

IMPLICACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL BUS DE PROCESO EN LA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

J.M. YARZA*
ZIV P+C
España

T. ARZUAGA
USYSCOM
España

R. QUINTANILLA
ZIV P+C
España

Resumen – *El Bus de Estación es ya una realidad en las numerosas subestaciones eléctricas construidas en todo el mundo de acuerdo al estándar IEC 61850, constituyendo un éxito desde el punto de vista de la funcionalidad así como de la fiabilidad y la interoperabilidad. El siguiente paso va a ser la implementación del Bus de Proceso, lo cuál va a representar otro gran salto cualitativo en el diseño de subestaciones, y va a suponer la aplicación de la norma IEC 61850 en toda su extensión.*

Este paper describe con precisión qué constituye el Bus de Proceso, y qué dispositivos y aspectos de diseño han de tenerse en cuenta para su realización. Asumiendo como requisitos irrenunciables la Fiabilidad y la Interoperabilidad del sistema, siguiendo el espíritu del estándar IEC 61850, el objetivo principal de este paper es poner de manifiesto las dificultades de su implementación y las posibles soluciones.

Los elementos básicos que constituyen el Bus de Proceso son los equipos primarios con interface ETHERNET, resuelto actualmente mediante las llamadas “Merging Units” (MU), los IEDs de Protección, Control y Medida, y la propia Arquitectura de Comunicaciones (AC) que permite comunicar ambos dispositivos.

Las Merging Units tienen el reto de sustituir con una o varias fibras ópticas los cables de cobre que conectan actualmente los equipos primarios (transformadores de intensidad y de tensión, interruptores, seccionadores, etc.) con los IEDs que constituyen el sistema de Protección, Control y Medida. Se analizan las ventajas de su utilización, como es la inmunidad de la FO ante perturbaciones electromagnéticas frente a la susceptibilidad del cobre, y las dificultades que presenta, como son posibles retrasos en la entrega de muestras frente a la “inmediatez” de los transformadores convencionales.

Palabras clave: IEC61850 – Bus de Proceso – Merging Unit – Sincronización – Comunicaciones – Fiabilidad – Interoperabilidad – Parallel Redundancy Protocol

1 INTRODUCCIÓN

Desde que la tecnología digital irrumpió en las subestaciones, no ha dejado de avanzar con éxito ofreciendo una alternativa, mucho más flexible y ventajosa en coste, a las tecnologías anteriores. A estas alturas, su implantación no ha llegado a ser completa y aún quedan áreas vitales en las que las tecnologías anteriores representan la única alternativa real.

La digitalización ha aportado grandes ventajas, entre las que la integración de funciones y la consecuente mejora en los costes de los equipos tienen una importancia incuestionable, pero, sin duda, la aportación que mayores consecuencias ha tenido ha sido la aparición de las comunicaciones digitales y su progresiva implantación, empezando por el acceso a la subestación desde el SCADA, para las operaciones de control y acabando como la columna vertebral de los actuales sistemas integrados de protección y control. En su estadio actual, las redes serie están siendo sustituidas por redes Ethernet y protocolos avanzados, cuyo máximo exponente, en cuanto a integración, flexibilidad y apertura hacia el futuro está representado por el estándar IEC61850.

Hay aspectos que hacen de la norma IEC61850 un paso de especial importancia en el proceso de digitalización de las instalaciones eléctricas. Uno de ellos es, por supuesto, la normalización de la información de configuración de los equipos que constituyen un sistema integrado, para lo que se han definido formatos y sistemas de intercambio de datos entre equipos, entre herramientas de ingeniería y configuración y entre equipos y herramientas. Sin embargo, desde el punto de vista del intercambio de información operativa y de tiempo real, la aportación más significativa es la inclusión del muestreo de las magnitudes analógicas dentro del ámbito del estándar (parte 9.2) y la aparición de lo que se ha dado en llamar Bus de Proceso.

