

# **Evaluación de la viabilidad de servicios para protecciones diferenciales sobre redes modernas de transmisión en entornos de líneas de distribución para una *utility* eléctrica**

**Fernando Yustas Ruiz**

**Sistemas de Comunicación**

**Tutor/a de TF**

Javier Jordán Parra

**Profesor/a responsable de  
la asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

**Fecha Entrega**

01/2023



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-  
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

## Ficha del Trabajo Final

<b>Título del trabajo:</b>	Evaluación de la viabilidad de servicios para protecciones diferenciales sobre redes modernas de transmisión en entornos de líneas de distribución para una utility eléctrica
<b>Nombre del autor/a:</b>	Fernando Yustas Ruiz
<b>Nombre del Tutor/a de TF:</b>	Javier Jordán Parra
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	Carlos Monzo Sánchez
<b>Fecha de entrega:</b>	01/2023
<b>Titulación o programa:</b>	Master Universitario de Ingeniería de Telecomunicación
<b>Área del Trabajo Final:</b>	Sistemas de Comunicaciones
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave</b>	Protecciones diferenciales, DWDM, IP-MPLS, distribución eléctrica
<b>Resumen del Trabajo</b>	
<p>Valoración y verificación del correcto funcionamiento de los servicios de telecomunicaciones destinados al equipamiento de protección diferencial para líneas de alta y media tensión en el ámbito de distribución, sobre redes modernas de transmisión contextualizado en el entorno de una utility eléctrica. Se debe asegurar que estos servicios cumplen con los requisitos críticos de rendimiento de red de manera que sean fiables (las asimetrías no enmascaren o anulen un comando enviado) y seguros (que las perturbaciones de red de telecomunicaciones no provoquen un falso comando) consolidando la integridad de red sobre estos servicios críticos para la protección de elementos cruciales en las redes de distribución eléctrica. Se analizará el comportamiento de parámetros clave en diferentes escenarios de laboratorio y se valorará la viabilidad de su uso en red real.</p>	

**Abstract**

Assessment and verification of the operation in telecommunications services for differential protection devices for high and medium voltage lines in the distribution scope, over modern transmission networks contextualized in the environment of an electric utility. It must be ensured that these services meet critical network performance requirements so that they are reliable (asymmetries do not mask or cancel a sent command) and secure (telecommunications network disturbances do not cause a false command), consolidating the network integrity on these critical services for the protection of crucial elements in the electricity distribution networks. It will be analyzed the behavior of key parameters in different laboratory scenarios and it will be assessed the feasibility of its use in a real network.

# Índice

## Contenido

1. Introducción	9
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	9
1.2. Objetivos del Trabajo	10
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	10
1.4. Enfoque y método seguido	10
1.5. Planificación del trabajo	11
1.6. Breve resumen de productos obtenidos	13
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria	13
2. Materiales y métodos	14
2.1. Marco Teórico / Estado del arte	14
i. Protecciones Diferenciales de Línea o Teleprotecciones	14
ii. Servicios de teleprotecciones sobre redes de telecomunicaciones legacy	16
iii. Opciones tecnológicas para su migración a redes modernas	17
iv. Requisitos de Red de las Protecciones Diferenciales	25
v. Condiciones previas de la compañía en relación con las TIC	27
2.2. Solución Propuesta	29
i. Análisis y Decisión Tecnológica	29
ii. Objetivos de las pruebas e hipótesis	33
iii. Escenarios diseñados	34
i. Escenario I. DWDM-OTN	35
ii. Escenario II. DWDM-OTN con asimetría	36
iii. Escenario III. DWDM-OTN con enlaces de larga distancia	37
iv. Escenario IV. IP-MPLS con conexión directa	38
v. Escenario V. IP-MPLS a través de DWDM	38
vi. Escenario VI. IP-MPLS en red real con alteraciones	39
3. Resultados	40

i.	Escenario I. DWDM-OTN _____	40
ii.	Escenario II. DWDM-OTN con asimetría _____	41
iii.	Escenario III. DWDM-OTN con enlaces de larga distancia _____	42
iv.	Escenario IV. IP-MPLS con conexión directa _____	42
v.	Escenario V. IP-MPLS a través de DWDM _____	43
vi.	Escenario VI. IP-MPLS en red real con alteraciones _____	43
vii.	Conclusiones a pruebas realizadas _____	44
4.	Conclusiones y trabajos futuros _____	47
5.	Glosario _____	50
6.	Bibliografía _____	51
7.	Anexos _____	53

## Lista de Figuras

<i>Figura 1. Diagrama Gantt de la planificación del Trabajo Fin de Máster</i>	12
<i>Figura 2. Arquitectura de un servicio de protección de línea. ABB revista 2/2011</i>	15
<i>Figura 3. Niveles de Jerarquía PDH</i>	17
<i>Figura 4. Esquema de funcionamiento de WDM (Agrawal, 2002) [3]</i>	19
<i>Figura 5. Jerarquía de encapsulación OTN</i>	20
<i>Figura 6. Esquema de un ejemplo de red IP-MPLS Core</i>	21
<i>Figura 7. Arquitectura LTE-4G</i>	22
<i>Figura 8. Esquema de conexionado de Protección Diferencial sobre servicios ETH</i>	35
<i>Figura 9 DWDM-OTN Fabricante 1</i>	35
<i>Figura 10 DWDM-OTN Fabricante 2</i>	36
<i>Figura 11 DWDM-OTN Fabricante 1 con asimetría</i>	37
<i>Figura 12 DWDM-OTN Fabricante 2 con asimetría</i>	37
<i>Figura 13 DWDM-OTN larga distancia</i>	38
<i>Figura 14 IP-MPLS con conexión directa</i>	38
<i>Figura 15 IP-MPLS a través de DWDM</i>	39
<i>Figura 16 . MPLS en red real – Situación inicial</i>	40
<i>Figura 17 MPLS en red real – Situación tras corte</i>	40

## Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Requerimientos y necesidades de servicios de comunicación [4]</i>	26
<i>Tabla 2 .Resumen esquemático del análisis de Tecnologías</i>	32
<i>Tabla 3 . Tabla de recopilación de los resultados obtenidos</i>	46



# 1. Introducción

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

Las protecciones son críticas para la operación y control de redes eléctricas de alta y media tensión. Actualmente, los servicios destinados a las protecciones diferenciales o tienen medios físicos dedicados o transitan por redes de transmisión consideradas ya obsoletas, como son las redes de PDH y SDH que han sido utilizadas durante décadas por las compañías eléctricas debido a su multiplexación estática, constante a lo largo del tiempo. Esto es así porque estos servicios tienen muy poca necesidad de capacidad en comparación con otro tipo de servicios destinados al usuario, por lo que se han podido mantener por redes con bajo ancho de banda, pero fiables, predecibles en su comportamiento y seguras, con unos parámetros de red deterministas. Sin embargo, las compañías eléctricas se encuentran en una situación de alta dificultad para mantener estas redes antiguas en activo debido a factores como la necesidad de maximizar las prestaciones de sus activos de red (mayor demanda de capacidad y servicios), la falta de soporte y repuestos por parte de los fabricantes de las redes ya obsoletas (ya no disponibles en su catálogo de productos) o por la incompatibilidad de estos servicios de red con los actuales sistemas de monitorización y mantenimiento.

Cabe destacar que la obsolescencia y la amortización de la inversión en las redes de telecomunicaciones es mucho más rápida en comparación con el equipamiento de redes eléctricas. Pero al ser redes convivientes en las mismas infraestructuras, es muy común que sus ciclos de vida vayan emparejados hasta que o bien la red de telecomunicaciones existente deja de ser funcional o hasta que los servicios de la parte eléctrica evolucionan y requieren de nuevos requisitos de red que no se cumplen con las telecomunicaciones existentes. Y en este sentido, las compañías eléctricas requieren que el despliegue de nuevas soluciones de telecomunicaciones mantenga una compatibilidad hacia atrás con los servicios ya existentes y con la posibilidad de escalar y evolucionar para satisfacer los nuevos servicios. De este modo, lo nuevo desplegado por la natural evolución de la red ha de ser compatible con las características de los equipos eléctricos antiguos (*legacy*) en términos de interfaces de comunicación, tipo de señal transmitida o configuraciones necesarias del elemento, y deben además poder también dar respuesta a otros servicios de mayores prestaciones en términos de capacidad, seguridad, etc.

De este modo, al verificar el correcto comportamiento de las teleprotecciones diferenciales (servicio de misión crítica, fundamental para el negocio eléctrico) por las redes actuales de transmisión y datos permitirá una migración ordenada de servicios que facilitará el abandonar completamente el uso de redes obsoletas y sin soporte que han de estar en vías de desmontaje.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

Los objetivos principales de este trabajo son la evaluación y viabilidad de estos servicios de protecciones diferenciales sobre redes de transmisión actuales y comunes en las redes de telecomunicaciones de una *utility* eléctrica en el ámbito de distribución (no se contempla el ámbito de redes de transporte eléctricas de alta y muy alta tensión). Primeramente, tendremos que recopilar los parámetros de red límites que soportan este tipo de servicios para después realizar un análisis de la diferente oferta tecnológica del mercado. Finalmente, y en consecuencia con el resultado de estos objetivos comentados, se realizará una propuesta de evolución de arquitectura de manera que sustituyendo los equipos de telecomunicaciones actuales y de manera independiente al proveedor, se defina una solución de red idónea para este tipo de servicios.

## 1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Considero que este trabajo de contenido completamente técnico y aplicado directamente sobre un entorno industrial no tiene aplicación directa ni impacto sobre la dimensión ético-social ni sobre la dimensión de diversidad, género y derechos humanos. Atendiendo a la dimensión de sostenibilidad, el trabajo tendrá cierto impacto en la sostenibilidad de la instalación al permitir desmontar equipos obsoletos que únicamente están desplegados para proporcionar estos servicios. De esta forma, se reducirá el consumo eléctrico pudiéndose asociar con el ODS número 12 – *Responsible consumption and production*.

## 1.4. Enfoque y método seguido

Primeramente, se ha recabado la información sobre las limitaciones de actuación y rendimiento de las protecciones diferenciales en el ámbito de distribución eléctrica sobre

una red de telecomunicaciones para después analizar el comportamiento de las redes actuales de diferentes tecnologías, evaluando la viabilidad estos servicios. A continuación, se ha realizado una valoración de cada tecnología para valorar cuáles serán las más adecuadas de validar en función de una serie de criterios definidos. Posteriormente se han diseñado una serie de simulaciones en laboratorio con parámetros similares a los que encontramos en diferentes configuraciones de red. En función de los resultados de estas pruebas, se va a continuar con la simulación en red real para evaluar su comportamiento.

Tras estas pruebas, se analizarán los resultados finales y el comportamiento durante un periodo determinado y en consenso con el personal de monitorización de red eléctrica, se decidirá si homologar alguna de las soluciones propuestas.

## 1.5. Planificación del trabajo

- Fase previa al comienzo del curso: Investigación y planteamiento inicial del tema sobre el que se quiere realizar el trabajo. Análisis de situación, posibles objetivos y alcance del mismo.
- PEC1: Definir tema, estructurar memoria y planificar objetivos. Se concreta el tema y el alcance del trabajo. Se estructura la memoria, se define la estrategia y el enfoque a seguir para lograr los objetivos deseados. En conjunto, se realiza la planificación que nos permitirá desarrollar el trabajo.
- PEC2: Relacionar tema escogido con otros trabajos relacionados. Construcción del estado del arte del proyecto donde se recopilará la situación actual del ámbito concreto de la investigación y la búsqueda bibliográfica de recursos relacionados con el trabajo.
- PEC3: Producto del TFM. Simulaciones, gráficas y resultados del trabajo. Descripción de la solución propuesta donde se explicarán los experimentos realizados, los resultados obtenidos, las problemáticas encontradas y las conclusiones a raíz de estos resultados. También se trabajará sobre los trabajos futuros previstos. Las medidas y resultados se estructurarán en formato tabla.
- PEC4: Construcción memoria final (unificación PEC 1, 2 y 3). Se unificará el trabajo realizado en las PEC anteriores y se completarán los apartados que deben ser redactados tras el grueso del trabajo.
- PEC5: Defensa del trabajo. Para la defensa del trabajo se realizará una presentación en formato diapositivas y se entregará una grabación donde se exponga el trabajo. Posteriormente, se defenderá el trabajo frente a un tribunal.

