

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Diseño e implementación de una red troncal de multiplexores de  
un sistema de telecomunicaciones para una empresa del sector  
eléctrico en el Centro del Perú**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones

Elaborado por

Jhonel Pari Castro

 [0009-0003-5113-2652](https://orcid.org/0009-0003-5113-2652)

Asesor

MSc. Ing. Marcial Antonio López Tafur

 [0000-0002-9818-5730](https://orcid.org/0000-0002-9818-5730)

Lima – Perú

2024

Citar/How to cite	Pari Castro [1]
Referencia/Reference	[1] J. Pari Castro, “ <i>Diseño e implementación de una red troncal de multiplexores de un sistema de telecomunicaciones para una empresa del sector eléctrico en el Centro del Perú</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Pari, 2024)
Referencia/Reference	Pari, J. (2024). <i>Diseño e implementación de una red troncal de multiplexores de un sistema de telecomunicaciones para una empresa del sector eléctrico en el Centro del Perú</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

### ***Dedicatoria***

*A toda mi familia, en especial a mis padres Juan Pari y Aquilina Castro, por sus consejos que me ayudan a seguir adelante en mi vida personal y profesional, a mi hijo Piero, por ser mi luz y esa fuerza que necesito en mi vida para proponerme metas y cumplirlos.*

## Resumen

El transporte de comunicaciones de misión crítica es importante en empresas eléctricas para proteger sus líneas de alta tensión (138kV, 220kV, 500kV), vía equipos de protección y relés. Esta red de transporte de comunicaciones debe cumplir protocolos para la intercomunicación de equipos de protección, garantizar la comunicación de protocolos de monitoreo y/o supervisión de sistemas de control, además deben ser altamente disponibles desde subestaciones eléctricas hacia el sistema SCADA. Este trabajo explica el diseño de una red troncal de equipos multiplexores, considerando equipos nuevos y existentes, y su implementación en cinco ciudades del Centro del Perú para una empresa eléctrica, que implica brindar comunicación entre sus sistemas de protecciones de línea, transportar señales como los protocolos IEC 101 e IEC 104 (protocolos de monitorización de sistemas de energía y sistemas de control, IEC 101 para transmisión serial asíncrono e IEC 104 para transmisión *Ethernet*) hacia el sistema SCADA en los 2 centros de control ubicados en Lima y brindar un canal para transportar la red corporativa (internet) a todas sus subestaciones eléctricas. Los nuevos multiplexores reemplazarán a equipos existentes de una empresa tercera y así poder tener una red totalmente independiente. El diseño tendrá como resultado tener un sistema de gestión centralizado de los multiplexores y una arquitectura que presente una alta disponibilidad, el cual se necesita en las comunicaciones de misión crítica y señales de supervisión de sistemas de control.

Palabras clave – Fibra óptica, red troncal, multiplexores, telecomunicaciones.

## **Abstract**

The transport of mission-critical communications is important in electrical companies to protect their high voltage lines (138kV, 220kV, 500kV) via protection equipment and relays. This communications transport network must comply with protocols for the intercommunication of protection equipment, guarantee the communication of monitoring and/or supervision protocols of control systems, and must also be highly available from electrical substations to the SCADA system. This work explains the design of a backbone network of multiplexing equipment, considering new and existing equipment, and its implementation in five cities in Central Peru for an electrical company, which involves providing communication between its line protection systems, transporting signals such as IEC 101 and IEC 104 protocols (monitoring protocols for power systems and control systems, IEC 101 for asynchronous serial transmission and IEC 104 for Ethernet transmission) to the SCADA system in the 2 control centers located in Lima and provide a channel for transport the corporate network (internet) to all its electrical substations. The new multiplexers will replace existing equipment from a third-party company and thus be able to have a completely independent network. The design will result in a centralized multiplexer management system and an architecture that features high availability, which is needed for mission-critical communications and control system monitoring signals.

**Keywords:** Fiber Optic, Backbone Network, Multiplexers, Telecommunications.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.1.1 Situación problemática .....	1
1.1.2 Problema a resolver .....	3
1.2 Objetivos del estudio .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Alcances del trabajo .....	4
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	6
2.1 Marco teórico .....	6
2.1.1 Sistemas de protección para líneas de alta tensión.....	6
2.1.2 Equipos terminales concentradores de información .....	8
2.1.3 Redes digitales PDH y SDH .....	9
2.1.4 Equipo multiplexor y tarjetas de servicio.....	11
2.1.5 Sistema de comunicaciones por fibra óptica.....	20
2.1.6 Sincronismo de una red digital TDM.....	24
2.1.7 Transporte de tráfico <i>Ethernet</i> sobre una red SDH y VLAN.....	26
2.1.8 Transporte de tráfico TDM sobre una red <i>Ethernet</i> .....	30
2.1.9 Protocolo para aplicar redundancia en la red de transporte.....	31
2.1.10 Gestión de multiplexores usando la red TDM.....	33
2.2 Marco conceptual .....	35
2.2.1 Relé de protección .....	35
2.2.2 Equipo de teleprotección .....	36

2.2.3 Multiplexor.....	37
2.2.4 GPS .....	37
2.2.5 Amplificador óptico .....	37
2.2.6 PDH .....	38
2.2.7 SDH .....	40
2.2.8 GFP ( <i>Generic Framing Procedure</i> ).....	43
2.2.9 VLAN.....	44
2.2.10 Protocolo Q-in-Q.....	45
2.2.11 Protocolo <i>Spanning Tree</i> .....	46
2.2.12 Sistema SCADA.....	47
2.2.13 Pseudowire.....	48
2.2.14 Protocolo SAToP.....	48
2.2.15 Protocolo CESoPSN.....	49
2.2.16 Fibra óptica.....	50
2.2.17 Interfaz RS-232.....	53
2.2.18 Interfaz X.21.....	54
2.2.19 Interfaz G.703.....	54
2.2.20 Interfaz G.703 codireccional.....	54
2.2.21 Protocolo IEC 101.....	55
2.2.22 Protocolo IEC 104.....	55
2.2.23 Interfaz IEEE C.37.94.....	55
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....	56
3.1 Diseño de la red troncal de multiplexores y sus servicios .....	56
3.1.1 Diseño del canal de comunicación para las señales del protocolo IEC 101 y protocolo IEC 104 hacia los 2 centros de control.....	63
3.1.2 Diseño del canal de comunicación para los servicios de teleprotección y protección diferencial de línea .....	66
3.1.3 Diseño del canal de comunicación para la red corporativa .....	70