Es necesario aclarar que el bus de proceso soporta no sólo el flujo de muestras analógicas sino otros elementos de información relacionados con la operación de la subestación (órdenes sobre interruptores, seccionadores, estado...). Dicho de una forma simple, en una instalación diseñada bajo la norma IEC61850, el bus de proceso sustituye al sistema de cableado que en una subestación convencional conecta el aparellaje (transformadores de intensidad, transformadores de tensión, interruptores...) con los dispositivos que conforman el sistema de protección, control y medida. La solución cableada ha demostrado, a lo largo de muchos años, ser segura y fiable aunque compleja, poco flexible y cara.

Y, precisamente, fiabilidad, simplicidad, flexibilidad y coste, y como sobre ellas influyen las posibles arquitecturas y métodos de sincronización, son las variables que han de examinarse para determinar si el bus de proceso representa, desde el punto de vista técnico, una alternativa válida y ventajosa a las soluciones cableadas convencionales. Mientras que la fiabilidad resulta irrenunciable, las otras variables deben analizarse como elementos que conforman un equilibrio. Como estándar que IEC61850 es, resulta primordial incluir en el análisis todos aquellos aspectos que tienen que ver con la interoperabilidad, campo que, como veremos, va más allá del estricto ámbito de las comunicaciones y se adentra en la propia algoritmia de las funciones de medida y protección.

La sustitución del cableado analógico por las redes digitales supone un cambio de paradigma en el que no sólo deben analizarse los aspectos técnicos, sino también otros, tan importantes o más, que tiene que ver con las personas que han de ejercer como agentes operativos: capacitación, resistencia al cambio, confianza en la fiabilidad de la solución...

Esta contribución técnica analizará el bus de proceso desde todos los puntos de vista mencionados y expondrá el concepto de Merging Unit como el primer paso en la digitalización del aparellaje. En el estadio final del proceso, es de esperar que sean los propios elementos primarios los que se conecten al bus de proceso; en el estado actual en que la oferta de equipos con tal característica es prácticamente nula, las merging units, como interfaces entre el mundo analógico y el digital, hacen posible su incorporación al mundo del estándar IEC61850 y a sus ventajas de flexibilidad y menor coste. Este intermedio es necesario para comprobar si las ventajas teóricas que ofrece el bus de proceso se confirman en instalaciones reales; si así es, el camino quedará abierto para que una nueva generación de aparellaje no convencional se incorpore a la corriente principal de la digitalización.

Sin duda, el proceso completo necesitará varios años; cuándo y como finalizará, está en manos de las compañías eléctricas y de las ventajas y mejoras en su propuesta de valor que sean capaces de extraer del cambio de paradigma.

2 REQUISITOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL BUS DE PROCESO

De acuerdo a lo dicho más arriba, existen varios requisitos que deben tenerse en cuenta si el bus de proceso ha de ser alternativa tecnológica a la sólida solución clásica. De cómo se resuelvan los problemas que cada uno de ellos plantea, dependerán el éxito o el fracaso.

2.1 Personas

La tecnología debe posibilitar el cambio y la innovación, pero las personas han de querer o, al menos, tolerar que el cambio se produzca. En términos generales, cabe esperar, como en cualquier proceso de emergencia de un nuevo paradigma, una cierta resistencia que, en parte, se deriva simplemente del miedo al cambio. Es responsabilidad de la comunidad tecnológica y empresarial crear las condiciones para neutralizar esta situación atacando las raíces del problema.

En primer lugar, es necesario contar con las personas de la formación adecuada, lo que en un contexto de escasez de técnicos cualificados, agravado por el envejecimiento de la fuerza de trabajo, significa que no podemos dejar de contar con el valor representado por el personal existente. Se hace necesario establecer programas de capacitación que conviertan el nuevo paisaje en terreno familiar y conocido. Esta formación deberá adaptarse a la etapa, dentro del proceso de diseño y/u operación en que el técnico deba desenvolverse: diseño de redes de comunicación, ingeniería de subestación, configuración y programación de equipos, mantenimiento de los diferentes componentes del sistema...