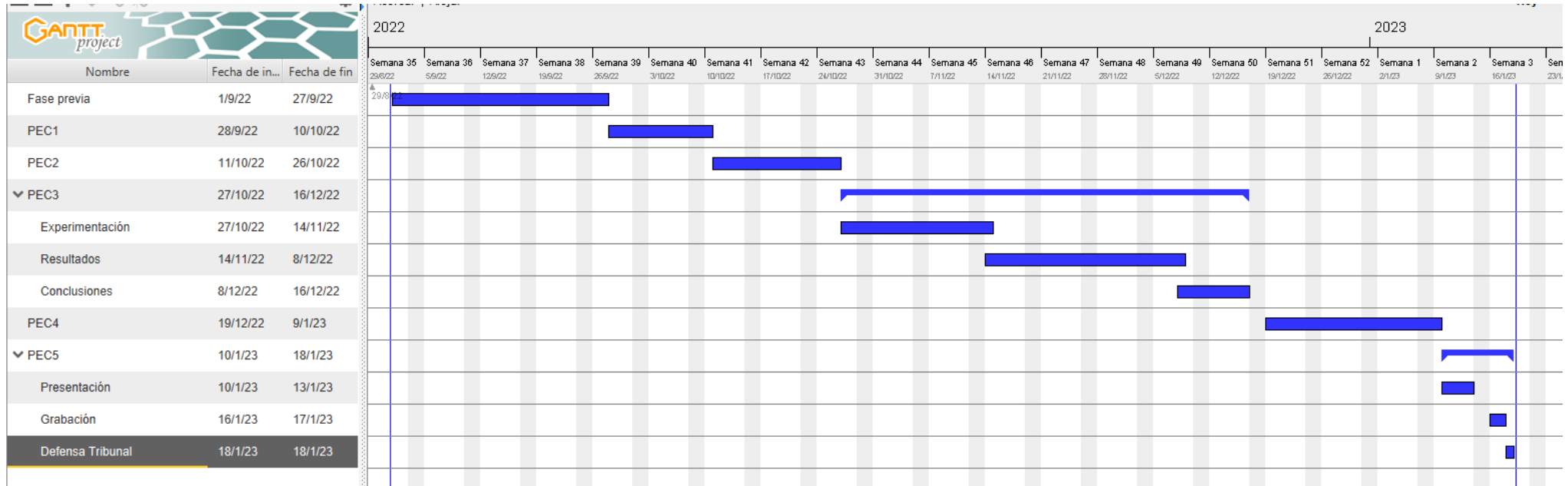


Figura 1. Diagrama Gantt de la planificación del Trabajo Fin de Máster

## 1.6. Breve resumen de productos obtenidos

1. Tabla de requisitos mínimos imprescindibles y evaluación de cumplimiento por cada tecnología
2. Pruebas en laboratorio de validación de tecnologías escogidas
3. Propuesta final de aplicación tecnológica en función del resultado de las pruebas

## 1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

### 2. Materiales y Métodos

2.1 – Marco Teórico / Estado del arte: Análisis de la situación actual junto a una recapitulación del abanico tecnológico disponible para la solución.

2.2 – Solución Propuesta: Evaluación de las prestaciones de cada tecnología, elección de tecnología(s) adecuada y diseño de propuesta de solución tecnológica y pruebas.

**3 – Resultados:** Recopilación de los resultados de las pruebas realizadas.

**4 – Conclusiones:** Visión global del desarrollo del trabajo, evaluando el desarrollo del mismo así del producto obtenido.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Marco Teórico / Estado del arte

#### i. Protecciones Diferenciales de Línea o Teleprotecciones

Los sistemas de protección diferencial o teleprotecciones son elementos de protección eléctrica utilizados para garantizar un aislamiento rápido y selectivo de averías en la red eléctrica. Su aplicación está extendida tanto para redes de transporte (alta y muy alta tensión), como para redes de distribución (alta y media tensión), aunque sus requisitos de funcionalidad no son los mismos puesto que en el ámbito del transporte aplican regulaciones más restrictivas que implican que los requisitos de red sean también más exigentes. El alcance de este trabajo se centra en el ámbito de distribución eléctrica, por lo que los requisitos a aplicar se circunscriben a los definidos expresamente para redes de alta y media tensión. Estos sistemas tienen una criticidad muy alta puesto que sirven para protegerse de las perturbaciones y averías en los sistemas eléctricos que generan apagones e indisponibilidad de la distribución eléctrica con grandes afectaciones y consecuencias desde el punto de vista del impacto en la vida pública como en la facción económica de la compañía. Su funcionamiento se basa en el principio de comparación de corriente donde la tensión en un elemento de la red debe ser la misma tanto a la entrada como a la salida de él.

Para establecerse la comunicación entre los elementos de la red eléctrica es preciso el uso de un canal de telecomunicaciones que permite el intercambio de datos e información, así como del envío de avisos ante emergencias, que provocarán la actuación del relé de protección y la apertura de la línea. Esta comunicación puede realizarse utilizando diferentes tecnologías, siendo las más comunes: enlaces con portadoras en líneas eléctricas (PLC), enlaces microondas, enlaces por fibra óptica directa o multiplexación a través de enlaces fibra. En la Figura 2 vemos representado un esquema de la arquitectura de un servicio de protección de línea.

### 1 Arquitectura típica de un sistema de protección

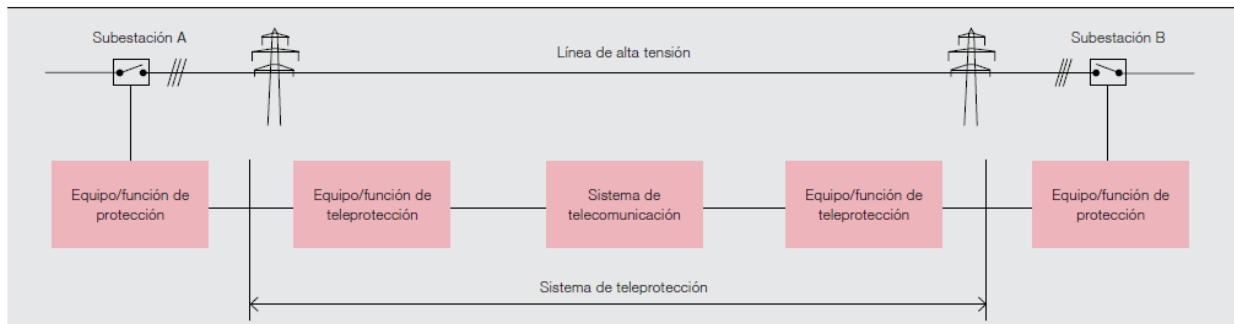


Figura 2. Arquitectura de un servicio de protección de línea. ABB revista 2/2011

El objetivo de estos servicios es permitir el tránsito de señales entre los elementos de teleprotección, que actúan como interfaz entre el relé de protección y la infraestructura de telecomunicaciones. La señal transmitida entre ambos sistemas podrá ser de dos tipos: primeramente, un tráfico continuo de valores de corriente (magnitud, ángulo...) para comparar el estado de la corriente entre centrales y en caso de detectar una anomalía o diferencia en las corrientes medidas, se enviará una señal de tipo comando que servirá para ordenar la operación a los interruptores (Disparo, Bloqueo...).

El cliente que hace uso de estos servicios suele ser personal encargado de salvaguardar y proteger la red de distribución, así como de solventar posibles incidencias de red tratando de minimizar la afectación. Gracias al intercambio de información constante entre las subestaciones, se va a detectar al momento una diferencia en las corrientes de las líneas medidas. Esta anomalía generará un evento alarmístico que será recibido por el equipo de operación y mantenimiento de la red de distribución que decidirá la manera de actuar y adicionalmente, dependiendo de la criticidad del evento, se transmitirá de forma automática un comando de operación sobre el interruptor que deba ser accionado. Para comprender el alcance y la criticidad de estos servicios, una distribuidora eléctrica que opera sobre el territorio español puede alcanzar el orden de 500 líneas de teleprotección activas que monitorizan las líneas de distribución entre subestaciones con distancias típicamente entre 10 y 80 kilómetros.

Para garantizar que el sistema es suficientemente seguro, es decir, que no se simule un comando en el extremo receptor cuando no se transmita la señal del comando correspondiente, así como fiable, teniendo en cuenta que no se producirá una demora

indebida o incluso la supresión de un comando realmente enviado, estos sistemas son muy restrictivos y sensibles en cuanto a latencia, *jitter* o asimetría en el tránsito de la señal. Debido a estas restricciones, estos servicios se han mantenido por redes antiguas de telecomunicaciones, de carácter más determinista, frente a la incorporación a las nuevas redes con características de transmisión estadística y con menor carácter determinista. En posteriores apartados comentaremos en detalle estas diferencias.

## ii. Servicios de teleprotecciones sobre redes de telecomunicaciones legacy

En la actualidad, los servicios de protección diferencial se suelen transmitir a través de fibra óptica directa o a través de redes en proceso de abandono como son las redes PDH y SDH, que desarrollamos a continuación:

- PDH (*Plesionchronous Digital Hierachy*, Jerarquía Digital Plesiócrona)

Tecnología de multiplexación de varios canales sobre un mismo medio, tradicionalmente utilizado en telefonía donde se permite la transmisión de varios canales telefónicos sobre un mismo medio. Utiliza técnicas de multiplexación por división de tiempo. Este tipo de tecnología tiene utiliza una sincronización parcial entre los elementos de la red. En la Figura 3 se muestra la diferente capacidad en función de los niveles de jerarquía PDH, partiendo de servicios de 64 kbps.



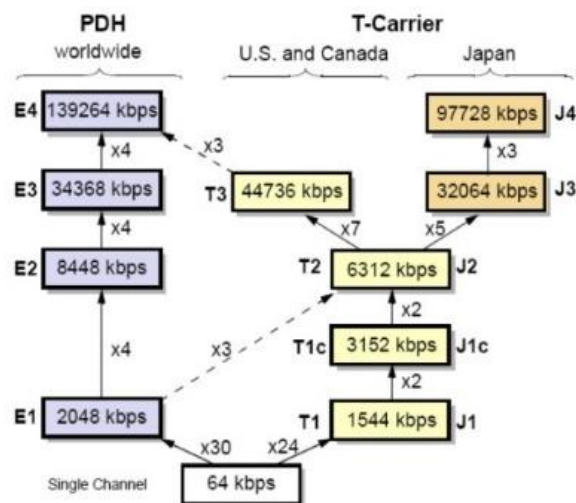


Figura 3. Niveles de Jerarquía PDH

- o SDH (*Synchronous Digital Hierach*, Jerarquía Digital Síncrona)

Evolución de la tecnología PDH y orientada a su uso en fibra óptica como medio de transmisión. Permite la encapsulación de varios tipos de servicio a través de las diferentes tramas que conforman los paquetes SDH y aumentó considerablemente la velocidad de los enlaces. Esta tecnología precisa de una sincronización completa en la red y también se multiplexa por división de tiempo. En este caso, la multiplexación parte de la unidad E1 (2Mbps) donde se concatenarán 63 señales para formar un STM-1 (155 Mbps). Podemos asociar diferentes STM-1 para aumentar la capacidad del canal (STM-4:622 Mbps, STM-16:2.5 Gbps...)

### iii. Opciones tecnológicas para su migración a redes modernas

La problemática principal con la que se encuentran las compañías eléctricas respecto a estos servicios no es que exista algún problema de rendimiento o incidencias en las comunicaciones debido al uso de estas tecnologías que han sido utilizadas durante décadas, sino que por la propia evolución del portfolio de los fabricantes de equipos de telecomunicaciones, estas tecnologías quedan fuera de soporte para continuar

aumentando la red, gestión de repuestos y el tratamiento de incidencias asociadas a estos servicios. Estos servicios de protección diferencial están considerados como “killer application” dado que es un servicio obligatorio en las subestaciones eléctricas y no poder migrar estas aplicaciones a la nueva infraestructura que se está instalando para dar servicios de mayor capacidad, te obliga a mantener la antigua infraestructura de red con los problemas asociados de operación y mantenimiento, espacio y reducción en el aprovechamiento de la inversión. Adicionalmente, por motivos de eficiencia y aprovechamiento de recursos, las compañías eléctricas tratan de evitar el uso de fibras ópticas dedicadas dado su alto coste y teniendo posibilidades alternativas de optimizar su uso.