3.1.4 Diseño de la arquitectura de sincronismo .....	71
3.1.5 Diseño del canal de comunicación para la gestión de multiplexores.....	72
3.1.6 Diseño y propuesta para el uso del canal Ethernet existente como ruta de respaldo para señales IEC 101 .....	73
3.2 Implementación en el proyecto.....	75
3.2.1 Implementación de tarjetas en el multiplexor .....	79
3.2.2 Energización y ventilación de multiplexor .....	80
3.2.3 Implementación en los centros de control .....	81
3.2.4 Implementación de servicios en las subestaciones eléctricas .....	84
3.2.5 Implementación del amplificador óptico .....	85
3.2.6 Implementación del canal redundante para el servicio IEC 101.....	86
3.2.7 Procedimiento de migración de servicios .....	87
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	88
4.1 Cálculo de los costos de equipos de telecomunicaciones .....	88
4.2 Cálculo de los costos de servicio del proyecto .....	91
4.3 Cronograma del proyecto .....	92
Conclusiones.....	94
Recomendaciones.....	95
Referencias bibliográficas .....	96
Anexos .....	99



## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Niveles de Jerarquía PDH según ubicación geográfica.....	38
Tabla 2: Modos de trama E1.....	40
Tabla 3: Tipos de contenedores virtuales y capacidad.....	42
Tabla 4: Tasa de bits en la jerarquía SDH. ....	42
Tabla 5: Ubicación y estado de multiplexores. ....	76
Tabla 6: Relación de multiplexores y protocolos IEC 101 – IEC 104.....	78
Tabla 7: Relación entre multiplexor y tasa de bits de RTU.....	79
Tabla 8: Funcionalidad de tarjetas. ....	80
Tabla 9: Direcciones IP Loopback.....	83
Tabla 10: VLAN de servicios IEC 104. ....	84
Tabla 11: Cantidad de multiplexores y tarjetas.....	88
Tabla 12: Cantidad de SFP por enlace. ....	89
Tabla 13: Cantidad total de SFP. ....	89
Tabla 14: Costo total de equipamiento de telecomunicaciones.....	90
Tabla 15: Costo de suministros de implementación. ....	91
Tabla 16: Costo de servicios del Proyecto. ....	91
Tabla 17: Costo total del Proyecto. ....	92

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Canales principal y respaldo de señales de protección.....	3
Figura 2: Esquema general de un sistema de distribución de energía eléctrica. ....	6
Figura 3: Canales de comunicación para un sistema de protección eléctrica.....	8
Figura 4: Equipo RTU. ....	9
Figura 5: Trama para flujo de datos 2,048kbps. ....	10
Figura 6: Proceso de multiplexación por división de Tiempo.....	10
Figura 7: Multiplexor FOX615. ....	12
Figura 8: Slots o ranuras del multiplexor.....	12
Figura 9: Tarjeta controladora CESM3.....	13
Figura 10: Tarjeta de transporte SAMO2. ....	14
Figura 11: Tarjeta de servicio LEDS1. ....	15
Figura 12: Tarjeta de servicio LECO1. ....	16
Figura 13: Tarjeta de servicio LEDE1. ....	17
Figura 14: Tarjeta de servicio OPIC2. ....	18
Figura 15: Tarjeta de servicio ELET1.....	19
Figura 16: Tarjeta de servicio CEPI1. ....	20
Figura 17: Esquema general de interconexión de multiplexores por fibra óptica.....	21
Figura 18: SFP-SDH de 2 hilos.....	22
Figura 19: Amplificador óptico.....	22
Figura 20: Diagrama de bloques de amplificador óptico.....	23
Figura 21: Tipos de conectores de cables de fibra óptica. ....	23
Figura 22: Tipos de pulidos en cables de fibra óptica.....	24
Figura 23: Esquema de sincronismo en multiplexor. ....	26
Figura 24: Sincronizador externo GPS.....	26
Figura 25: Canales EoS de multiplexor.....	27
Figura 26: Ethernet sobre SDH.....	27

Figura 27: Modos de puerto para tráfico ethernet. ....	29
Figura 28: Puerto general. ....	30
Figura 29: Transporte de señales TDM sobre una red de paquetes.....	31
Figura 30: <i>Spanning Tree Protocol</i> para una red de multiplexores.....	32
Figura 31: Protección de canales SDH. ....	33
Figura 32: Red de gestión de multiplexores. ....	34
Figura 33: Relé de Protección.....	36
Figura 34: Equipo de teleprotección.....	37
Figura 35: Estructura de trama E1. ....	39
Figura 36: Esquema modos de Trama E1.....	39
Figura 37: Estructura de multiplexación. ....	41
Figura 38: Estructura básica de la trama STM-N. ....	41
Figura 39: Sección de cabecera SOH STM-1. ....	43
Figura 40: Estructura de trama GFP. ....	44
Figura 41: Red implementada con VLAN. ....	44
Figura 42: Protocolo 802.1Q en la trama Ethernet. ....	45
Figura 43: Topología básica de implementación Q-in-Q. ....	46
Figura 44: Esquema de funcionamiento STP.....	47
Figura 45: Funcionamiento de <i>Pseudowire</i> . ....	48
Figura 46: Formato de encapsulación de un paquete SAToP. ....	49
Figura 47: Formato de encapsulación de un paquete CESoPSN. ....	50
Figura 48: Estructura de fibra óptica. ....	50
Figura 49: Modos de propagación sobre la fibra óptica.....	51
Figura 50: Pérdida por absorción de la fibra óptica. ....	52
Figura 51: Pérdida por dispersión de <i>Rayleigh</i> en función de la longitud de onda.....	53
Figura 52: Interfaz G.703 codireccional.....	54
Figura 53: Interfaz G.703 contradiereccional. ....	55
Figura 54: Diagrama de bloques sintetizado de la red de multiplexores.....	58

Figura 55: Numeración KLM en SDH.....	59
Figura 56: Niveles de capacidad de enlace en el enlace SDH. ....	60
Figura 57: Procedimiento de entramado para un servicio PDH.....	61
Figura 58: Procedimiento de entramado para un servicio ethernet. ....	61
Figura 59: Conexionado entre tarjetas de transporte SAMO2.....	62
Figura 60: Interconexión entre tarjeta la LEDS1 y RTU.....	63
Figura 61: Canalización y rutas redundantes del servicio IEC 101.....	64
Figura 62: Interconexión entre tarjeta ELET1 y router operativo IEC 104.....	65
Figura 63: Canalización del servicio IEC 104.....	66
Figura 64: Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LEDS1.....	67
Figura 65: Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LEDE1.....	68
Figura 66: Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LECO1.....	68
Figura 67: Interconexión entre Relé y tarjeta OPIC2.....	69
Figura 68: Canalización principal y respaldo de servicios de protecciones. ....	70
Figura 69: Diagrama de red corporativa.....	71
Figura 70: Diagrama de sincronismo de multiplexores.....	72
Figura 71: Diagrama de gestión de multiplexores. ....	73
Figura 72: Diagrama de redundancia del servicio IEC 101 por la red Ethernet. ....	74
Figura 73: Diagrama de transporte del servicio TDM sobre la red Ethernet. ....	75
Figura 74: Arquitectura general de multiplexores.....	77
Figura 75: Distribución de tarjetas en multiplexor.....	79
Figura 76: Módulo de ventilación FAMO1.....	80
Figura 77: Módulo de energía dual DUPF1.....	81
Figura 78: Implementación en centro de control. ....	82
Figura 79: Arquitectura general de servicios en una subestación eléctrica. ....	85
Figura 80: Migración de multiplexor. ....	87
Figura 81: Diagrama de <i>Gantt</i> del proyecto. ....	93