En segundo lugar hace falta desarrollar un conjunto de herramientas que permitan operar en el nuevo entorno, con la misma facilidad que en el anterior. Quedan lejos los tiempos en que un plano de papel, un

multímetro, un destornillador y un pelacables eran las herramientas adecuadas para moverse en una subestación. No cabe duda de que las instalaciones eléctricas se convierten, en virtud de la tecnología, en un lugar más abstracto y opaco a la experiencia directa; por ello los suministradores de equipos y servicios deberán desarrollar dispositivos y programas de software que ofrezcan a los ingenieros de subestaciones un ambiente de trabajo enfocado a su conocimiento específico, aquel en el que generan valor y se sienten cómodos, y que, a la vez, les permitan aprovechar al máximo las oportunidades de las nuevas tecnologías. Y esto, como hemos dicho, tanto en la etapa de diseño como en la puesta en marcha, operación y mantenimiento. En resumen, herramientas con conocimiento embebido, que ayuden a los técnicos y traten de paliar la escasez de personal cualificado.

Si ambas condiciones se cumplen, habremos construido un entorno capaz de generar confianza a aquellos que se han de mover en él y convertiremos a las personas en aliados del cambio. Todo ello, por supuesto, siempre que se cumplan los requisitos tecnológicos que hagan que el bus de proceso sea una solución ventajosa frente a la situación anterior.

2.2 Fiabilidad

La fiabilidad es un aspecto clave para la adopción del bus de proceso en sustitución del cobre que conecta el aparellaje con los IED's de protección. Las ventajas son claras, en cuanto al coste de instalación y flexibilidad. Es necesario, por tanto, demostrar que el nuevo bus de proceso proporciona niveles de fiabilidad similares a la solución cableada. Para ello, aparte de estudios e informes teóricos, es necesario desplegar en campo soluciones de bus de proceso en paralelo a soluciones convencionales para obtener la suficiente información que permite un despliegue seguro de la nueva solución IEC 61850.

2.3 Interoperabilidad

En el espíritu del estándar IEC 61850 siempre ha estado proporcionar las herramientas para lograr la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes, y al igual que en el caso del bus de estación, éste es otro requisito irrenunciable de la solución que se adopte para el bus de proceso.

Actualmente ya existen numerosas experiencias reales de implementación del bus de subestación mediante sistemas multi-fabricante. La ejecución de estos proyectos ha puesto de manifiesto las ventajas disponer de equipos IEC 61850 de distintos fabricantes capaces de interoperar, principalmente la flexibilidad para la ingeniería, y la mejora de costes por reducción de cableado y de tiempo de desarrollo y puesta en marcha. Obviamente también ha habido dificultades, mayormente centradas en el ámbito de las comunicaciones.

De la interoperabilidad en la implementación del bus de proceso podemos esperar ventajas semejantes, sin embargo las dificultades que plantea van más allá del estricto contenido de las tramas de comunicaciones. La arquitectura del propio sistema de comunicaciones así como los algoritmos de las funciones de medida y protección presentan problemas específicos que van a ser analizados a continuación, al igual que sus posibles soluciones. El problema de comunicaciones lo trataremos en un apartado posterior. A continuación nos centraremos en el problema eléctrico.

2.3.1 Problema eléctrico

Seguramente la problemática relativa a los aspectos “más” electrotécnicos de las MU representa uno de los factores más diferenciadores del bus de proceso con respecto al bus de estación.

La “frecuencia de muestreo” de las MU y de los IED han de ser tales que permitan la correcta interpretación de las medidas por parte de los IED. En la práctica el abanico de frecuencias de muestreo que cada fabricante utiliza en sus IED es muy amplio, y a su vez la norma IEC 61850 en su parte 9-2 tampoco estipula una frecuencia de muestreo única.

Soluciones a este problema puede haber varias, como que los IED remuestreen de acuerdo a su propia frecuencia de muestreo a partir de las muestras recibidas de las diferentes MU, o que las MU puedan adaptar su frecuencia de muestreo según las necesidades de los IED. En cualquier caso, a la hora de mezclar MU e IED de diferentes fabricantes este es un aspecto muy importante.

Y probablemente un aspecto difícil de identificar en primera instancia, pero que podría quitar el sueño a cualquier ingeniero de protecciones (usuario o diseñador), es el comportamiento dinámico de las MU.