Debido a esto, las compañías eléctricas deben evaluar la viabilidad de paso de estos servicios a nuevas redes, teniendo en cuenta las limitaciones de funcionamiento en cuanto a parámetros de red que soportan los servicios de teleprotecciones. A continuación, vamos a comentar una serie de tecnologías de red susceptibles de albergar estos servicios críticos:

- DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación Densa por Longitud de Onda)

La tecnología DWDM nos permite enviar varias señales independientes a través de la misma fibra óptica situando estas señales en longitudes de onda diferentes dentro de la banda C (1530-1565 nm). El comportamiento típico de DWDM será una serie de láseres transmitiendo a una determinada longitud de onda donde un multiplexor unirá en una sola señal que será transmitida por la fibra óptica. En recepción, un demultiplexor realiza el proceso inverso para recuperar la información original. Podemos ver un esquema en la Figura 4.

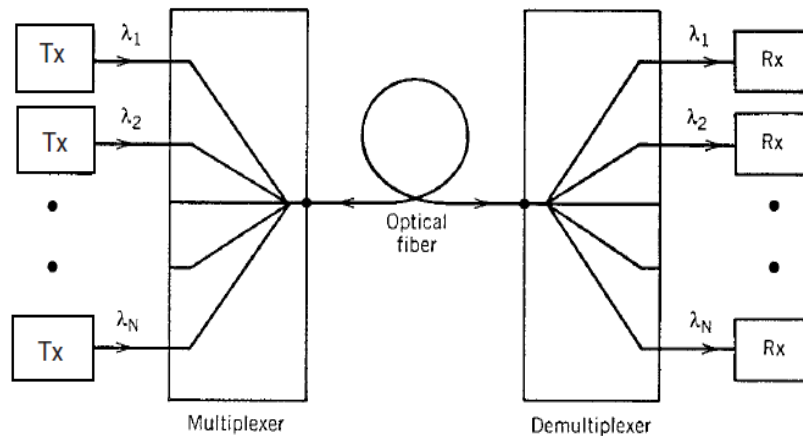


Figura 4. Esquema de funcionamiento de WDM (Agrawal, 2002) [3]

Gracias a esta tecnología, al permitir la transmisión conjunta de numerosas señales de alta capacidad, tendremos un mejor aprovechamiento de los recursos físicos. Además, permite la transmisión a larga distancia, así como dota de gran escalabilidad y dinamismo a la red.

Las redes DWDM, dentro del modelo OSI, las encontramos en la capa física. Para hacer uso de estas fibras, vamos a utilizar redes de transporte OTN. Son comúnmente utilizadas en la sección de transporte de compañías eléctricas, así como en operadoras de comunicaciones.

➤ OTN (*Optical Transport Network*, Redes de Transporte Óptico)

Jerarquía de transmisión de datos de carácter determinista a través de los sistemas de multiplexación por longitud de onda. Los servicios son encapsulados partiendo del cliente original para después ir añadiéndose cabeceras que posteriormente se utilizarán para recomponer la señal en el procesado digital.

Siguiendo la encapsulación que se muestra en la Figura 5, partimos de la señal de cliente (por ejemplo, un servicio Gigabit-Eth) y se le añaden las cabeceras OPU para encapsular la señal y alinearla en OTN. Seguidamente la encapsulación ODU donde se añade la monitorización, operación y mantenimiento. Tras esto, la encapsulación OTU sirve para añadir FEC (*Forward Error Correction*) a la señal para corregir errores en recepción. Finalmente, con la conversión óptica de la señal, nos encontraríamos a nivel OCh.

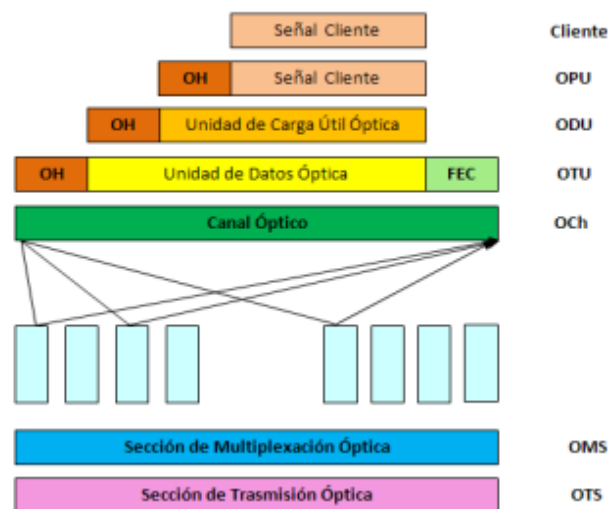


Figura 5. Jerarquía de encapsulación OTN

- MPLS (*MultiProtocol Label Switching*, Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo)

Tecnología de transporte de datos, ubicado entre la capa de Enlace de Datos y la capa de Red del modelo OSI. Está basada en el enrutado de paquetes basado en etiquetas a nivel de Enlace (capa 2) que marcan qué camino deben seguir sobre redes IP que no estén orientadas a la conexión, sin necesidad de leer las propias cabeceras del paquete, tal y como se realiza tradicionalmente en la capa de Red (capa 3). Esto aumenta su flexibilidad, la eficiencia y la seguridad de la transmisión puesto que permite equilibrar el uso de recursos y evitar cuellos de botella. Permite el uso de configuración de QoS (*Quality of Service*) de forma individual para cada tipo de servicio.

Por sus características y flexibilidad, para la capa de datos de redes con una amplia variedad en el tipo de servicios como es el caso de las compañías eléctricas, es común hacer uso de tecnología IP-MPLS. Permite la convivencia y coexistencia de diferentes

servicios, con diferentes características y criticidades lo que la hace idónea en el mundo multiservicio de las compañías eléctricas.

En este caso vamos a analizar brevemente la arquitectura de una red IP-MPLS:

- Tipos de nodos:
  - LER: Label Edge Router, encargado de asignar etiquetas. Se encuentra al borde de la red MPLS y se conecta a clientes de red.
  - LSR: Label Switch Router, encargado de conmutar paquetes en base a sus etiquetas.

Vemos un ejemplo de red en la Figura 6

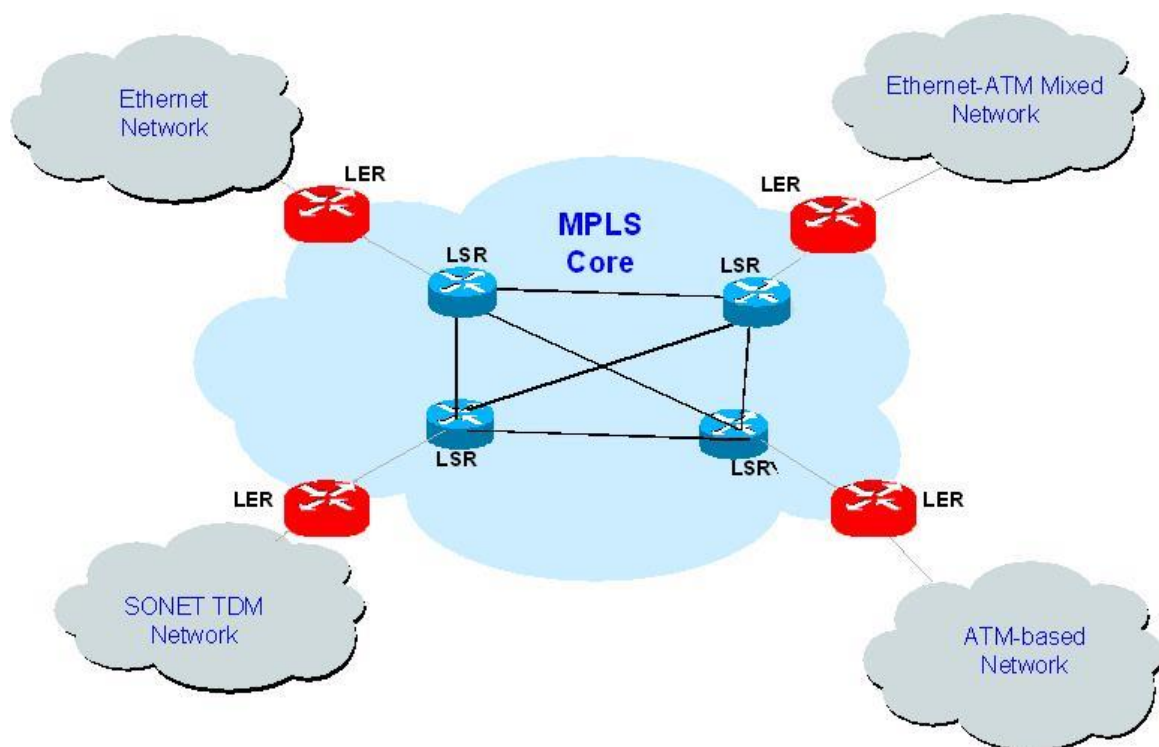


Figura 6. Esquema de un ejemplo de red IP-MPLS Core

- Tipos de túneles:
  - LSP: Label Switched Path, túnel unidireccional entre dos extremos MPLS (LER). Cada LSP puede tener diferentes rutas definidas para comunicar ambos extremos.

- SDP: Service Distribution Path, asociación del servicio y el LSP que debe utilizar.

- 4G/LTE (Long Term Evolution) Privado:

Debido al desarrollo de los elementos de automatización en las redes de distribución, es común que las compañías eléctricas desplieguen redes privadas de LTE o 4G para dar servicios en tiempo real.

Esta tecnología de comunicación inalámbrica es una evolución de la norma 3GPP UMTS (3G) y está basada en una multiplexación OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) que permite ampliar el ancho de banda útil de la señal, así como mejorar los tiempos de latencia en comparación con las tecnologías previas.

En la Figura 7 vemos un esquema de la arquitectura de LTE donde vamos a encontrar:

- UE (User Equipment): Terminal de usuario.
- eNodeB (Envolved Node B): Interfaz de radio.
- Serving GW: Gestiona la movilidad del tráfico entre la parte radio y el núcleo de la red.
- MME (Mobility Management Entity): Nodo principal que gestiona el plano de control.
- HSS (Home Subscriber Service): Almacenamiento de datos de los usuarios de la red.
- PDN GW (Packet Data Network): Gestiona el tráfico y la conectividad con redes externas.

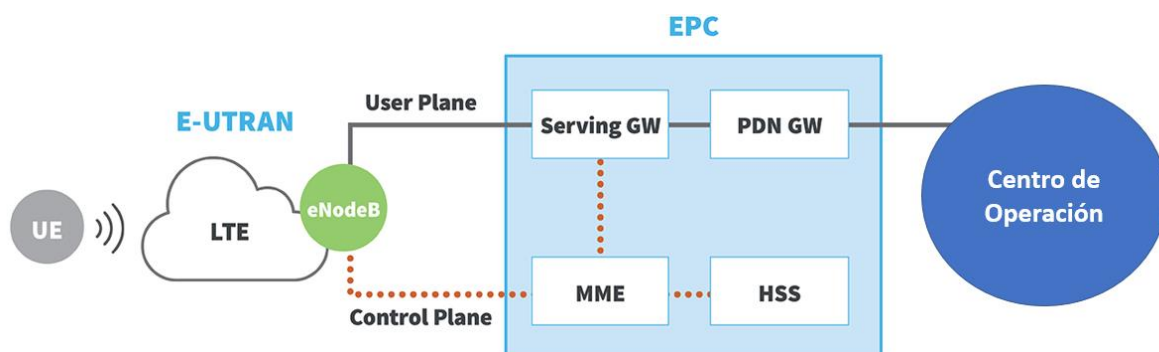


Figura 7. Arquitectura LTE-4G

Ya que los servicios de teleprotección tienen una fuerte limitación en requerimientos de red como la latencia, es preciso comentar que en esta tecnología el mayor incremento de latencia lo vamos a encontrar en la sección radio frente a la que encontramos en el CORE de la red (EPC, Evolved Packet Core). Nuestros servicios, al ser una comunicación punto a punto entre dos elementos de protección (como vimos en la Figura 2), van a sufrir este incremento de latencia doblemente, una por cada tránsito por el enlace de radio.