## Introducción

La empresa eléctrica decidió adquirir equipos multiplexores para implementarlos en sus subestaciones que abarcan cinco ciudades en el Centro del Perú y poder integrarlos a su sistema de telecomunicaciones existente. En este proceso, se realiza el planteamiento de la migración de servicios, debido a que existe tráfico de datos de internet y señales de misión crítica que transporta el multiplexor existente, tales como protocolos de monitorización de sistemas de energía IEC 101, IEC 104 (estas 2 señales son provenientes de las subestaciones eléctricas que convergen hacia los 2 centros de control ubicados en Lima) y señales de relés para la protección de las líneas de alta tensión. Con lo mencionado anteriormente, el multiplexor debe proporcionar interfaces de datos seriales (X.21, RS232, G.703 codireccional), interfaces para transmisión de protocolos entre relés y multiplexores, interfaces Ethernet y puertos SFP para comunicación entre multiplexores usando la fibra óptica como medio.

El diseño de red para multiplexores utiliza la tecnología SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) para mantener la operatividad de los servicios; sin embargo, esta infraestructura de multiplexores propuesta está preparada para la migración a una red MPLS.

En el capítulo 1, Parte introductoria del trabajo, se explican las generalidades del trabajo, la descripción del problema y los objetivos generales y específicos.

En el capítulo 2, Marco teórico y conceptual, incluye los aspectos teóricos a tomar en cuenta en el presente trabajo referente a los sistemas de multiplexores y tecnologías usadas para la solución.

En el capítulo 3, Desarrollo del trabajo de investigación, se expone la aplicación de los protocolos para el sustento de la arquitectura propuesta, se diseña la canalización de datos y se plantea el plan de migración e implementación de los multiplexores.

En el capítulo 4, Análisis y discusión de los resultados, se realiza un análisis de costos que involucra al proyecto, se realiza el diagrama de Gantt y se exponen las conclusiones del presente trabajo de suficiencia profesional.

## **Capítulo I. Parte introductoria del trabajo**

En este capítulo se desarrolla el planteamiento del problema, se definen los objetivos y el alcance del proyecto.

### **1.1 Descripción del problema**

Los problemas que tiene la empresa eléctrica son, por ejemplo, no contar con una red independiente de multiplexores, que pueda llevar todas sus comunicaciones, no poder tener una gestión centralizada para poder monitorear alarmas o realizar configuraciones remotas de estos equipos. Además, las señales de misión crítica no cuentan con rutas redundantes que puedan mantener la continuidad de operaciones de los sistemas de energía y control para las protecciones de las líneas de alta tensión. Por último, la inexistencia de un canal de comunicación adicional para transportar las señales de los relés de protección en subestación donde solo funcionan los equipos de onda portadora.

#### **1.1.1 Situación problemática**

Las líneas de transmisión de alta tensión (superiores a 35kV) transportan potencia desde una estación generadora hacia una estación receptora, por lo cual las empresas eléctricas peruanas se encargan de que esta transferencia se envíe de manera eficiente y económica. Eventualmente, las líneas de alta tensión pueden presentar fallas debido a diversos motivos (descargas atmosféricas, cortocircuitos, sobrecargas, falla humana que ocasionan disparos indeseados, etc.); para ello, las subestaciones eléctricas, correspondientes a una línea de transmisión, cuentan con relés de protección donde su función principal es detectar estas fallas lo más rápido posible y aislar la línea mediante interruptores de potencia, para hacer posible esto, los relés de protección, en cada extremo de la línea, deben estar comunicados por un sistema de telecomunicaciones, con el fin de poder realizar la apertura de dichos interruptores al mismo tiempo ante algún evento de falla. Este sistema de telecomunicaciones debe permitir encaminar las señales de

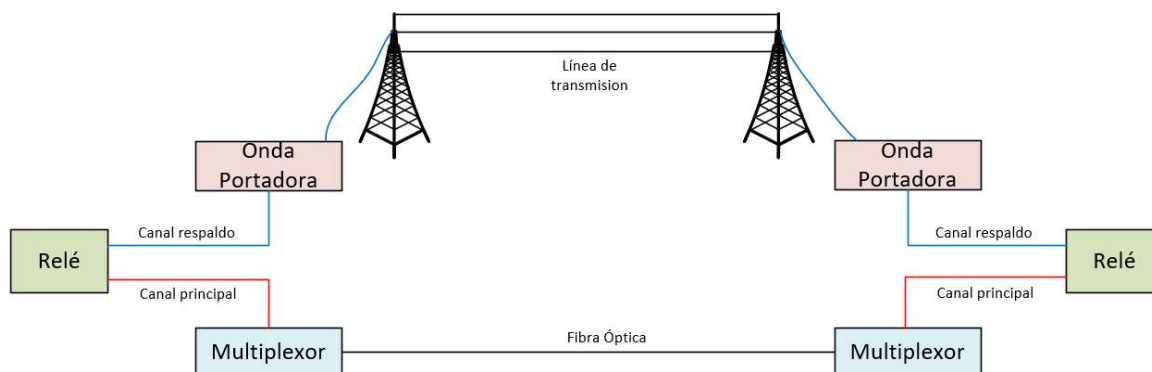
monitorización de sistemas de energía (protocolos IEC 101 / IEC 104) hacia un centro de control y, por último, proporcionar el transporte de una red corporativa (internet). Para lo expuesto anteriormente, el equipamiento que cumple con brindar una comunicación de todos estos servicios son los multiplexores.

La empresa eléctrica, para la cual se desarrolla la solución del proyecto en el Centro del Perú, cuenta en algunas subestaciones con multiplexores de la marca Hitachi y, en otras subestaciones, una empresa tercera le brinda el transporte de sus servicios con otra marca de multiplexores, que genera una red de telecomunicaciones no uniformizada e independiente, no permite integrarlo a un sistema de gestión y poder monitorizar dichos equipos para visualizar alarmas o realizar configuraciones remotas desde un sistema centralizado, no contar con tener una red de transporte que brinde redundancia para sus señales críticas, tales como la transferencia de comandos de relés para comunicaciones de fallas en la líneas de alta tensión y señales de monitorización correspondientes a los protocolos (IEC 101 / IEC 104) hacia sus dos centros de control ubicados en Lima.