Los IED actuales disponen de sus propios módulos magnéticos para realizar la medida de intensidades y tensiones a partir de los secundarios de los transformadores de la subestación. Cada fabricante dispone de su propia solución técnica, y es un hecho que la respuesta de las mismas ante transitorios eléctricos es distinto. El comportamiento ante diferentes formas de onda, ante la componente de continua de las intensidades, ante los armónicos, o la propia remanencia y saturación de los transformadores de los IED, nada tiene que ver entre unos fabricantes y otros.

Esto supone que los IED actuales han adaptado sus algoritmos de protección y medida a una respuesta específica por parte de dichos módulos magnéticos.

Cuando nos planteamos conectar IED de distintos fabricantes a una MU de otro fabricante esta problemática se pone claramente de manifiesto. Si la MU basa su sistema de medida en módulos magnéticos convencionales para luego digitalizar la señal de acuerdo a la parte 9-2, está poniendo en peligro la interoperabilidad, ya que su respuesta probablemente impedirá que los algoritmos de protección y medida de IED de otros fabricantes se comporten de la manera esperada y para la que fueron diseñados. En este sentido, hay protecciones que resultan particularmente sensibles, como las protecciones diferenciales y los relés de distancia.

La solución pasa por emplear un sistema de medida que reproduzca fielmente la forma de onda entregada por el secundario de los transformadores de la subestación. De esta manera, los algoritmos de protección y medida de los IED tienen un único patrón de comportamiento al que atenerse.

3 ARQUITECTURA DEL BUS DE PROCESO

3.1 Alternativas para las distintas topologías de red

En las primeras implementaciones del bus de proceso, se puede observar en la industria dos tendencias bien diferenciadas. Algunos fabricantes abogan por un bus de proceso basado en una topología punto a punto, en la que no existe red de comunicaciones. Otros fabricantes apuestan por una topología punto a multipunto, basada en una red de comunicaciones fiable. Ambas topologías comparten la tecnología, esto es, Ethernet es la tecnología base.

En las **conexiones punto a punto**, los IED's (Intelligent Electronic Devices) de protección tienen una conexión directa con todos y cada una de las MU's (Merging Units) cuyas muestras requieren. Esta topología implica, tal y como se muestra en el figura, que los IED's tengan tantos interfaces de comunicación punto a punto como conexiones sea necesario establecer con las MU's. Del mismo modo, las MU's necesitan disponer de tantos interfaces de comunicación como conexiones tengan que establecer para dar servicio a los distintos IED's de protección y control. Tal y como se muestra en la siguiente figura, el IED1 (que participa en el bus de proceso) dispone de 3 conexiones directas con las MU1, MU2 y MU3. La MU2 necesita cuatro puertos ethernet para poder establecer conexiones directas con los IED1, IED4, IED5 e IED6.

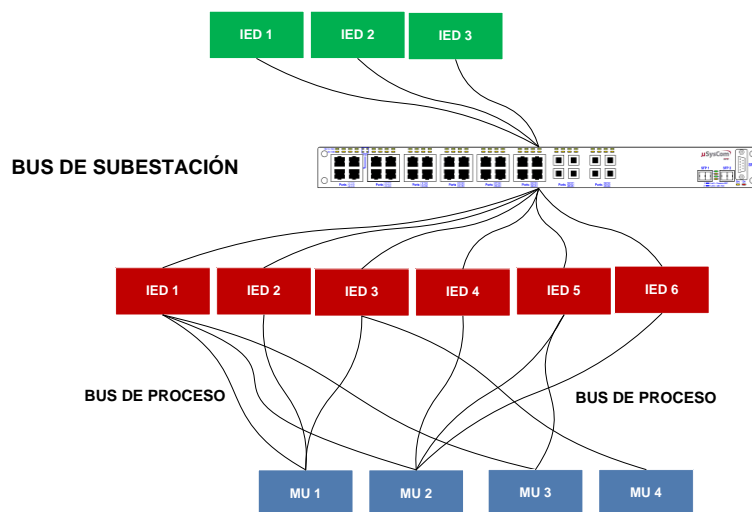


Fig. 1. Bus de proceso basado en una topología punto a punto

En las **conexiones punto a multipunto** los IED's de protección se conectan a una red de comunicaciones (switch en estrella representado en la figura siguiente), a la que, a su vez, se conectan las distintas MU's. La topología representada en la figura siguiente presenta redundancia en el bus de proceso, esto es, todos los equipos se conectan a través de dos redes independientes (dos switches Ethernet NO conectados entre sí). La conexión de los equipos a la red principal se representa en línea continua, y la conexión de los equipos a la red de backup se representa en línea discontinua.

