ha recibido críticas positivas por parte de los alumnos, mostrando que el enfoque práctico para el estudio de AMI ha tenido una buena recepción.

7. AGRADECIMIENTOS

A los autores les gustaría agradecer a Enrique Personal, Alejandro Gallardo, Antonio García, Juan Ignacio Guerrero y Carlos León por la ayuda desinteresada prestada en el diseño y desarrollo de la infraestructura docente. Además, Antonio Parejo quiere expresar su agradecimiento al Ministerio de Educación y Formación Profesional por la concesión del contrato predoctoral Formación de Profesorado Universitario (FPU) 2016, con número FPU16/03522.

8. REFERENCIAS

- Ardito, L., Procaccianti, G., Menga, G. y Morisio, M. (2013). Smart Grid Technologies in Europe: An Overview. *Energies*, 6(1), 251-281. <https://doi.org/10.3390/en6010251>
- Baquero, J. y Ruesga, S. M. (2020). Empleo de los estudiantes universitarios y su inserción laboral. *Revista de Educación, Secretaría General Técnica. S.G. de Atención al Ciudadano, Documentación y Publicaciones*, 31-56. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2020-390-464>
- CENELEC - EN 50065-1 (2011). Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz - Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances.
- Directive 2009/72/EC. Common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC. European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/72/oj>
- García, S., Parejo, A., Personal, E., Ignacio Guerrero, J., Biscarri, F. y León, C. (2021). A retrospective analysis of the impact of the COVID-19 restrictions on energy consumption at a disaggregated level. *Applied Energy*, 287, 116547. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116547>
- García-Peñalvo, F. y Ramírez-Montoya, M. (2017). Aprendizaje, Innovación y Competitividad: La Sociedad del Aprendizaje. *Revista De Educación A Distancia (RED)*, (52). <https://doi.org/10.6018/red/52/1>

- Kezunovic, M., McCalley, J. y Overbye, T. (2012). Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems. Proceedings Of The IEEE, 100(Special Centennial Issue), 1329-1341.
<https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2187131>
- Mak, S. y So, E. (2014). Integration of PMU, SCADA, AMI to accomplish expanded functional capabilities of Smart Grid. 29th Conference On Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014).
<https://doi.org/10.1109/cpem.2014.6898262>
- Panwar, N., Kaushik, S. y Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1513-1524.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
- Parejo, A., Bracco, S., Personal, E., Larios, D., Delfino, F. y León, C. (2021). Short-Term Power Forecasting Framework for Microgrids Using Combined Baseline and Regression Models. Applied Sciences, 11(14), 6420. <https://doi.org/10.3390/app11146420>
- Uribe-Perez, N., Angulo, I., de la Vega, D., Arrinda, A., Arzuaga, T. y Marron, L. et al. (2017). TCP/IP capabilities over NB-PLC for Smart Grid applications: Field validation. 2017 IEEE International Symposium On Power Line Communications And Its Applications (ISPLC).
<https://doi.org/10.1109/isplc.2017.7897118>
- World Health Organization (2020). WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020. Who.int website. Fecha de última visita: 3 de septiembre de 2021.
<https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>