Las señales de los relés de protección deben ser transportados por dos medios para tener un medio principal y otro de respaldo. Los equipos que transportan estas señales de protección son los multiplexores, que utilizan la fibra óptica como medio, y la onda portadora o PLC, por sus siglas *Power Line Carrier*, que utiliza la línea eléctrica como medio). Existen subestaciones donde solo funciona la tecnología onda portadora para transportar señales de protección, pero si este medio cae no existe otro medio de respaldo; por ello, se debe habilitar un canal de comunicaciones usando multiplexores por medio de la fibra óptica. En la figura 1 se muestra un sistema de comunicaciones entre los relés, donde el relé puede enviar sus señales de protección por dos medios, línea de transmisión y fibra óptica, y usa los equipos onda portadora y multiplexor. De esta manera, se garantiza la comunicación de los equipos de protección de las líneas de alta tensión.

**Figura 1**

*Canales principal y respaldo de señales de protección.*



### **1.1.2 Problema a resolver**

La gestión no centralizada de multiplexores, la dependencia de equipos de empresas terceras, la inexistencia de otro medio de comunicación para el transporte de las señales entre relés de protección y la arquitectura lineal (inexistencia de rutas de respaldo o redundante) para servicios de señales críticas (señales de protección y monitorización IEC 101 e IEC 104).

## **1.2 Objetivos del estudio**

Los objetivos generales y específicos del trabajo desarrollado son como siguen a continuación.

### **1.2.1 Objetivo general**

Integrar una red de transporte de telecomunicaciones altamente disponible, en cinco ciudades del Centro del Perú, por medio de equipos multiplexores con tecnología SDH enlazados por fibra óptica OPGW (*Optical Ground Wire*), que garanticen el funcionamiento óptimo del transporte de señales críticas basadas en los estándares de comunicación para sistemas eléctricos.



### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para el presente trabajo, se van a diseñar e implementar los siguientes objetivos específicos:

- Una infraestructura funcional y escalable de multiplexores en el Centro del Perú
- Migración de la tecnología *Frame Relay* a SDH para el servicio IEC 101
- Una arquitectura que brinde rutas de respaldo para servicios de protecciones y señales de protocolos IEC 101 e IEC 104
- Una arquitectura de sincronismo, gestión de multiplexores y servicios de red corporativa (internet)
- Implementación e integración de nuevos multiplexores que reemplazan a equipos existentes de una empresa tercera
- Diseño de la canalización de servicios en los multiplexores

### **1.3 Alcances del trabajo**

A continuación, se detallan los alcances del presente trabajo, referente al proyecto de una red de transporte de multiplexores para una empresa eléctrica que comprende las subestaciones eléctricas distribuidas en 5 ciudades del Centro del Perú:

- Análisis de protocolos de comunicación que involucran en el transporte de datos por medio de los multiplexores
- Análisis de servicios de comunicaciones que se requieren en las subestaciones eléctricas
- Análisis del diseño de la red de transporte de multiplexores
- Análisis de las rutas de respaldo o redundantes para señales de misión crítica
- Análisis y descripción de la tarjetería de servicios que requieren los multiplexores
- Validación de canales de servicios de protecciones por medio de equipos certificadores

- Plan de migración de servicios desde el multiplexor de la empresa tercera al nuevo multiplexor adquirida por la empresa eléctrica
- Elaboración de cronograma del proyecto
- Análisis de los costos que involucra el proyecto desarrollado

## Capítulo II. Marco teórico y conceptual

Se describen las bases teóricas para el diseño del trabajo propuesto, por el cual están fundamentados los conceptos para entender los protocolos de comunicaciones para sistemas de energía, protocolos ethernet y equipos necesarios para la implementación.

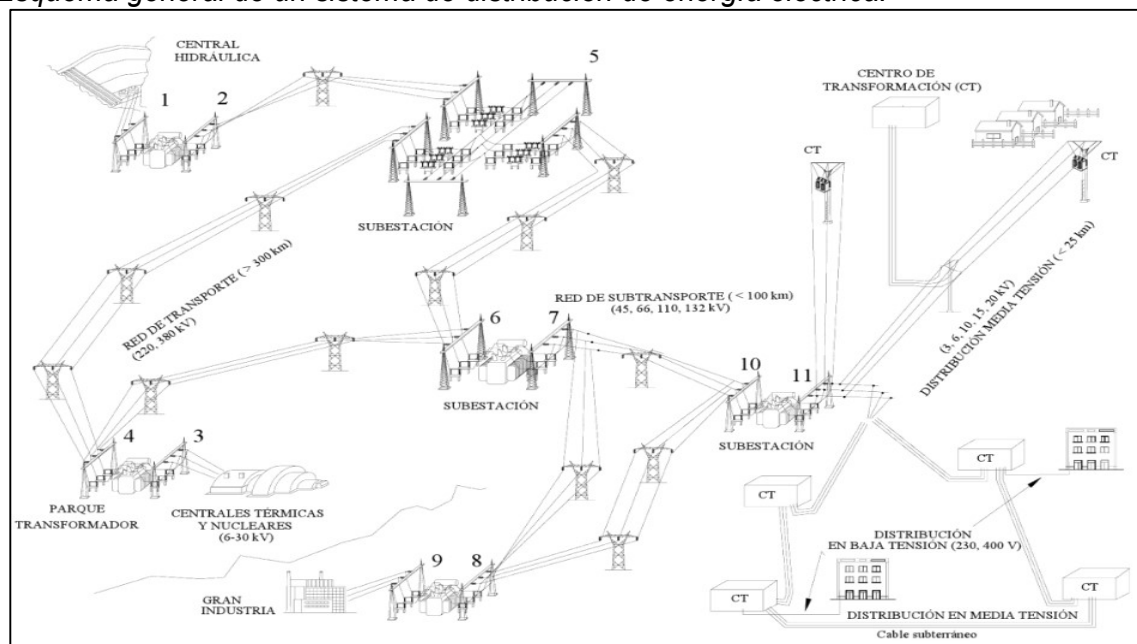
### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Sistemas de protección para líneas de alta tensión

Las subestaciones eléctricas transportan, a través de una central generadora, energía eléctrica a largas distancias hasta los puntos de consumo, llegando a las distintas regiones del Perú tal como muestra la figura 2. Para lograr dicho objetivo, estos niveles de energía transportados deben ser transformados en un alto nivel de tensión, esto con el fin de minimizar el efecto Joule, el cual al elevar el voltaje como consecuencia disminuye la corriente que circula por la línea de transmisión. Las tensiones comunes para transportar la energía eléctrica son 138kV, 220kV y 500kV, para luego llegar a los distribuidores de baja tensión aptos para el consumo.