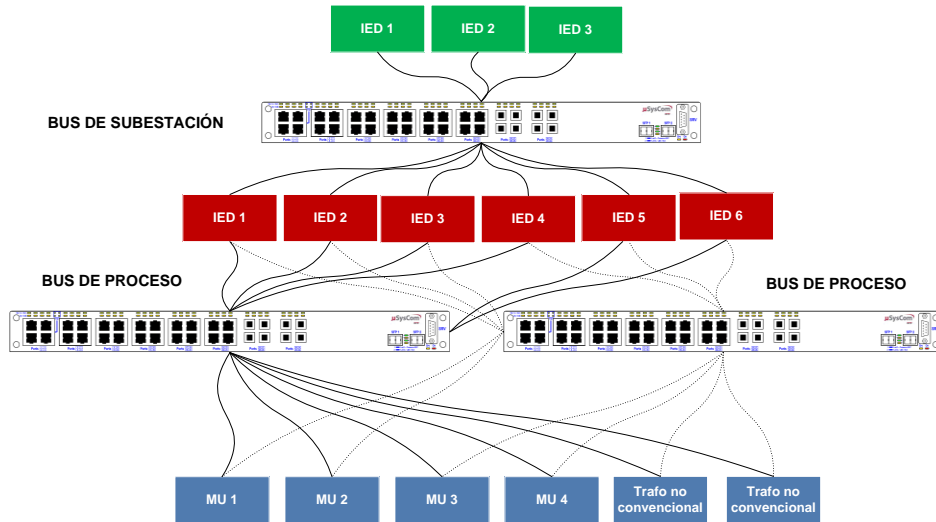


Fig. 2. Bus de proceso basado en una topología punto a multipunto

La solución de redundancia representada en la figura anterior se basa en el estándar IEC 62439 PRP (Parallel Redundancy Protocol). Esta solución es muy atractiva ya que la misma hace realidad el concepto de “bumpless redundancy”, esto es, los tiempos de recuperación ante fallos unitarios de la red son nulos. La base de funcionamiento de este protocolo se representa a continuación [1]. Una MU envía, a través de dos redes ethernet no conectadas entre sí (principal y backup), la misma trama ethernet. El IED de protección recibe las dos tramas, y descarta una de ellas. De este modo, en el caso que hubiera cualquier tipo de problema en una de las dos redes ethernet, el dispositivo de protección seguiría recibiendo las tramas ethernet, y lo que es más importante, el tiempo de recuperación ante fallos de red es cero. También merece la pena resaltar que el IED de protección en todo momento conoce el estado de ambas redes de comunicaciones, pudiendo notificar alarmas en el caso de detectar un fallo de red (caso en el que no reciba tramas procedentes de dicha red en un periodo de tiempo preestablecido).

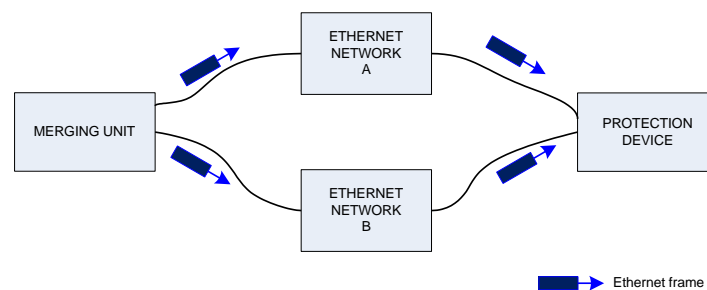


Fig 3. Envío simultáneo de tramas ethernet por dos redes independientes – PRP (Parallel Redundancy Protocol)

La cuestión que las distintas compañías eléctricas deben plantearse en este punto es, por tanto, ¿Queremos un bus de proceso basado en una red de comunicaciones o nos olvidamos de la red de comunicaciones y conectamos todos con todos?