- 5G:

La evolución al 4G es la tecnología 5G. Esta quinta generación de comunicaciones inalámbricas está basada en servicios, en la hiperconectividad de elementos de red y la rapidez de comunicación, que puede ser aprovechada por todo el entorno industrial (Industria 4.0) y se encuentra en diferentes estados de despliegue para industrias de todo el mundo, incluido el sector eléctrico. Actualmente, no es común encontrar estas redes desplegadas con un uso generalista, sino que se encuentra en fases de experimentación, pilotos y pruebas de concepto, aunque se prevé un gran número de usos y se está apostando fuertemente sobre esta tecnología.

Independientemente de la arquitectura de la red, debemos tener en cuenta que los tres pilares sobre los que está diseñada la tecnología 5G son:

1. Aumento masivo de la velocidad de transmisión
2. Aumento masivo de las conexiones permitidas por estación
3. Disminución drástica de la latencia en comunicaciones

Debemos fijarnos en el último de estos tres pilares puesto que puede resultar idóneo en nuestro caso al tratar con servicios de altas necesidades de simetría y latencia. En relación con el uso de 5G en entorno eléctrico, podemos observar que se están realizando estudios para comprobar las posibilidades que ofrece en el entorno de *Smart Grids* (Ghanem, K., Ugwuanyi, S., Asif, R. y Irvine, J., 2021)[7]. En este estudio, los autores analizan las posibilidades que ofrece esta tecnología a varios ámbitos de las Smart Grids y sobre los servicios de teleprotecciones realizan una serie de pruebas confirmando la viabilidad en un entorno limitado de saltos.

Asociado también a este estudio, viene al caso plasmar lo que comentan los autores en relación con el uso de protecciones diferenciales sobre tecnología radio puesto

que no se ha utilizado este tipo de redes para transmitir estos servicios, a excepción de microondas en entornos controlados. También sugieren que debido al coste del despliegue y la robustez de las soluciones 4G del mercado, la tecnología LTE-4G sería más apropiada para el uso de servicios de Smart Grids.

- IEC 61850:

Estándar asociado a la automatización de subestaciones en el ámbito de las Smart Grids (SAS, Substation Automation Systems). En él se abordan ciertos requerimientos y configuraciones en relación con los protocolos de comunicación entre elementos de una subestación (protección, control, medición...). Este protocolo ofrece numerosas facilidades en cuanto a la gestión de los elementos de la subestación, facilitando la interoperabilidad entre ellos y la inclusión de nuevos sistemas. Está basado en comunicación Ethernet y hace uso principalmente de paquetes de transmisión GOOSE (Generic Object Oriented Substations Events).

En relación con los servicios de protección diferencial, pese a ser un protocolo diseñado para los servicios internos de una subestación, se han realizado pruebas para evaluar su comportamiento en servicios entre estaciones con resultados poco exitosos (Serra, M., Castro, F. 2007)[12]

- TSN (Time Sensitive Networking):

Es un conjunto de estándares para comunicaciones Ethernet de carácter determinista, ubicado en la capa 2 del modelo OSI, que mediante el uso de relojes GPS o el protocolo IEEE 1588[9] permite la sincronización de los elementos de red para trabajar a un mismo tiempo. También tiene la posibilidad de configurar tipos de tráfico y prioridades para permitir la convivencia entre tráficos de diferente criticidad.

Esta tecnología tiene un gran desarrollo en entorno industrial y relacionado con redes IoT (Internet of Things). Una de sus principales características es que permite la convivencia de tráfico originado por pequeños elementos IoT junto a grandes tráficos entre servidores. En la industria eléctrica, se ha valorado el uso de esta tecnología por sus buenos comportamientos frente a la latencia y simetría en las comunicaciones (R. Salazar; T. Godfrey; N. Finn; C. Powell; B. Rolfe; M. Seewald, 2019) [8].



Adicionalmente, hemos comprobado otros casos donde se han utilizado de manera conjunta el protocolo de automatización de red IEC61850 y el estándar de red Ethernet determinista TSN para explotar los beneficios de ambas tecnologías en un entorno de industria eléctrica (T. Docquier, Y. -Q. Song, V. Chevrier, L. Pontnau and A. Ahmed-Nacer, 2020; L. Muguira, J. Lázaro, S. Alonso, A. Astarloa and M. Rodriguez, 2020) [10] [11]

#### iv. Requisitos de Red de las Protecciones Diferenciales

Uno de los puntos clave a tratar a la hora de plantear la evolución a las tecnologías de transporte actuales es la diferencia de ritmo entre la obsolescencia en el ámbito eléctrico y las telecomunicaciones, siendo las primeras mucho más estables mientras que las segundas evolucionan a gran velocidad. Esto provoca que deba ponerse especial foco en la compatibilidad entre los elementos de red de comunicaciones utilizados y el tradicional equipamiento de redes eléctricas. En los equipos de protección diferencial que hemos tenido en cuenta para la realización de este trabajo y sobre los que debemos asegurar la viabilidad, encontramos dos tipos de conectividad a nivel de interfaz:

- C37.94: Interfaz que permite enviar la señal correspondiente al relé de las protecciones diferenciales transformándola a formato óptico para ser transmitida directamente por fibra óptica. [1]
- G703/704: Interfaz que está orientado a las comunicaciones digitales tradicionales utilizando un encapsulado E1 para su transporte a través de PDH o SDH, a 64Kbps y 2Mbps respectivamente. [2]

Una vez asegurada la conectividad entre elementos del sistema y el tránsito del servicio extremo a extremo, debido a lo restrictivos en cuanto a parámetros de rendimiento de red que son los servicios de protecciones diferenciales, debemos analizar el impacto que puedan añadir estas tecnologías y ajustes en la señal en cuanto a latencia, jitter o asimetría. Se han realizado una serie de estudios y experimentos prácticos sobre la materia (Rahman T, Morales J, Ward S, Udren E, Bryson M y Garg K, 2018)[4] donde podemos observar que pese a que la comunicación digital de protecciones por naturaleza son datos, su operación y requerimientos de actuación en tiempo real hace que se asemeje a necesidades de aplicaciones en tiempo real, como la voz. Podemos ver una comparativa en la Tabla 1:

	Data	Voice	Teleprotection
<b>Delay (latency) tolerance*</b>	High	Moderate/Low (100 ms)	Very low (<20 ms)
<b>Jitter (variation in delay) tolerance*</b>	High	Moderate	Very low
<b>Stream/burst transmission</b>	Bursts	Stream	Stream
<b>Interruption tolerance</b>	High	Moderate (0.5 sec)	None/very low
<b>Asymmetry tolerance</b>	High	Relatively high	Scheme dependent: from very low (87L) to a few ms (21L) to NA (DTT)

\* Note that reducing jitter will increase latency and vice versa. Jitter is minimized by increasing buffering, hence increasing the latency.

Tabla 1. Requerimientos y necesidades de servicios de comunicación [4]

- **Latencia:** Se requiere una baja latencia, menor de 20ms, aunque en la práctica recomiendan situarse en torno a 10ms. Deberá tenerse en cuenta que esta latencia consta de tres partes: retraso introducido durante el tránsito entre el equipo de protecciones y el de comunicaciones, retraso en el procesado de la señal del propio equipo de comunicaciones y retraso asociado al medio físico de transmisión.
- **Jitter:** Estas señales soportan un jitter muy bajo debido a que estas variaciones provocan desalineamiento de las señales. Una práctica habitual es utilizar un buffer para disminuir los valores de jitter, penalizando la latencia ya que esta ofrece mayor margen de actuación. Los equipos de protecciones habitualmente vienen con la posibilidad de configurar un jitter por defecto.
- **Asimetría:** Los servicios de protección diferencial están basados en un algoritmo de sincronización de datos que precisa de una latencia simétrica en los dos sentidos de la comunicación. Por esto son tan restrictivos a nivel

de asimetría generándose errores en el caso de existir diferencia entre las dos direcciones. También se puede hacer uso de un buffer interno para corregir esta asimetría.

Como podemos observar tras este análisis de prestaciones límite y requerimientos, el uso de tecnologías menos deterministas como es IP-MPLS puede poner en riesgo la seguridad del servicio debido a variaciones sobre el jitter establecido o en desalineamientos entre los sentidos de la transmisión que puedan afectar a la asimetría. En el caso de descubrir que no sea viable sobre la solución actual previamente comentada, se podrían valorar alternativas como las que se utilizan en diferentes estudios previos:

- Uso de sincronización externa mediante relojes GPS: Ya que la problemática principal asociada está relacionada con los posibles desalineamientos en la sincronización de las señales, una posible solución es la dotación de sincronización externa a las señales mediante relojes GPS (Shahi M, Tuazon P, Sinclair M y Chhetri S, 2022) [5]
- Uso de TP-MPLS en lugar de IP-MPLS: TP-MPLS (Transport Profile MPLS) es una variación del protocolo MPLS donde su principal objetivo es asegurar el transporte de una manera similar a las tecnologías OTN o SDH. Tiene menos flexibilidad debido a que se configura con caminos fijos extremo a extremo. Requeriría un ajuste importante en la red y solución específica de fabricante.
- En un estudio relacionado (Blair S, Booth C, De Valck B, Verhulst D, Kirasack C, Wong K y Lakshminarayanan S, 2016) [6] se realizaron pruebas para validar las protecciones diferenciales en el ámbito de redes de alta y muy alta tensión, con requisitos más exigentes que los nuestros. Obviamente si se validó en esa situación más restrictiva, será suficiente para nuestro escenario, pero la solución aportada por el fabricante está basada en su hardware específico con un mecanismo de compensación de asimetría propio.

## v. Condiciones previas de la compañía en relación con las TIC

Este estudio está basado en una Utility con unas condiciones en cuanto a las TIC fundamentadas una red de transporte basada en DWDM-OTN junto a una red de datos basada en IP-MPLS.

La arquitectura está diseñada de una forma que posee núcleo de red robusto y redundado a la par que unas flexibles redes de acceso. Estas dos tecnologías trabajan de manera conjunta puesto que la mayoría de los servicios tienen origen en la red IP-MPLS, red donde los equipos están conectados a través de DWDM. Adicionalmente y por necesidades especiales (capacidad, determinismo...) también hay posibilidad de transitar el servicio directamente por la red OTN-DWDM.

Debido a estas razones y teniendo en cuenta que se deben cumplir los requisitos para las teleprotecciones, se valorará positivamente el uso de una tecnología para estos servicios dentro del ecosistema de las TIC en las que se fundamenta la red de la compañía. Esto proporcionaría grandes beneficios a la Utility puesto que ya cuenta con personal especializado con la formación adecuada en cuanto al equipamiento y tecnología utilizado junto con las dinámicas de despliegue. Además, en los planes de evolución de red de la compañía ya se encuentra contemplado dotar de equipamiento de comunicaciones de estas tecnologías en todos los puntos clave donde se precisan servicios de teleprotección.

## 2.2. Solución Propuesta

### i. Análisis y Decisión Tecnológica

Una vez que hemos realizado la recapitulación teórica de una serie de tecnologías susceptibles de ser utilizadas en el contexto actual, vamos a analizar en todas ellas si cumplen de forma estricta con las necesidades técnicas de servicio y con una serie de factores prácticos de la implicación de la elección de la tecnología desde el punto de vista de la compañía eléctrica. Estos factores serán la adaptación con la red actual de la compañía eléctrica, la madurez de la tecnología en el mercado, la inversión económica asociada, la complejidad del experimento y el tiempo asociado para disponer de esta tecnología en red real.

- **DWDM-OTN**

1. Cumplimiento de requisitos y necesidades técnicas: Sí lo cumple puesto que los tiempos de latencia y asimetría asociados está por debajo de los límites teóricos, con unos valores de 5-6 ms de latencia teóricos [15]. En esta fase experimental se debería comprobar que los posibles retardos añadidos por el mecanismo de control de errores (FEC) no interfieren en la estabilidad del servicio. Se podrá tener que desactivar en caso de necesidad.
2. Adaptación a la red actual: Adaptación máxima puesto que esta red de transporte es sobre la que se apoyan las comunicaciones de la compañía y está en constante crecimiento.
3. Madurez de la tecnología en el mercado: Tecnología muy madura y asentada, con numerosos especialistas en la materia, soporte profesional y conocimientos muy arraigados dentro del personal de la compañía eléctrica.
4. Inversión económica asociada: Mínima puesto que está dentro de los presupuestos de inversión de la compañía el crecimiento en esta tecnología y se precisaría poco equipamiento adicional.
5. Complejidad del experimento: Experimento sencillo debido a la infraestructura ya instalada, el soporte de los actuales fabricantes y el conocimiento técnico interno.
6. Tiempo asociado para disposición en red real: Mínimo puesto que ya está la infraestructura instalada e implicaría añadir canales a una red ya establecida.