**Figura 2**

*Esquema general de un sistema de distribución de energía eléctrica.*



*Nota: adaptado de Sistemas de Energía Eléctrica (p.7) por Barrero, 2004, Thomson.*

Según el Código Nacional del Perú, los valores de tensión nominal utilizados en un sistema eléctrico se clasifican de la siguiente manera:

- Baja tensión, para voltajes de hasta 1Kv
- Media tensión, para voltajes superiores a 1Kv y menores a 35Kv
- Alta tensión, para voltajes superiores a 35Kv y menores a 230Kv
- Muy alta tensión, para voltajes superiores a 230Kv

La necesidad de la continuidad operacional de la distribución de la energía eléctrica es importante para brindar un servicio adecuado a la población; sin embargo, es necesario, también, tener la misma importancia en proteger fallas eventuales no planeadas, que pueden ocurrir en las líneas de alta tensión. Por ello, se debe realizar el diseño de un sistema protecciones para poder minimizar dichas fallas, que perjudican el transporte de energía eléctrica.

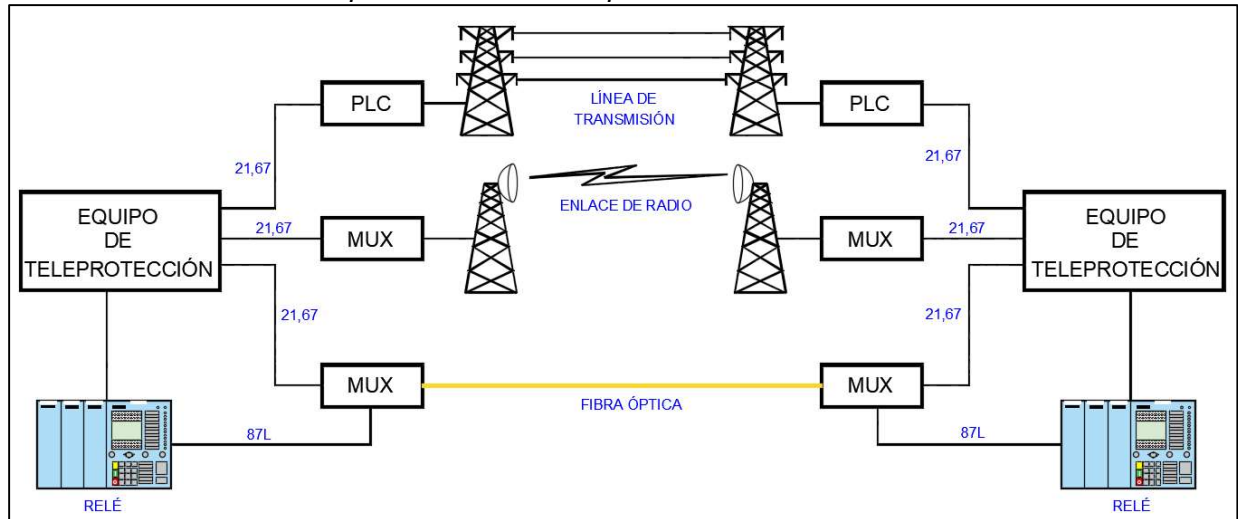
Los relés de protección cumplen la función principal de detectar fallas y/o sobrecargas en el sistema eléctrico, tomando como acción la apertura de un interruptor de potencia, no permitiendo el paso de la corriente eléctrica por la línea de transmisión. Para ello, los relés cuentan con funciones de protección, como de distancia (21 código ANSI), direccional de sobre corriente (67 código ANSI) y protección diferencial de línea (87L código ANSI). Teniendo en cuenta que en el cumplimiento de estas funciones es necesario un canal de comunicación entre los relés para el envío de señales de disparo (señal enviada al otro relé extremo para la apertura del interruptor de potencia), este canal de comunicación puede ser por onda portadora o llamado también PLC, por sus siglas en inglés que significan *Power Line Carrier* (tecnología que permite la transmisión de voz y datos a través de una red eléctrica existente), microondas o fibra óptica. Esta última es la más fiable para enviar señales de disparo ante cualquier condición de falla del sistema.

En la figura 3, se muestra los canales de comunicación para el transporte de señales críticas, donde se visualizan los relés, equipos de teleprotección (conectados a los

relés para enviar comandos de disparo generalmente para las funciones 21 y 67), equipos de onda portadora (PLC) y equipos multiplexores (MUX).

**Figura 3**

*Canales de comunicación para un sistema de protección eléctrica.*



Los multiplexores serán los encargados de transportar estas señales críticas de protección entre relés por medio de la fibra óptica. Es este el camino principal y tiene como camino de respaldo por onda portadora (PLC). Estos multiplexores tienen las interfaces necesarias para transportar dichas señales y las que se requieran enviar según protocolo o servicio.

### **2.1.2 Equipos terminales concentradores de información**

Las subestaciones eléctricas cuentan con un RTU (*Remote Terminal Unit*), el cual es llamado el cerebro de las subestaciones. Por ello, la importancia de mantener comunicación hacia estos equipos. Las RTU son usadas en las subestaciones eléctricas para la supervisión y control de una variedad de equipos, como por ejemplo interruptores, transformadores, generadores y otros dispositivos de protección. Toda esta información de monitorización en tiempo real es enviada a un sistema SCADA ubicado en los centros de control.

Los protocolos usados para la comunicación de RTU pueden ser Modbus, DNP3, IEC 101, IEC 104, etc. Estos dos últimos protocolos mencionados, IEC 101 e IEC 104, utilizan las interfaces RS-232 (estándar para comunicación serial) y Ethernet, respectivamente. En la figura 4, se muestra un equipo RTU usado en las subestaciones eléctricas.

**Figura 4**

*Equipo RTU.*



*Nota:* adaptado de Manual controlador de automatización, SEL, 2008.

### **2.1.3 Redes digitales PDH y SDH**

En primer lugar, se toma el concepto de multiplexación, que se define como la técnica de combinar dos o más señales para transportarlo por un solo medio de transmisión y así, en el extremo remoto, realizar la operación inversa para obtener los datos enviados originalmente.