El siguiente apartado analiza ambas alternativas, resaltando sus ventajas e inconvenientes.

3.2 Comparando las distintas topologías

¿Qué topología es la más adecuada? Para tratar de responder a esta pregunta trataremos de resaltar los puntos fuertes / débiles de cada una de ellas en lo referente a los aspectos que influyen en el rendimiento y despliegue del bus de proceso.

3.2.1 Escalabilidad

Vamos a tratar de ilustrar el concepto de escalabilidad con un ejemplo (por centrarnos en el problema de la escalabilidad, supondremos que no es necesario ningún tipo de redundancia).

Imaginemos que la implementación de un bus de proceso consta de 2 IED's que reciben información de 4 MU's. Una topología punto a punto requiere que, al menos, las MU's dispongan de dos interfaces de comunicaciones y que los IED's tengan 4 interfaces de comunicaciones, siendo el número total de fibras ópticas requeridas 8 ó 16, dependiendo de que sea posible transmitir y recibir información por una misma fibra (estándar tipo 100BASE-BX), o se dedique una fibra óptica a la transmisión de información y una segunda fibra óptica a la recepción de información.

Una topología punto a multipunto se resolvería con la ayuda de un switch ethernet. Dicho switch debería disponer de, al menos, cuatro puertos ópticos para comunicarse con las cuatro MU, y dos puertos eléctricos para comunicarse con los IED's.

En el caso que se requiera modificar la instalación para añadir, por ejemplo, tres trafos de corriente no convencionales, manteniendo las cuatro MU's, ¿Cómo nos podemos adecuar a la nueva situación?

Los IED's serían los equipos a modificar en una topología punto a punto, ya que los mismos deberían poder alojar al menos 7 interfaces de comunicación. Una topología punto a multipunto necesitaría un switch que tuviera al menos 7 puertos ópticos para poder recoger las muestras de los trafos no convencionales.

La escalabilidad, por tanto, es un factor limitativo para una topología punto a punto, dado que los IED's y las MU's diseñados para la misma dispondrán de un número máximo de interfaces de comunicaciones.

3.2.2 Sincronización

La sincronización del bus de proceso, para una topología punto a multipunto, se puede realizar mediante un reloj GPS, de la misma forma que se sincronizan los equipos que conforman el bus de subestación. Las mayores exigencias de precisión que encontramos en el bus de proceso provocan que se estén planteando otro tipo de protocolos diferentes al SNTP, como puede ser el IEEE 1588.

La sincronización de los equipos en una topología punto a punto implica que, al menos uno de los dos extremos del enlace, que tiene conexión directa con un reloj GPS, se encargue de la sincronización del otro extremo del enlace. En el caso del bus de proceso, si recordamos la figura 1 que representaba esta topología, los IED's del bus de proceso son sincronizados mediante el protocolo SNTP gracias a un reloj SNTP conectado en el bus de subestación. Estos equipos, a su vez, son los que deben sincronizar la información recibida de las MU's.

Otra solución posible para ambos tipos de arquitectura es definir un bus separado para sincronización basado en señales tipo 1PPS.

3.2.3 Jitter

Normalmente se tiende a pensar que el jitter de una solución punto a punto va a ser inferior al de una solución punto a multipunto, dado que la primera no incorpora switches ethernet y la segunda sí. No obstante, hemos de analizar muy cuidadosamente la anterior afirmación por dos cuestiones.

En primer lugar, la solución técnica adoptada por los fabricantes de IED's / MU que incorporan múltiples (más de 2) interfaces ethernet se basa en integrar un switch ethernet, con lo que, desde el punto de vista técnico, la diferencia entre una topología punto a punto ó punto a multipunto, no está en si hay ó no hay switch, sino más bien en si vemos el switch (topología punto a multipunto) ó si no vemos el switch (topología punto a punto).

En segundo lugar, me gustaría resaltar el hecho de que el estado del arte de la tecnología de conmutación basada en ethernet asegura unos tiempos de latencia con un jitter muy bajo [2] siempre que no se den situaciones de congestión de red.