- **IP-MPLS**

1. Cumplimiento de requisitos y necesidades técnicas: Sí lo cumple puesto que los tiempos de latencia y asimetría asociados se han probado por debajo de los límites teóricos [18]. En el experimento se tendrá que evaluar si los mecanismos de protección de red pueden producir alteraciones en el funcionamiento de las teleprotecciones.
2. Adaptación a la red actual: Adaptación máxima puesto que esta red de datos es sobre la que se apoyan las comunicaciones de la compañía y está en constante crecimiento.
3. Madurez de la tecnología en el mercado: Tecnología muy madura y asentada, con numerosos especialistas en la materia, soporte profesional y conocimientos muy arraigados dentro del personal de la compañía eléctrica.
4. Inversión económica asociada: Mínima puesto que está dentro de los presupuestos de inversión de la compañía el crecimiento en esta tecnología y se precisaría poco equipamiento adicional.
5. Complejidad del experimento: Experimento sencillo debido a la infraestructura ya instalada, el soporte de los actuales fabricantes y el conocimiento técnico interno.
6. Tiempo asociado para disposición en red real: Mínimo puesto que ya está la infraestructura instalada e implicaría añadir canales a una red ya establecida.

- **4G – LTE**

1. Pese a que esta tecnología según su estándar está diseñada de forma que cumpliría con los requisitos limitantes de 20 ms [16], en la propia compañía se ha desplegado una arquitectura 4G para otros tipos de servicio y se ha comprobado que la latencia asociada excede las necesidades del servicio, puesto que se obtienen valores de latencias de 70-80ms.

- **5G**

1. Cumplimiento de requisitos y necesidades técnicas: Sí lo cumple puesto que los tiempos de latencia y asimetría asociados está por debajo de los límites teóricos, garantizando latencia inferior a 10ms. Esta tecnología está diseñada para servicios de mínima latencia (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communications, Comunicaciones Ultra Fiables de Baja Latencia) [14].
2. Adaptación a la red actual: No existe esta tecnología en la red actual e implicaría un despliegue completo de la infraestructura necesaria.
3. Madurez de la tecnología en el mercado: Tecnología poco madura en el mercado, mayoritariamente con pruebas de concepto y pilotos. Las posibilidades que ofrece y la adaptación a la casuística del servicio es muy alta, pero precisa de pruebas reales en numerosos ámbitos.
4. Inversión económica asociada: Muy alta debido a que se debe desplegar la infraestructura completa.
5. Complejidad del experimento: Muy alta al ser una tecnología muy novedosa, con pocas referencias en situaciones similares y que precisaría de una dedicación muy alta para alcanzar los conocimientos base necesarios.
6. Tiempo asociado para disposición en red real: Muy alto. Infraestructura totalmente nueva, formación para la operación y mantenimiento, retrasos asociados según se vaya evaluando la red real...

- **IEC61850**

1. Cumplimiento de requisitos y necesidades técnicas: Respecto a la viabilidad del uso de tecnología 61850 para servicios críticos en cuanto a latencia entre diferentes instalaciones se ha encontrado información contradictoria. Por un lado, existen estudios que no recomiendan su uso (Serra, M., Castro, F. 2007)[12] y en otros casos se encuentran manuales de fabricante que ofrecen servicios de teleprotecciones basados en la tecnología 61850 sobre MPLS (Manual Fabricante Valiant, 2022) [17]. Con esta información y con la ausencia de un número importante de casos de uso validados, se descarta el uso de esta tecnología.

- **Time Sensitive Networking**

1. Cumplimiento de requisitos y necesidades técnicas: Sí lo cumple puesto que los tiempos de latencia y asimetría asociados está por debajo de los límites teóricos ya que se puede configurar este servicio con la máxima prioridad con unos valores inferiores a los 2ms [13]. Esta tecnología está ideada para evitar los problemas de temporalidad en redes sensibles a variaciones en el tiempo.
2. Adaptación a la red actual: Adaptación baja puesto que estos estándares Ethernet precisan de un equipamiento que lo soporte, además de una sincronización externa.
3. Madurez de la tecnología en el mercado: Tecnología con una maduración media en el mercado. No hemos encontrado demasiados ejemplos de uso real.
4. Inversión económica asociada: Alta, asociada al equipamiento adicional.
5. Complejidad del experimento: Alta, principalmente asociada a ser una tecnología desconocida que conllevará una evaluación amplia para conocer su funcionamiento, además de la prueba asociada a las teleprotecciones.
6. Tiempo asociado para disposición en red real: Alto, debido a la necesidad de modificación de equipamiento y el aprendizaje asociado a la operación y el mantenimiento.

Hemos recopilado el análisis realizado en la Tabla 2:

Análisis de Tecnologías						
Tecnología	Cumplimiento de Requisitos	Adaptación a la red actual	Madurez de mercado	Inversión Económica	Complejidad del experimento	Tiempo para despliegue en red real
DWDM-OTN	SI	Muy Alta	Muy Alta	Muy Baja	Baja	Bajo
IP-MPLS	SI	Muy Alta	Muy Alta	Muy Baja	Baja	Bajo
4G-LTE	NO					
5G	SI	Muy Baja	Muy Baja	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alto
61850	NO					
TSS	SI	Baja	Media	Alta	Alta	Alto

Tabla 2 .Resumen esquemático del análisis de Tecnologías

Tras la evaluación de las posibles tecnologías a utilizar adaptadas al contexto actual de mercado y las necesidades de la compañía eléctrica, se ha decidido focalizar este proyecto en evaluar la viabilidad en redes DWDM -OTN e IP-MPLS. Además del



cumplimiento de los requisitos del servicio y las necesidades técnicas de la solución, los aspectos que mayor peso han tenido en esta decisión han sido dos:

1. La extensa red de estas tecnologías que posee la compañía eléctrica que permitirá su explotación con un reducido coste económico adicional y que no se precisará de una formación específica para nuevas tecnologías de cara a la operación y mantenimiento. Esto implica una reducción en los tiempos de implantación y explotación de la solución propuesta.
2. La asentada madurez del mercado en estas tecnologías que ofrece un alto conocimiento del fabricante en arquitecturas similares de cara a soporte y a definición de la solución.

El análisis realizado de las características y posibilidades de un amplio abanico de tecnologías ha podido determinar qué solución es la idónea para comenzar y migrar los servicios de protección diferencial a la nueva infraestructura de red que se está instalando y además ha aportado una interesante visión de cara a tecnologías alternativas que no se están utilizando actualmente pero que podrán ofrecer una solución para situaciones donde no se disponga de la infraestructura necesaria o que se plantee una evolución conjunta de los sistemas eléctricos de la subestación.

## ii. Objetivos de las pruebas e hipótesis

El objetivo principal de las pruebas de laboratorio asociadas será comprobar el correcto funcionamiento de los servicios de protecciones diferenciales en los entornos de red típicos que nos vamos a encontrar en el ámbito de las redes de distribución. Para ello, se han diseñado una serie de escenarios que simulan las características comunes de red en cuanto a distancias, equipamiento y posibles anomalías y cambios de red que puedan suceder. En estos escenarios, se van a analizar las condiciones de red, centrándonos en la monitorización de los valores de latencia y jitter además del propio funcionamiento de la teleprotección. Los sistemas de teleprotección que serán utilizados para las pruebas evaluarán de forma continua si la comunicación con el otro extremo de la teleprotección es correcta, por lo que nos será útil para comprobar el estado del sistema. Además, se generarán eventos, comandos y alarmas para comprobar el buen funcionamiento del sistema.

Respecto al escenario sobre OTN-DWDM, al ser una tecnología determinista, con unas características de poco retardo y con una configuración que obliga a tener el mismo tránsito en ambos sentidos de la transmisión, la hipótesis inicial es que el servicio va a funcionar correctamente. En este caso, vamos a poner especial énfasis en evaluar cómo afecta la longitud del enlace, las posibles asimetrías que puedan surgir en la red y los procesos de corrección de errores en el resultado de la operación. En relación con el escenario IP-MPLS, primeramente, comprobaremos que la solución es viable en un estado de estabilidad de la red para posteriormente introducir alguna modificación en la misma y así comprobar su comportamiento teniendo en cuenta los mecanismos de ajuste de ruta de la tecnología.

### iii. Escenarios diseñados

Tal y como hemos comentado en el apartado 2.1.iv Requisitos de Red de las Protecciones Diferenciales, el equipamiento de teleprotección utiliza unos interfaces para señales de tipo C37.94 o G703. Estos interfaces son incompatibles con la solución estándar para servicios a través de la red DWDM o IP-MPLS, puesto que los canales homologados de uso con la red actual (sin una solución de fabricante específica para el caso de las protecciones diferenciales) tienen formato Gigabit Ethernet. Para solucionar esta incompatibilidad entre interfaces de red, se ha decidido utilizar un conversor G703(E1)-GETH. Este conversor debe ser transparente a la señal y tendrán que evaluarse los retardos que puede introducir en el servicio extremo a extremo. Según esta situación, tendremos un esquema de conexionado similar a la Figura 8.

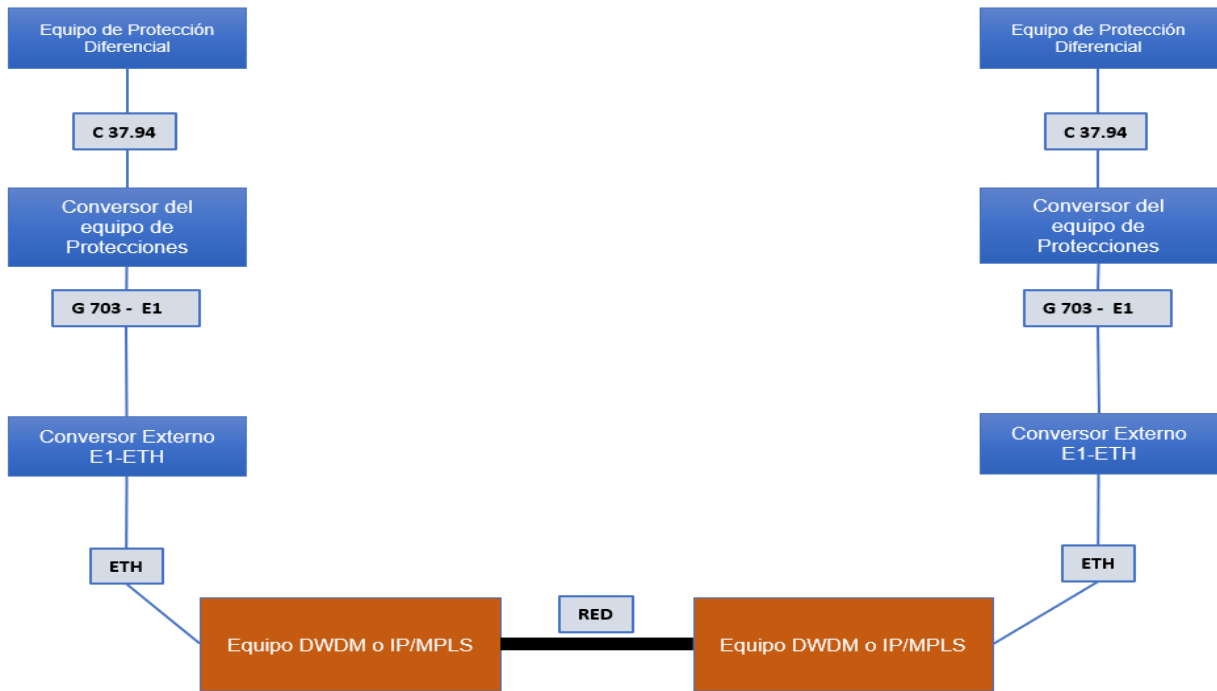


Figura 8. Esquema de conexionado de Protección Diferencial sobre servicios ETH

Este equipamiento adicional va a afectar añadiendo un retardo añadido al servicio que hemos tipificado en 3-4 ms. Equivale al tramo entre la salida del equipo de protección diferencial y la entrada al equipo DWDM o IP-MPLS. Puesto que la toma de datos se ha realizado en el equipo de protección diferencial, ya se ha tenido en cuenta este retardo en el análisis de parámetros de los experimentos.