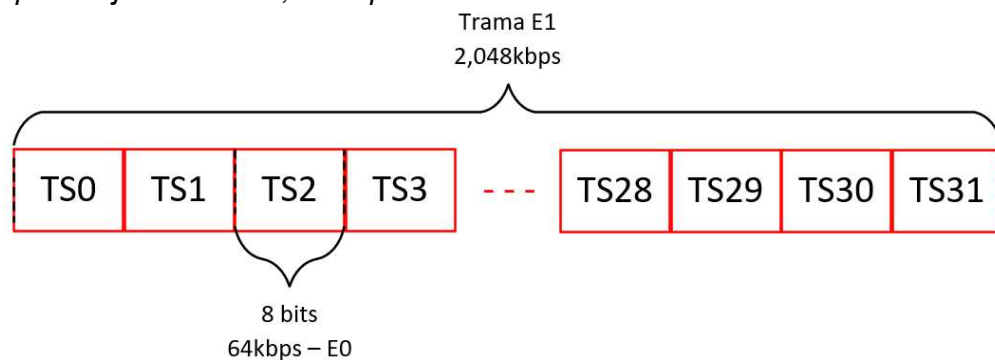
La tecnología PCM (*Pulse Code Modulation*) surge, alrededor del año 1960, por la cual las redes análogas fueron cambiando progresivamente a redes digitales. Las necesidades en comunicaciones tuvieron un crecimiento continuo, requiriendo mayor ancho de banda. Como consecuencia, surge una jerarquía de multiplexación nombrada Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH, *Plesiochronous Digital Hierarchy*).

Plesiócrono significa que los equipos que componen la red PDH están casi sincronizados, la transmisión del flujo de datos funciona a la misma velocidad, pero existe una cierta variación debido a que cada uno trabaja con un reloj independiente. PDH tiene una trama de 32 canales o time slots (TS), dos son para control (TS0 y TS16) y el resto para datos como se muestra en la figura 5. Esta trama o primer nivel jerárquico tiene un

flujo de datos de 2,048 Kbps (llamado E1) y cada canal tiene un flujo de 64 Kbps (llamado E0). Estos conceptos se detallan en la recomendación ITU-T G.704. En la figura 6 se muestra esta jerarquía digital donde se realiza la multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*) donde se canalizan los servicios en *time slots* o en ciertos casos en tramas completas.

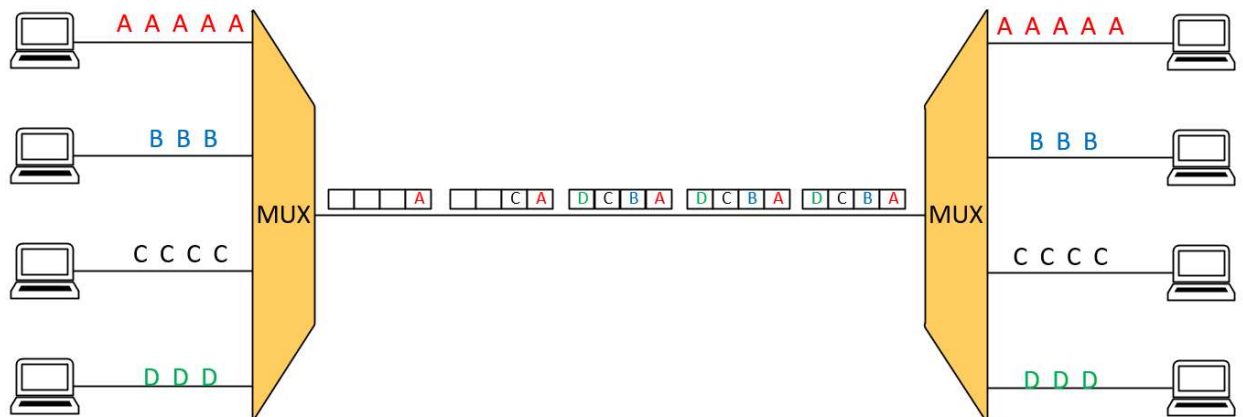
**Figura 5**

*Trama para flujo de datos 2,048kbps.*



**Figura 6**

*Proceso de Multiplexación por división de Tiempo.*



Con la invención de la fibra óptica y la necesidad de transportar flujos superiores a 2,048 Kbps, en el año 1988, se introdujo la red SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) como un estándar global compatible con SONET de ANSI, para solucionar los problemas de PDH con un esquema de sincronismo unificado.

La base de transmisión SDH es el módulo de transporte sincrónico STM-1 (*Synchronous Transport Module*), que tenía un flujo de datos de 155 Mbps y que

transportaba tramas PDH; pero, a diferencia de PDH, esta jerarquía digital se basaba en un sincronizador primario, un reloj que sincroniza a toda la red SDH y soluciona el deslizamiento o variaciones del flujo de datos. Las jerarquías digitales en las redes SDH son múltiplos de STM-1 (155 Mbps), por ejemplo, STM-4 (622 Mbps), STM-16 (2.5 Gbps), STM-64 (10 Gbps) y STM-256 (40 Gbps).

SDH se ideó para brindar una especificación que aproveche al máximo las ventajas que proporciona transmisión digital con el gran ancho de banda que brinda la fibra óptica. Además, pueden ser empleados para encapsular datos provenientes de sistemas PDH o incluso transportar datos Ethernet (EoS, Ethernet over SDH). En las recomendaciones ITU-T G.707, G.708 y G.709 se detalla la forma del armado de las tramas SDH.

#### **2.1.4 Equipo multiplexor y tarjetas de servicio**

Para transportar todos los servicios necesarios, desde una subestación eléctrica, es necesario un equipo multiplexor. Este equipo realiza el método de multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*) para combinar las distintas señales que se requieren transportar. Los multiplexores de la marca Hitachi, tal como se muestra en la figura 7, presentan un diseño modular que consta de tener distintas tarjetas que pueden ser de transporte, controlador (CPU) y de servicio, cada una con interfaces necesarias para cumplir con su función. Estos multiplexores trabajan con la tecnología PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) y SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), las que serán usadas para el diseño de la red de transporte de multiplexores.



**Figura 7**

*Multiplexor FOX615.*



*Nota:* adaptado de *Manual multiplexor FOX615*, Hitachi Energy, 2020

Los multiplexores de la marca Hitachi Energy, modelo FOX615, al ser modulares, presentan 21 ranuras (Slots), tal como se muestra en la figura 8, donde dos de estas son dedicadas para la tarjeta de control (CU, *Control Unit*) y las demás ranuras son para tarjetas de transporte o servicio (SU, *Service Unit*).