3.2.4 Tolerancia a fallos.

A la hora de comparar la tolerancia a fallos de estas dos topologías, vamos a analizar tanto los tiempos de recuperación como los mecanismos de redundancia necesarios para cada una de ellas en dos situaciones diferentes, esto es, fallo en enlace de fibra óptica y fallo de equipo (switch ethernet) de la red de comunicaciones.

Tipo de fallo	Punto a punto	Punto a multipunto
Fallo enlace Fibra	En caso de un fallo en el enlace de fibra, el IED perdería la información procedente de la MU. Para eliminar este posible punto de fallo, se debería redundar el enlace entre el IED y la MU. Esto implica que una solución tolerante a este fallo requiere, por una parte, duplicar el número total de fibras, y por otra, duplicar el número de interfaces de comunicaciones en los equipos, tanto IED's como MU's. Los tiempos de recuperación ante fallos podrían ser inmediatos dado que podría aplicarse una solución similar a la planteada por el protocolo PRP.	El uso de dos redes de comunicaciones separadas físicamente, tal y como se plantea en la descripción de la topología punto a multipunto representada en la figura 2, permite disponer de una arquitectura tolerante a fallos de enlace de fibra óptica y a fallos de switch. Los tiempos de recuperación son de 0 ms.
Fallo switch ethernet	La topología punto a punto no se ve afectada por este tipo de fallo.	Aplica lo comentado en el caso de fallo de enlace de fibra óptica.

Fig. 4. Tolerancia a fallos

3.2.5 Coste

La comparación del factor coste entre ambas topologías es complicada. No obstante, sí parece evidente que existen unos costes adicionales dependiendo de la topología seleccionada, así, para una topología punto a punto, podemos esperar IED's y MU's de mayor coste, dado que requieren un número de interfaces de comunicaciones superior al requerido por una topología punto a multipunto. También, para la topología punto a punto, el número de fibras ópticas requeridas es mayor. El sobrecoste de la topología punto a multipunto viene dado por el equipamiento de red de comunicaciones requerido.

3.2.6 Interoperabilidad

No queríamos terminar esta comparativa sin hablar brevemente de la interoperabilidad. Y en este punto, sinceramente, no vemos ventajas a ninguna de las dos topologías. La interoperabilidad depende, en nuestra opinión, fundamentalmente de la compañía eléctrica. Si ésta quiere que en sus subestaciones las soluciones IEC 61850 propuestas por varios fabricantes sean interoperables, ésta se conseguirá. Esta búsqueda de la interoperabilidad requerirá un mayor esfuerzo inicial para la compañía eléctrica, aunque los beneficios a medio plazo (aseguramiento de suministro al mejor precio, al tener distintos proveedores) serán mucho mayores que soluciones IEC 61850 cerradas de un único fabricante.

4 CONCLUSIONES

Parece que indefectiblemente el bus de proceso va a ser una realidad en los próximos años. En la actualidad se están empezando a desarrollar en el mundo las primeras experiencias piloto.

Esta primera va a ser una etapa intermedia en la que se utilicen MU conectadas a transformadores de medida convencionales. Exigirá que se resuelvan aspectos de las comunicaciones, pero no habrá de requerir cambios en la algoritmia de los IED de protección y medida.

En una segunda etapa probablemente se utilizarán MU conectadas a transformadores no convencionales. Los aspectos de comunicaciones ya estarán resueltos previamente, y los desarrollos se enfocarán en la adaptación de los IED a la respuesta eléctrica de estos transformadores no convencionales.

Y en lo referente a la arquitectura de comunicaciones para el bus de proceso, podríamos concluir que una topología punto a punto puede ser la opción más adecuada para un número pequeño de conexiones entre los equipos que conforman el bus de proceso (cuatro podría ser el número de interfaces adecuado para un IED / MU). A medida que crece el número de equipos que deben intercambiar información en el bus de proceso, debiéramos desplegar una topología punto a multipunto.

5 REFERENCIAS

- [1] José Miguel Yarza, José Antonio García Oviedo y José Miguel Arzuaga, "Ethernet Process Bus, assuring its availability"
- [2] Aitor Arzuaga, "Ethernet in electrical substations: Latency"