

1 Introducción

1.1 Motivación

Una subestación eléctrica es una estación subsidiaria de un sistema de generación, transmisión y distribución eléctrica, donde se transforma de alta a baja tensión o viceversa empleando transformadores. La potencia eléctrica atraviesa numerosas subestaciones entre la planta de generación y el consumidor, y se cambia de tensión en diversos pasos. Las subestaciones normalmente contienen uno o más transformadores, y tienen equipamiento de conmutación, protección y control. El término subestación es anterior a la época en que el sistema de distribución eléctrica se convirtiera en una red. Las primeras subestaciones estaban conectadas solo con una estación de potencia donde estaba ubicado el generador, y eran subestaciones de dicha estación de potencia.

Hoy en día, la evolución de las subestaciones se encamina hacia la automatización de sistemas, de manera que se empleen tecnologías digitales en el equipamiento de los sistemas automáticos de la subestación convencional. De esta forma, la tendencia actual se encamina hacia la denominada *subestación digital*, aquella donde han sido completamente digitalizados los procesos de adquisición de información, transmisión, procesamiento y salida.

Las nuevas tecnologías y dispositivos permiten una mejora en la interoperabilidad, y un incremento notable en la cantidad de información que en tiempo real se transmite desde las subestaciones hacia los centros de control, y que excede en mucho la capacidad de las RTU (*Remote Terminal Unit*) actuales; las RTU son dispositivos electrónicos controlados por un microprocesador que se usan en un sistema de control distribuido, y sirven de interfaz con el mundo físico, ya sea transmitiendo datos de telemetría al sistema y/o alterando el estado de los objetos conectados (e.g. interruptores), basándose en mensajes recibidos del sistema.

Esta situación hace que resulte necesario buscar nuevas formas de intercambiar la información, además de comprimirla y optimizarla. Existen varias razones que aconsejan optimizar la configuración actual de los sistemas de control en subestaciones; principalmente, el coste y la falta de flexibilidad (por ejemplo, ante la ampliación de la subestación o la incorporación de nuevos sistemas de comunicación).

Además de los costes de una nueva instalación, si el sistema de control se basa en controladores programables, serán necesarios cambios sustanciales tanto en el hardware como en el software de estos controladores y nuevos paneles de terminación y cableado en campo, lo que encarece notablemente la instalación de nuevos elementos (e.g. transformadores) a una subestación. Es por esto que sería conveniente contar con una arquitectura de control que permitiera la adición de nuevos elementos a la subestación sin cambiar de una manera significativa el funcionamiento del sistema de control de la subestación y de las comunicaciones con el SCADA maestro.

Por otra parte, es importante asegurar la interoperabilidad de los equipos ofertados por los diferentes fabricantes para facilitar la competencia entre los mismos y abaratar los precios finales; todo ello manteniendo o incrementando los niveles actuales de fiabilidad, seguridad y calidad del suministro.

Existen numerosos protocolos para la automatización de subestaciones, incluidos muchos protocolos propietarios con enlaces de comunicación personalizados. La interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes supondría una ventaja para los usuarios de dispositivos de automatización de subestaciones.

Es por ello que, para hacer frente a todos estos retos, han aparecido nuevos estándares como el IEC 61850, que definen un marco común para el control de subestaciones, permitiendo la interoperabilidad entre equipos y aportando mecanismos de comunicación rápidos, flexibles y seguros. Tres grupos de trabajo del IEC formados por miembros de diferentes países respondieron a los problemas y preocupaciones planteados, creando este estándar para el diseño de la automatización de subestaciones eléctricas.

Los principales objetivos de este estándar son los siguientes:

- Un solo protocolo para la subestación completa, considerando el modelado de los diferentes datos requeridos para la subestación.
- Definir los servicios básicos requeridos para transferir datos, de manera que el mapeo completo del protocolo de comunicaciones sirva también en el futuro.
- Promoción de alta interoperabilidad entre sistemas de diferentes fabricantes.
- Un método/formato común para almacenar datos completos.
- Definir las pruebas necesarias que han de pasar los equipos para cumplir el estándar.

El ámbito de actuación de este Proyecto Fin de Carrera se circunscribe a las subestaciones en el área de distribución desde 132 kV hasta media tensión.