**Figura 8**

*Slots o ranuras del multiplexor.*

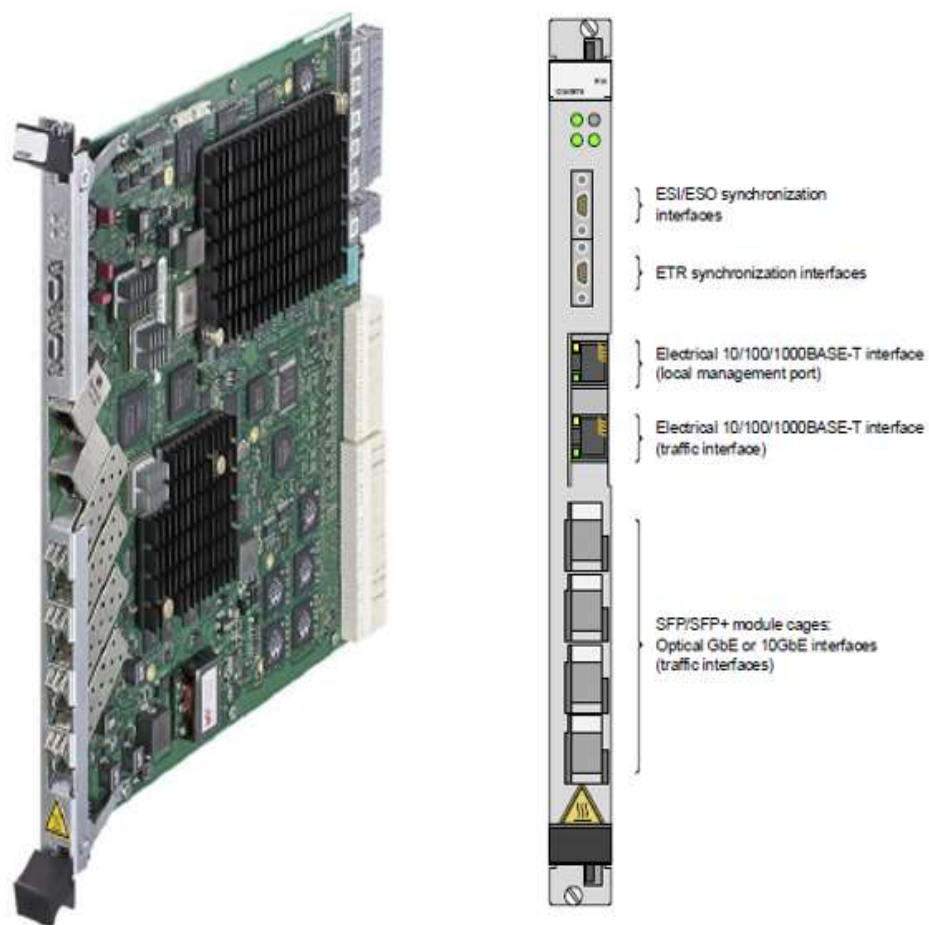
SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	CU	SU	CU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Las tarjetas que se usan para el diseño de la red troncal de multiplexores y poder soportar los servicios necesarios, son los siguientes:

**a. Tarjeta controladora CESM3.** CESM3 es una tarjeta controladora o cerebro del multiplexor (CPU) en el cual realiza la función de la gestión y control de todas las demás tarjetas, almacenamiento de información de configuración, control de funcionamiento del sistema, fuente de sincronización del equipo plesiócrono (PETS) para el bus PDH y ethernet, etc. Además, cuenta con puertos ópticos Ethernet hasta 10 Gbps para la funcionalidad de MPLS-TP. En la figura 9, se muestra a la tarjeta controladora CESM3.

**Figura 9**

*Tarjeta controladora CESM3.*



*Nota:* adaptado de *Manual tarjeta CESM3*, Hitachi Energy, 2020.

**b. Tarjeta de transporte SAMO2.** Esta tarjeta es la encargada de transportar las tramas SDH hacia la red externa u otro multiplexor. Algunas características y funciones se muestran a continuación:

- 2 puertos STM-4/STM-16 de doble velocidad con módulos ópticos
- 2 puertos STM-1/STM-4 de doble velocidad con módulos ópticos

- Encargado de realizar las conexiones cruzadas de servicios a la red PDH y SDH
- 4 puertos ethernet 10/100/1000 BASE-T utilizados para la aplicación Ethernet sobre SDH (EoS, Ethernet over SDH)
- Procedimiento de entramado EoS usando GFP (*Generic Framing Procedure*) según ITU-T G.7041
- Concatenación virtual según ITU-T G.783
- Fuente de temporización de equipos síncronos (SETS) para el bus SDH con oscilador local
- Monitoreo de desempeño según ITU-T G.826

En la Figura 10 se muestra a la tarjeta SAMO2

**Figura 10**

*Tarjeta de transporte SAMO2.*



*Nota:* adaptado de *Manual tarjeta SAMO2*, Hitachi Energy, 2020.

**c. Tarjeta de servicio LEDS1.** Esta tarjeta ofrece 4 interfaces V.24 o RS232, X.24 o X.21, V.35, RS485 (estándares para comunicación serial síncrona o asíncrona) para brindar servicios de teleprotección o envío de datos de protocolo IEC 101, IEC 104. Además, cuenta con un puerto ethernet sobre PDH vía enlace HDLC (*High-Level Data Link Control*). En la figura 11, se muestra a la tarjeta de servicio LEDS1. En la figura 10, se muestra a la tarjeta de servicio LEDS1.

**Figura 11**

*Tarjeta de servicio LEDS1.*



*Nota:* adaptado de *Manual tarjeta LEDS1*, Hitachi Energy, 2020.

**d. Tarjeta de servicio LECO1.** Esta tarjeta ofrece 8 interfaces G.703 codireccionales, para brindar servicios de teleprotección, se usa un solo time slot de 64Kbps para transportar el servicio. El término codireccional describe una interfaz donde la información y su sincronización asociada son transportadas en la misma dirección. En la figura 12, se muestra a la tarjeta de servicio LECO1.

**Figura 12**

*Tarjeta de servicio LECO1.*

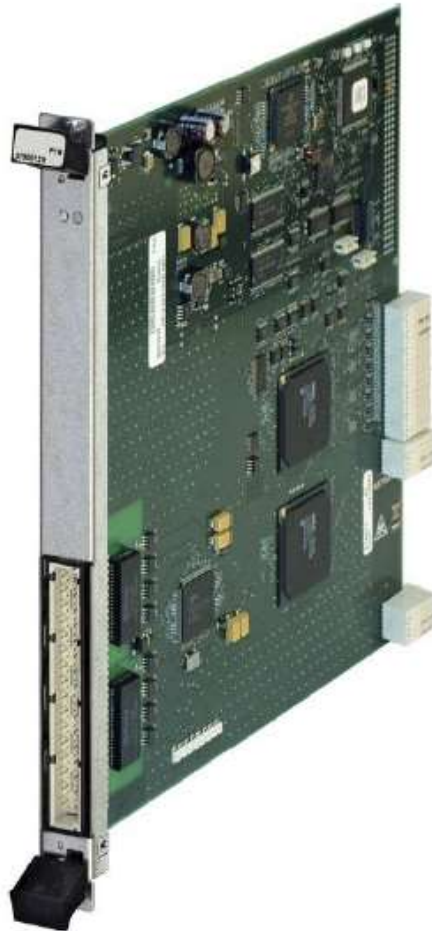


*Nota: adaptado de Manual tarjeta LECO1, Hitachi Energy, 2020.*

**e. Tarjeta de servicio LEDE1.** Esta tarjeta ofrece 8 puertos de 2 Mbps (nx64Kbps) con modos de operación PCM30, PCM30C, PCM31, PCM31C y P12, que cumplen con los estándares ITU-T G.703, G.704. Soporta CAS (*Channel Associated Signaling*) y CRC4 (*Check Redundancy Ciclic*). En la figura 13, se muestra a la tarjeta de servicio LEDE1.