### i. Escenario I. DWDM-OTN

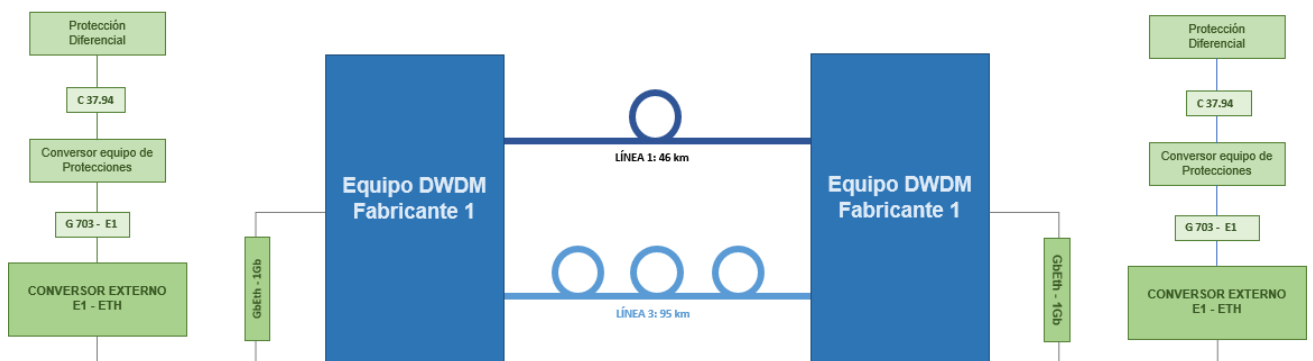


Figura 9 DWDM-OTN Fabricante 1

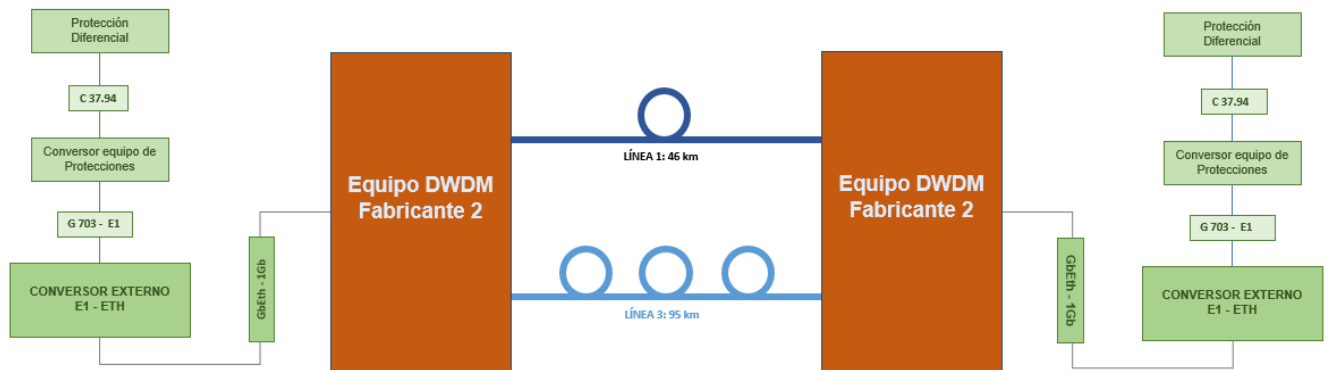


Figura 10 DWDM-OTN Fabricante 2

En este escenario se va a comprobar el funcionamiento conectando el convertidor E1-ETH a un puerto Ethernet de la sección OTN de la red DWDM. Vamos a evaluar el comportamiento de los equipos de 2 fabricantes, así como en diferentes distancias de fibra óptica de línea (46km y 96km).

## ii. Escenario II. DWDM-OTN con asimetría

Repetimos una de las pruebas del escenario I, con la fibra de línea de 46 km, añadiendo una asimetría en uno de los sentidos del enlace por medio de una bobina de lanzamiento de 10 km. De esta manera, en un sentido tendremos una longitud de fibra de 46 km y en el otro sentido tendremos una longitud de fibra de 56 km, donde evaluaremos el comportamiento con una asimetría en la longitud del enlace.

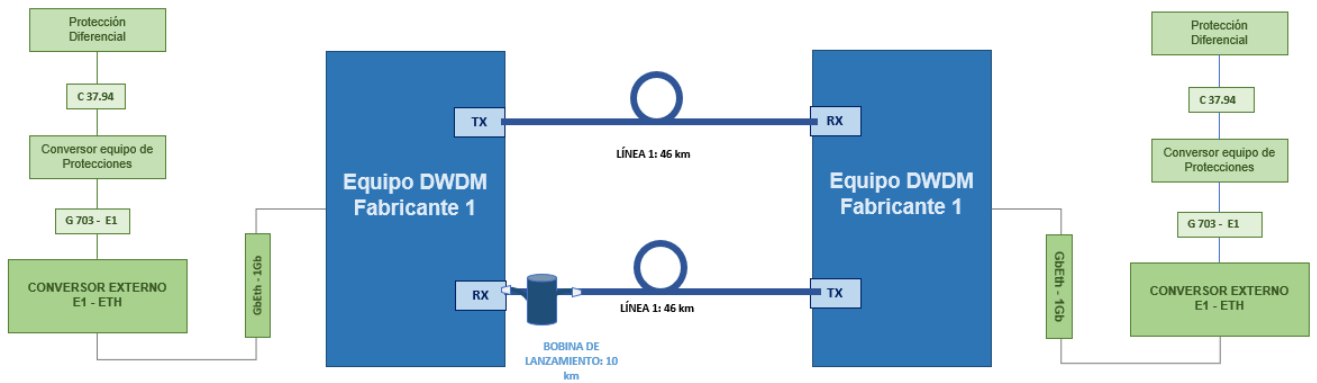


Figura 11 DWDM-OTN Fabricante 1 con asimetría

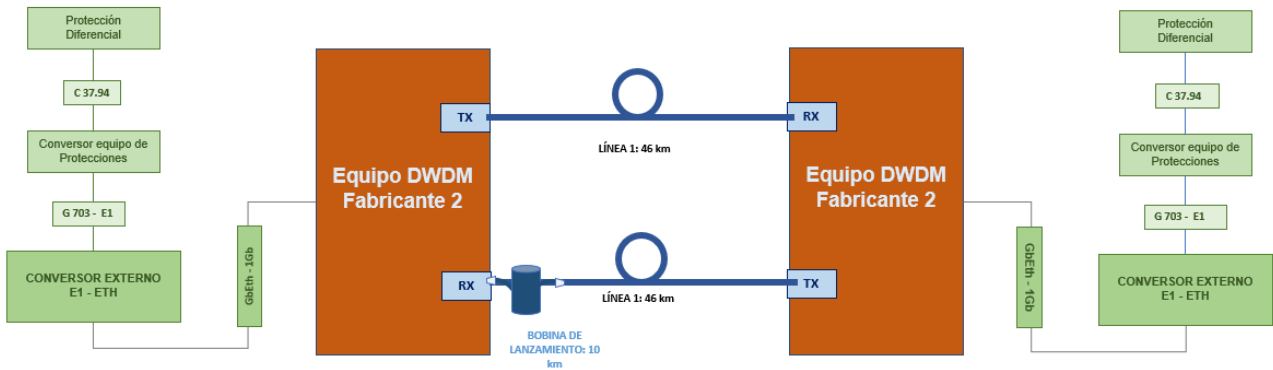


Figura 12 DWDM-OTN Fabricante 2 con asimetría

### iii. Escenario III. DWDM-OTN con enlaces de larga distancia

Simulación de un circuito a través de diferentes tramos de fibra, con transición en paso por varios nodos e interconexión eléctrica entre redes de diferente fabricante. Este enlace no será común en los servicios de teleprotecciones, aunque se ha decidido probar con el objetivo de estresar la situación original.

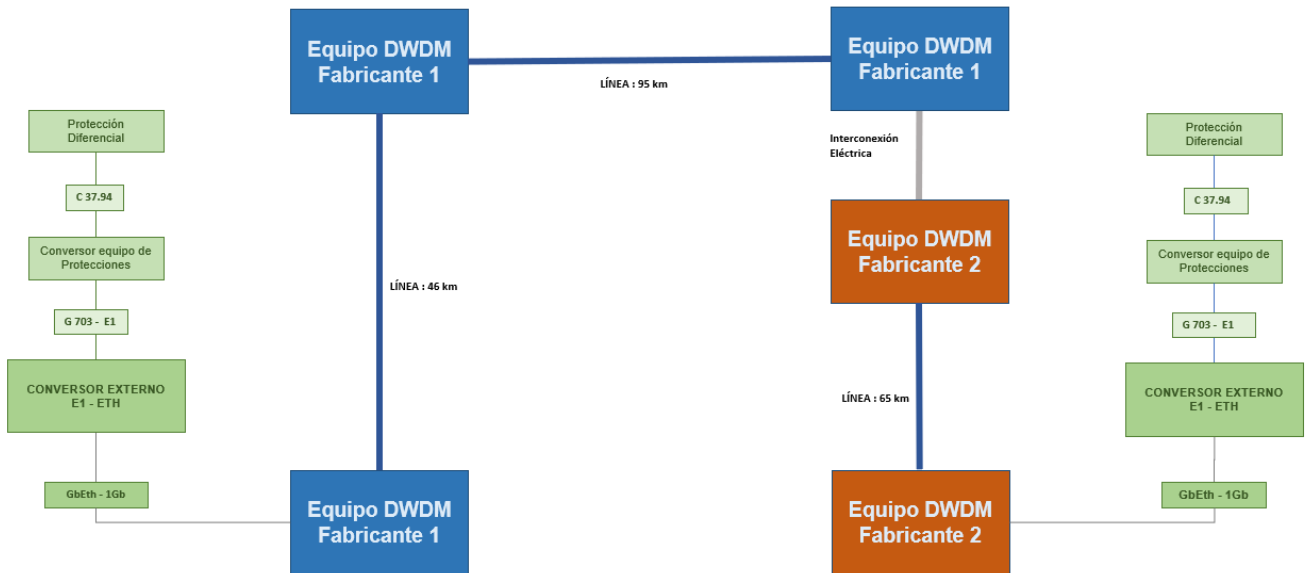


Figura 13 DWDM-OTN larga distancia

#### iv. Escenario IV. IP-MPLS con conexión directa

Evaluación inicial del funcionamiento a través de IP-MPLS con la configuración de red básica, con una conexión directa entre los equipos MPLS.

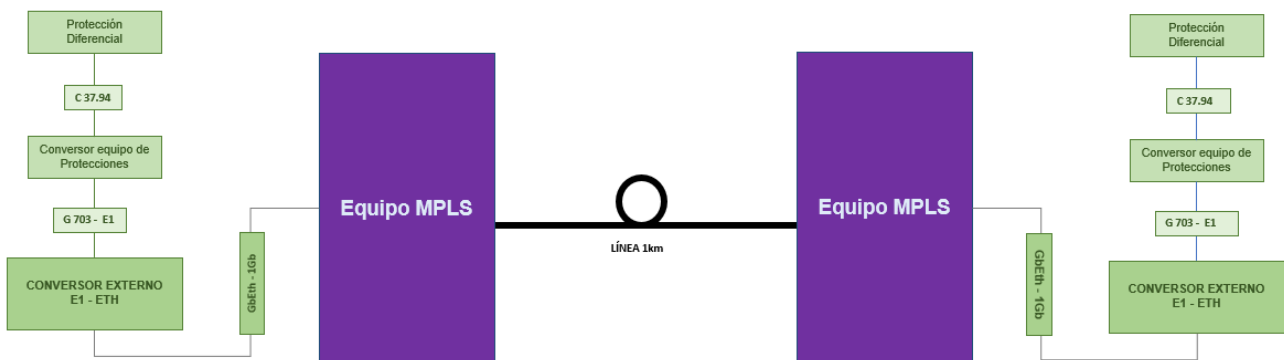


Figura 14 IP-MPLS con conexión directa

#### v. Escenario V. IP-MPLS a través de DWDM

Evaluación inicial del funcionamiento a través de IP-MPLS con la configuración de red básica, con una conexión a través de un enlace DWDM entre los equipos MPLS.