1.2 Objetivos

Existen diversos motivos, entre los que destaca la publicación del estándar IEC 61850, por los que el cableado existente entre los niveles de proceso y bahía se está sustituyendo por un enlace serie mucho más simple. En esto ha ayudado la utilización de transductores electrónicos, que presentan numerosas ventajas respecto a los transformadores tradicionales, a cambio de ciertos requisitos en la interfaz hacia los relés de protección y unidades de control del nivel superior.

Por ello, en el estándar IEC 60044-8 (donde se especifican las salidas digitales de transformadores electrónicos de tensión y de corriente) y en el IEC 61850-9-1 (donde se trata cómo mapear valores muestreados sobre un enlace serie punto a punto) se describe el módulo de la *merging unit* o *unidad de comunicaciones* como el elemento clave para conectar los transductores electrónicos con los dispositivos de protección.

Las principales funciones que tiene la *merging unit* son: aportar una interfaz digital a los transformadores electrónicos de corriente y tensión de cara al equipamiento secundario (protección o dispositivos de medida) y crear un conjunto de muestras coherentes en el tiempo con tres fases de tensión, tres fases de corriente y neutros de tensión y corriente.

Por tanto, el principal objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es una propuesta de diseño de una *merging unit*, dispositivo que permitirá la conexión a transductores de medida convencional y no convencional, así como las comunicaciones de este dispositivo haciendo uso de la tecnología seleccionada (e.g. inalámbrica, PLC, cable...). El resultado final será un estudio completo de dicho dispositivo, tanto a nivel hardware como a nivel software, haciendo especial hincapié en el apartado de comunicaciones.

En este Proyecto se explorarán nuevas arquitecturas HW/SW con objeto de exprimir al máximo el beneficio que se puede extraer de los últimos avances ; estas son capaces de ofrecer millones de puertas en único dispositivo, a un precio competitivo, pero además permitiendo la integración de microprocesadores *soft*, con los que es posible implementar complejos sistemas empotrados en un único chip. También se hará especial hincapié en la utilización de herramientas de codiseño *hardware/software* que permitan optimizar costes y características mediante el procesamiento en paralelo de estas dos ramas del diseño del dispositivo, en oposición a la tradicional estructura secuencial que se suele emplear.

Esto además nos lleva a definir otra meta importante: mejorar el grado de integración de los dispositivos, consiguiendo mejores prestaciones con equipos cada vez más pequeños, y por tanto más baratos.

De esta forma, el presente Proyecto Fin de Carrera constará principalmente de una propuesta de diseño hardware/software básico del prototipo de la *merging unit*, previo estudio de las posibilidades de implementación que se estimen mejores. La elección de esta plataforma (HW/SW) habrá de satisfacer las especificaciones del dispositivo mencionadas en el estándar.

1.3 Sumario

A continuación se describirá brevemente el contenido de los capítulos que componen el presente Proyecto Fin de Carrera, de manera que se pueda tener rápidamente una visión general de este.

1. Introducción: en este capítulo se ha enmarcado el Proyecto, y se han descrito los objetivos principales que se persiguen en su realización.
2. Subestaciones digitales. Aquí se describen las principales características que deben presentar las subestaciones eléctricas para ser denominadas así.
3. Estudio de la merging unit. En este capítulo se describen la unidad de comunicaciones y las características de funcionamiento requeridas según los estándares IEC 60044-8 e IEC 61850-9-1. Además, se propone la incorporación de capacidad de configuración, y se elige el método de procesamiento de señales.
4. Propuesta hardware. Aquí se describirán los componentes físicos que constituirán la propuesta de diseño de la *merging unit*, comenzando por una descripción y comparativa de procesadores empotrados en FPGAs, siguiendo con especial hincapié en las comunicaciones inalámbricas, además de hablar del controlador Ethernet y la memoria necesaria.
5. Propuesta software. En este capítulo atenderemos a la programación tanto de la FPGA como del procesador empotrado que lleva. Comenzaremos repasando algunas herramientas de diseño disponibles en el mercado, para luego centrarnos en el flujo de diseño (teórico y práctico) trabajando con el ISE Webpack de Xilinx. Por otra parte, estudiaremos las ventajas de disponer de un sistema operativo en el procesador empotrado, centrándonos en los sistemas operativos de fuentes abiertas.
6. Conclusiones. Aquí repasaremos los objetivos alcanzados en la realización del Proyecto, además de analizar la escabilidad y presentar posibles líneas de actuación futuras sobre el mismo.