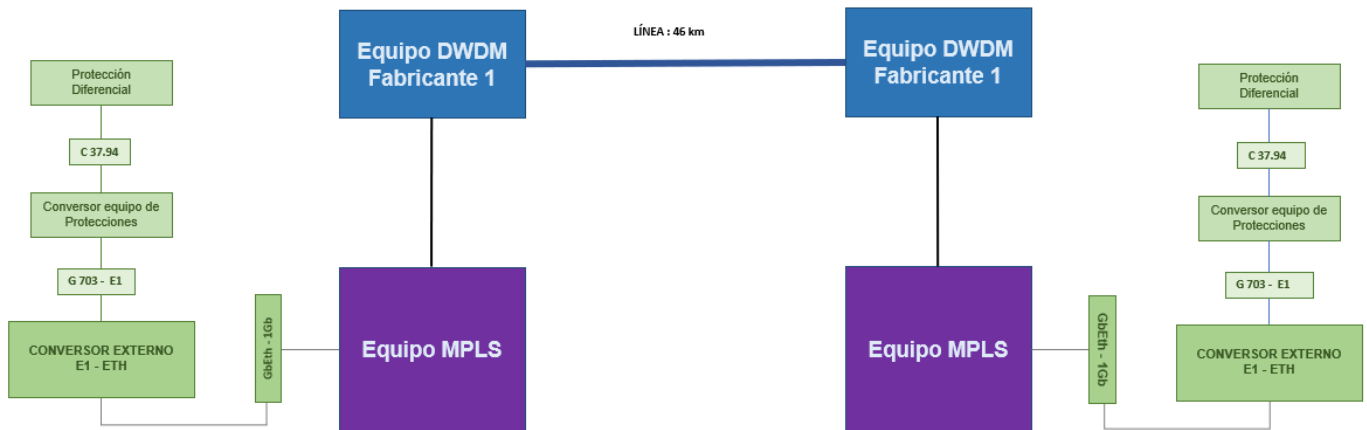


Figura 15 IP-MPLS a través de DWDM

## vi. Escenario VI. IP-MPLS en red real con alteraciones

Evaluación en red real del funcionamiento a través de IP-MPLS, en nodos en la red de producción simulando un corte en el enlace directo y evaluando el comportamiento tras activarse la redundancia de servicio.

El esquema del escenario nos muestra la arquitectura típica que encontramos en la red IP-MPLS. El origen del servicio estará en los nodos MPLS de acceso, con conexión directa por donde se establecerá el camino principal. Ambos nodos están conectados al núcleo de la red MPLS que ofrece un camino redundante en caso de corte en la conexión directa.

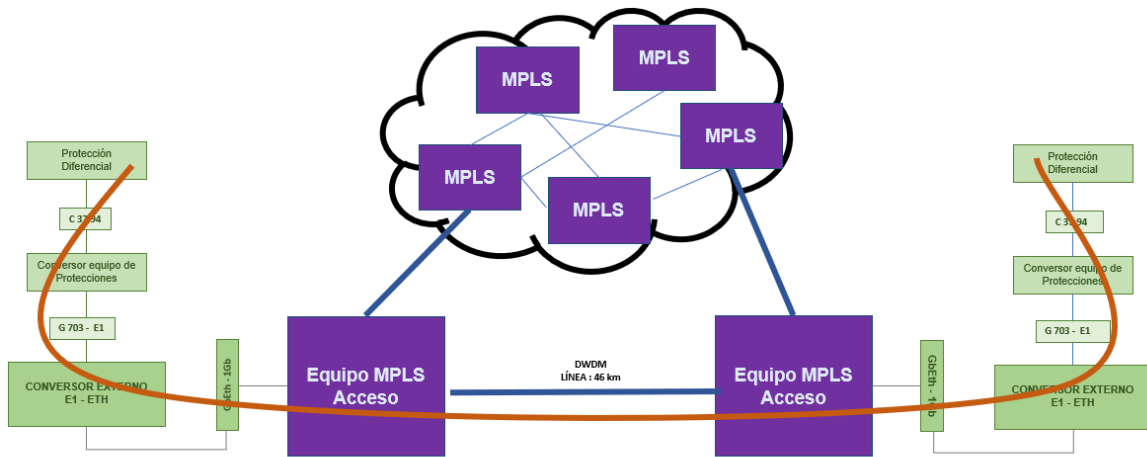


Figura 16 . MPLS en red real – Situación inicial

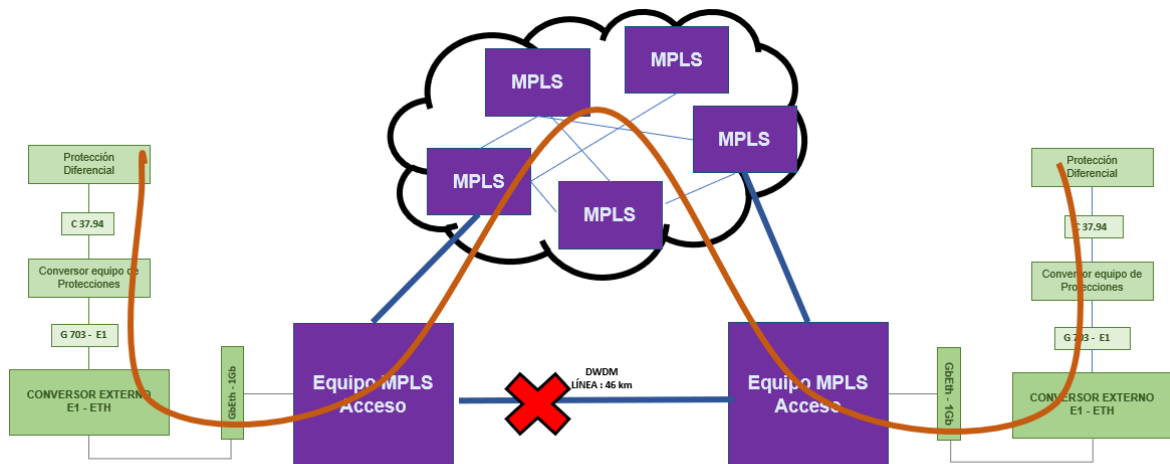



Figura 17 MPLS en red real – Situación tras corte

### 3. Resultados


#### i. Escenario I. DWDM-OTN

DWDM Fabricante 1 Línea de 46 km	
Latencia	5,8 ms
Jitter	0,035 ms
Funcionamiento Teleprotección	



DWDM Fabricante 1 Línea de 96 km	
Latencia	6,3 ms
Jitter	0,038 ms
Funcionamiento Teleprotección	

DWDM Fabricante 2 Línea de 46 km	
Latencia	4,4 ms
Jitter	0,04 ms
Funcionamiento Teleprotección	


DWDM Fabricante 2 Línea de 96 km	
Latencia	4,9 ms
Jitter	0,04 ms
Funcionamiento Teleprotección	

## ii. Escenario II. DWDM-OTN con asimetría

En este escenario nos encontramos que, al incluir la bobina de lanzamiento en uno de los sentidos del enlace, las teleprotecciones percibían esa asimetría en la transmisión que provocaba la pérdida de la sincronización de los elementos y el fallo del sistema.

DWDM Fabricante 1 Línea de 46 km Asimetría sin tipificar	
Latencia	5,8 ms
Jitter	0,035 ms
Funcionamiento Teleprotección	

Seguidamente, haciendo uso de los mecanismos internos de las teleprotecciones, hemos podido tipificar esa asimetría evaluando el retardo que añadía en uno de los sentidos de la transmisión (1,1 ms) y se ha configurado el buffer interno de los sistemas de teleprotección de manera que solvente esta asimetría. Tras esto, el sistema ha recuperado la sincronización y, con una penalización en la latencia que se mantiene por debajo de los valores recomendados.

DWDM Fabricante 1 Línea de 46 km Asimetría Tipificada	
Latencia	7 ms
Jitter	0,036 ms
Funcionamiento Teleprotección	


### iii. Escenario III. DWDM-OTN con enlaces de larga distancia

DWDM Larga distancia 46km + 95km + 65km	
Latencia	11,1ms 
Jitter	0,07 ms
Funcionamiento Teleprotección	

En este caso encontramos unos valores de latencia menores que los soportados (20ms) pero que exceden la recomendación de trabajo de (10ms). Se ha comprobado que con estos valores de latencia la teleprotección funciona correctamente.

### iv. Escenario IV. IP-MPLS con conexión directa

MPLS Conexión directa	
Latencia	4,1 ms



Jitter	0,04 ms
Funcionamiento Teleprotección	

#### v. Escenario V. IP-MPLS a través de DWDM

MPLS a través DWDM Línea 46 km	
Latencia	10.2 ms 
Jitter	0,06 ms
Funcionamiento Teleprotección	



En este caso encontramos unos valores de latencia menores que los soportados (20ms) pero que exceden la recomendación de trabajo de (10ms). Se ha comprobado que con estos valores de latencia la teleprotección funciona correctamente.

#### vi. Escenario VI. IP-MPLS en red real con alteraciones

MPLS Red Real Camino Principal (Partimos de Escenario V)	
Latencia	10.2 ms 
Jitter	0,06 ms
Funcionamiento Teleprotección	

En este momento realizamos un corte en la línea directa, forzando al servicio a que active la búsqueda de una alternativa para alcanzar el destino. La ruta alternativa no está previamente definida, sino que únicamente estará predefinido el nodo MPLS de la malla de red del núcleo que será su puerta de enlace. Cuando este nodo recibe el tráfico lo encamina a través de la red mallada hasta el nodo que actúa como puerta de enlace del equipo destino optimizando la ruta y la explotación de la red. Este camino a través de la malla

tampoco está prefijado y dependerá de la situación de red, aunque siempre tratará de optimizar su ruta.

MPLS Red Real Redundancia a través de Core MPLS	
Latencia	19,6 ms 
Jitter	0,09 ms
Funcionamiento Teleprotección	

Se ha comprobado que esta situación no es válida para el funcionamiento de la protección diferencial puesto que los valores de latencia están al límite y dependiendo de la situación particular de cada servicio de la red real, se darán casos que sobrepase la latencia crítica. Adicionalmente, se ha mantenido este servicio durante 7 días para evaluar su comportamiento en una prueba de larga duración y hemos comprobado que:

- Alteraciones en la red de core MPLS han provocado variaciones en el camino del servicio, empeorando aún más los parámetros de latencia.
- Ha tenido pérdidas de sincronización de manera recurrente que bloqueaban el servicio.
- La carencia de calidad en la comunicación ha provocado que el sistema reporte ciertas alarmas avisando de posibles fallos que eran falsas.

## vii. Conclusiones a pruebas realizadas











Analizando los resultados obtenidos en los diferentes escenarios, podemos realizar una valoración de los experimentos y aportar unos argumentos empíricos para validar las tecnologías objetivo.

Primeramente, hemos observado que la red DWDM cumple completamente con los requerimientos limitantes, obteniendo unos valores en estos parámetros con margen suficiente a los críticos. Comprobamos que hemos tenido que utilizar un servicio con largas distancias y paso por varios nodos DWDM para llegar a unos valores no recomendados,

circuito que excede el escenario habitual para las protecciones diferenciales. Con relación a la asimetría de carácter estable, también se ha validado que se puede tipificar esa diferencia en ambos sentidos y corregir en la teleprotección por medio del buffer del sistema.

Respecto a la tecnología IP-MPLS, se ha validado su correcto funcionamiento tecnológico en situaciones estables y de conexión por fibra directa o a través de DWDM. Por otro lado, el resultado no ha sido satisfactorio en un escenario con el sistema de protección activo a través del núcleo de la red al no tener un retardo tipificado. Estas carencias en la fiabilidad y seguridad del sistema provocan que para validar el uso de esta tecnología se deba particularizar este servicio en líneas de comunicación directa.

En la siguiente tabla podemos ver recopilados los resultados obtenidos en los diferentes escenarios para poder realizar una comparación:

Análisis Escenarios				
Escenario	Adicional	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Funcionamiento Teleprotección
I. DWDM - OTN	Fabricante 1 46km	5,8	0,035	
	Fabricante 1 96km	6,3	0,038	
	Fabricante 2 46km	4,4	0,04	
	Fabricante 2 96km	4,9	0,04	
II. DWDM - OTN con Asimetría	Inicial	5,8	0,035	
	Tras Tipificar	7	0,036	
III. DWDM - OTN Larga Distancia	-	11,1	0,07	
IV. IP-MPLS	Línea 1km	4,1	0,04	
V. IP-MPLS a través DWDM	Línea 46km	10,2	0,06	
VI. Red Real	Tras Corte y Paso por red de Core	19,6	0,09	

*Tabla 3 . Tabla de recopilación de los resultados obtenidos*

Gracias a esta comparación de resultados, podemos comentar ciertos aspectos que sería recomendable tener en cuenta. Respecto a los resultados obtenidos en la red MPLS, viene a lugar comentar que pese a partir de una tecnología de carácter no determinista, los resultados obtenidos son muy similares a DWDM y es porque, como podemos ver en la topología de los escenarios de prueba, estamos realizando una conexión directa entre equipos MPLS sin hacer un uso real de la red mallada. De hecho, en el momento en que se realiza un corte sobre el enlace directo y el servicio es reconducido por la red mallada, entramos en terreno no determinista que provoca que no podamos asegurar la viabilidad del servicio.

Por otro lado, consideramos necesario comparar el escenario III-DWDM de Larga Distancia y el escenario V-IP-MPLS a través de DWDM. Ambos escenarios tienen unos valores muy similares, siendo incluso algo mejores los del segundo escenario. Esto se debe a que, en el primer caso, hemos planteado un camino por DWDM de manera que estrese la señal a través de varios saltos de línea además de un paso a eléctrico para interconectar las redes de los distintos fabricantes. Este último paso a eléctrico nos va a añadir una penalización de retardo puesto que en el procesamiento de óptico a eléctrico es un paso donde mayor afectación sufre la señal. En comparación, el escenario V únicamente tiene un salto a nivel DWDM y la similitud en los valores de retardo se debe al paso entre ambas redes, al concatenar MPLS y DWDM.

## 4. Conclusiones y trabajos futuros

Una vez finalizada la fase de experimentación y analizados los resultados obtenidos, podemos realizar una valoración general del trabajo, de la dinámica y problemática encontrada en el desarrollo del mismo, así como unas conclusiones y futuras metas que se pueden marcar en relación con la materia.

El desarrollo del trabajo ha sido orientado hacia la consecución de los objetivos marcados previamente, consiguiendo de manera exitosa el cumplimiento de los mismos. Recordamos que los tres objetivos principales del trabajo son: la recopilación de las limitaciones de los servicios de teleprotección, el análisis tecnológico del mercado en cuanto a redes de transmisión actuales y la propuesta de solución y experimentación sobre la tecnología o tecnologías elegidas.

Para conocer el contexto y las necesidades tecnológicas de la solución se han estudiado los parámetros limitantes del servicio para posteriormente evaluar el uso de diferentes tecnologías de transmisión, consiguiendo de forma exitosa un análisis de las necesidades focalizando en las limitaciones en cuanto a latencia, jitter y asimetría. Hemos definido una tolerancia límite respecto a la latencia de 20ms, acompañada de una recomendación de actuación por debajo de 10ms. También se ha estudiado el jitter y la asimetría, con unos requerimientos igualmente muy restrictivos, pero con la posibilidad de utilizar un buffer en recepción para poder tipificar estos valores y trabajar sobre ellos. En base a estos criterios definidos se ha podido valorar cada tecnología y seleccionar las que coinciden en mayor medida con los objetivos de la compañía. En nuestro caso, se ha decidido utilizar DWDM-OTN e IP-MPLS puesto que tenían una mejor valoración en la evaluación realizada de las tecnologías disponibles ya que se ha priorizado que la tecnología, cumpliendo los requisitos de parámetros de la señal, tengan una alta adaptación a la red actual y una buena madurez de mercado para su instalación. Finalmente, se ha realizado una batería de pruebas en laboratorio que nos han ofrecido una visión del comportamiento de los servicios de teleprotección bajo estas condiciones, permitiéndonos validar la posibilidad de usarlas en la red real.

Particularizando en las tecnologías escogidas para realizar la valoración, entendemos que estos resultados cumplen en parte con la expectativa, ya que la hipótesis era que DWDM iba a soportar y cubrir las necesidades de los servicios de teleprotección debido a sus características de carácter determinista y en MPLS considerábamos un riesgo el multicamino dinámico, tal y como hemos visto que ocurre en el momento de actuar la protección. Se puede decir que la solución queda validada experimentalmente en redes DWDM y que para su explotación en redes IP-MPLS se debe evitar el multicamino dinámico. Para evitar el multicamino dinámico podríamos optar por alterar la configuración actual para forzar un camino único y determinista en este tipo de servicios, definiendo además del destino, los saltos intermedios y forzando la dirección que debe seguir en cada caso. Esto supondría una particularización de configuración para este tipo de servicios y no mantener la filosofía de red actual. Además, de cara a la operación y el mantenimiento de la red, aumentará la complejidad de la misma reduciendo el margen de automatización y similitud en las configuraciones.

Siempre orientados a la consecución de los objetivos marcados, se ha podido seguir la planificación marcada, cumpliendo los hitos clave y ajustándose a los entregables en cada fase. Gracias al trabajo previo y la sólida base creada en las primeras fases del trabajo, así como la metodología marcada centrada en un detallado análisis tecnológico de las necesidades que nos han permitido la valoración de diferentes soluciones disponibles, hemos logrado orientar este trabajo de forma práctica y manteniendo un correcto ritmo de trabajo.

El cambio más importante realizado durante la ejecución del trabajo ha sido el pivotar de un planteamiento concreto sobre una tecnología definida a un análisis general de las posibilidades del mercado que nos ha permitido conocer el estado tecnológico de las redes de transmisión en un contexto de utility eléctrica, elegir las opciones adecuadas para la valoración actual, así como marcarnos los siguientes retos que podremos afrontar.

Respecto a la evaluación del impacto en sostenibilidad comentado en la introducción del trabajo, podemos afirmar que se consigue la reducción de equipos de transmisión en funcionamiento, aunando en un mismo equipamiento el mayor número de servicios posibles. Esto reduce el consumo en la instalación y genera un mayor aprovechamiento de recursos.



Gracias a la valoración tecnológica del mercado realizada y tras los resultados obtenidos en las pruebas con tecnología DWDM e IP-MPLS, podemos definir una serie de pasos a seguir para continuar con la investigación realizada, así como la definición de nuevos objetivos y líneas de trabajo futuras. Primeramente y dado el resultado global del uso de servicios de teleprotección en la red IP-MPLS, se puede continuar valorando una serie de alternativas de configuración para aprovechar la red actual. Además, tal y cómo se ha visto en otros estudios relacionados, se puede valorar añadir equipamiento adicional para mejorar el comportamiento sobre esta red por medio de relojes GPS externos que facilitarán la sincronización [5] o solución específica de fabricante para estos servicios [6]. Otra alternativa será el trabajo conjunto de redes TSN y MPLS donde se debe estudiar si la configuración de los servicios bajo el estándar de estas redes orientadas a servicios ethernet prioritarios posibilita que la red MPLS actúe de manera transparente sobre las teleprotecciones. Por último, es interesante comentar la posibilidad que nos abre la explotación de redes 5G orientados a estos servicios de teleprotección, ya que las Utility tienen como objetivo la implantación de redes 5G para su propio uso debido a los múltiples beneficios que ofrece en el entorno OT. En este caso, una vez implantado el núcleo e infraestructura de la red 5G, nos ofrecerá una alta flexibilidad para servicios de teleprotección, no tanto en emplazamientos propios con una inversión en red fija realizada sino en localizaciones alternativas sin estos recursos disponibles.

## 5. Glosario

### Términos

- Industria 4.0: Cuarta revolución industrial basada en la transformación digital aprovechando el desarrollo de tecnologías como la computación, el software, la hiperconectividad, el aprendizaje automático o la automatización.
- Protecciones Diferenciales: Equipos de protección situados a ambos extremos de una línea eléctrica que detectan alteraciones en la corriente y garantizan un aislamiento rápido y selectivo de averías en la red eléctrica.
- Smart Grid: Red eléctrica inteligente, sostenible, segura y eficiente.
- Subestación Eléctrica: Instalación eléctrica encargada de la transformación de Alta Tensión (1kV-400kV, destinada al transporte) a Media Tensión (1kV-36kV, destinada a la distribución) y viceversa.

### Abreviaturas

- DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación Densa por Longitud de Onda
- IoT: Internet of Things, Internet de las Cosas
- MPLS: MultiProtocol Label Switching, Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo
- OTN: Optical Transport Network, Redes de Transporte Óptico
- PDH: Plesynchronous Digital Hierarchy, Redes de Jerarquía Plesiócrona
- PLC: Power Line Communication.
- QoS: Quality of Service, Calidad de Servicio
- SDH: Synchronous Digital Hierarchy, Redes de Jerarquía Síncrona
- TSN: Time-Sensitive Networking.

## 6. Bibliografía

1. "IEEE Standard for N Times 64 Kilobit Per Second Optical Fiber Interfaces Between Teleprotection and Multiplexer Equipment," in IEEE Std C37.94-2002 , vol., no., pp.1-20, 31 March 2003, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94245.
2. "IEEE Approved Draft Guide for Power System Protective Relay Applications over Digital Communication Channels," in IEEE PC37.236/D5.1, December 2012 , vol., no., pp.1-96, 7 March 2013.
3. Agrawal, G. P. (Govind P. ). (2008). *Fiber-optic communication systems* (4th ed.) [Book]. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470918524>
4. Rahman, T., Moralez, J., Ward, S., Udren, E. A., Bryson, M., & Garg, K. (2018). Teleprotection with MPLS ethernet communications - Development and testing of practical installations. 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2018, 2018-January, 1–18. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2018.8349828>
5. Shahi, M., Tuazon, P., Sinclair, M., & Chhetri, S. G. (2022) Teleprotection signal testing over IP/MPLS network. – CIGRE, 10589-D2/PS1
6. Blair, S. M., Booth, C. D., de Valck, B., Verhulst, D., Kirasack, C., Wong, K. Y., & Lakshminarayanan, S. (2016) *Validating Secure and Reliable IP/MPLS Communications for Current Differential Protection*.
7. Ghanem, K., Ugwuanyi, S., Asif, R. & Irvine, J. (2021). Challenges and Promises of 5G for Smart Grid Teleprotection Applications. 2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). <https://doi.org/10.1109/isncc52172.2021.9615649>
8. R. Salazar; T. Godfrey; N. Finn; C. Powell; B. Rolfe; M. Seewald, "Utility Applications of Time Sensitive Networking White Paper," in Utility Applications of Time Sensitive Networking White Paper , vol., no., pp.1-19, 16 Oct. 2019.
9. "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," in IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002) , vol., no., pp.1-269, 24 July 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4579760.
10. T. Docquier, Y. -Q. Song, V. Chevrier, L. Pontnau and A. Ahmed-Nacer, "IEC 61850 over TSN: traffic mapping and delay analysis of GOOSE traffic," 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2020, pp. 246-253, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212159.
11. L. Muguira, J. Lázaro, S. Alonso, A. Astarloa and M. Rodriguez, "Secure Critical Traffic of the Electric Sector over Time-Sensitive Networking," 2020 XXXV Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/DCIS51330.2020.9268613.
12. Serra, M., Castro, F. (2007) "Using IEC 61850 for Teleprotection". CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution- Paper 0147
13. "ISO/IEC/IEEE International Standard - Telecommunications and information exchange between information technology systems - Requirements for local and metropolitan area networks - Part 1CM: Time-sensitive networking for fronthaul," in ISO/IEC/IEEE 8802-1CM:2019(E) , vol., no., pp.1-66, 23 Aug. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8811785.

14. Recomendación UIT-R M.2150-1 (02/2022). Especificaciones detalladas de las interfaces radiolétricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2020 (IMt-2020). Especificación de la tecnología de la interfaz radiolétrica 3GPP 5G – SRIT
15. WDM/OTN latency Huawei. Available at: [https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43\\_latency.html](https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43_latency.html) (Accessed: November 29, 2022).
16. Recomendación UIT-T G.1028.1(06/2019). Calidad de servicio de extremo a extremo para servicios de videotelefonía en redes móviles 4G
17. Valiant Communications – VCL-TP Teleprotection IEC-61850 GOOSE over IP/MPLS. Valiant Communications (UK) – Rev. 2.3, March 25, 2022
18. Adewale, Adeyinka. (2016). A Comparative Simulation Study of IP, MPLS, MPLS-TE for Latency and Packet loss Reduction over a WAN. International Journal of Networks and Communications. Vol. 6. pp. 1-7. 10.5923/j.ijnc.20160601.01.

## 7. Anexos

N/A