**Figura 13**

*Tarjeta de servicio LEDE1.*



*Nota: adaptado de Manual tarjeta LEDE1, Hitachi Energy, 2020.*

**f. Tarjeta de servicio OPIC2.** La tarjeta proporciona 4 interfaces de teleprotección óptica basada en SFP que cumple con el estándar IEEE C37.94 o IEC 62843 (estándar que describe las conexiones de equipos de teleprotección a multiplexores digitales por medio de la fibra óptica). Esta tarjeta también es usada para transportar señales de protección en una red MPLS. En la figura 14, se muestra a la tarjeta de servicio OPIC2.



**Figura 14**

*Tarjeta de servicio OPIC2.*



*Nota:* adaptado de *Manual tarjeta OPIC2*, Hitachi Energy, 2020.

**g. Tarjeta de servicio ELET1.** Proporciona 24 puertos 10/100/1000 BASE-T, soporta protocolos VLAN, QoS, 802.1q, QinQ, RSTP. Además, brinda acceso a servicios que trabajan con MPLS-TP. En la figura 15, se muestra a la tarjeta de servicio ELET1.

**Figura 15**

*Tarjeta de servicio ELET1.*



*Nota:* Adaptado de *Manual tarjeta ELET1*, Hitachi Energy, 2020.

**h. Tarjeta de servicio CEPI1.** Proporciona 8 puertos de 2 Mbps (nx64 Kbps o P12), interconecta con el bus PDH para implementar los servicios CESoP (*Circuit Emulation Service over Packet*), compatible con los protocolos Pseudo Wire SAToP (*Structure Agnostic Transport over Packet*) y CESoPSN (*Circuit Emulation Service over Packet Switched Network*), utilizado para llevar tramas TDM a una red ethernet o MPLS-TP. En la figura 16, se muestra a la tarjeta de servicio CEPI1.



**Figura 16**

*Tarjeta de servicio CEPI1.*



*Nota:* Adaptado de *Manual tarjeta CEPI1*, Hitachi Energy, 2020.

### **2.1.5 Sistema de comunicaciones por fibra óptica**

La fibra óptica y el transceptor SFP (*Small Form-factor Pluggable*) tienen un papel importante para este trabajo, dado que establece el enlace entre los multiplexores que transportarán grandes cantidades de datos.

La fibra óptica se ha vuelto una necesidad para llevar las comunicaciones a otro nivel debido a su rapidez y su gran ancho de banda, que brinda resultados beneficiosos a usuarios finales. Todo esto ha sido posible debido a que, en el siglo XX, el físico Narinder Singh Kapany realizó experimentos conduciendo a la invención de la fibra óptica.

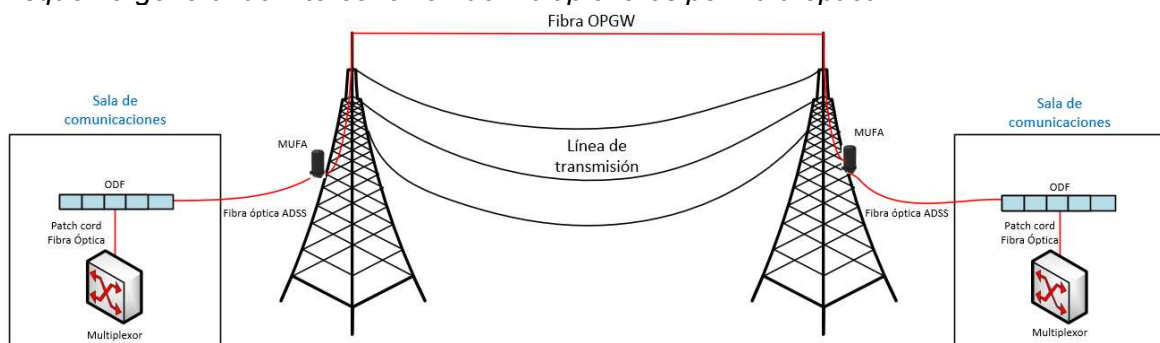
La fibra óptica es fabricada de vidrio con el objetivo de contener las ondas luminosas desde un punto inicial hacia un punto extremo. Tiene una capa de revestimiento que ayuda a que no se disperse la luz óptica. Existen fibras monomodo, usadas para largas

distancias, y multimodo, usado para cortas distancias. Todo esto teniendo en cuenta el estándar ITU-T G.652.

En la figura 17, se muestra un esquema general de interconexión de multiplexores por fibra óptica para empresa eléctrica, el cual se observa que utiliza la fibra OPGW (*Optical Ground Wire*) para transportar sus comunicaciones y llega esta fibra a una MUFA (caja de empalme de fibra óptica) en cada subestación. De esta MUFA sale un cable ADSS (*All-Dielectric Self-Supporting*), fibra que se usa para tendido aéreo o, en ocasiones, una fibra antirroedor, que se instala por ducterías subterráneas hasta llegar a un ODF (*Optical Distribution Frame*) en un gabinete designado, para luego con un *patch cord* de fibra óptica realizar la conexión al multiplexor mediante un SFP.

**Figura 17**

*Esquema general de interconexión de multiplexores por fibra óptica.*



La fibra óptica tiene, principalmente, 3 ventanas de operación 850nm, 1310nm y 1550nm. Esta última es la que tiene menos pérdida por absorción.

El transceptor SFP es aquel dispositivo que convierte la señal eléctrica en señal óptica y viceversa, teniendo el Laser como fuente de luz. Este dispositivo es insertado en los multiplexores para, luego, realizar la conexión con la fibra óptica. Existen 2 tipos, los cuales son SFP y SFP BIDI. El primero usa 2 hilos teniendo una sola longitud de onda, es decir, un hilo para transmitir y el otro hilo para recibir. El segundo usa un solo hilo para transmitir y recibir, pero con distintas longitudes de onda.

En la figura 18, se muestra un SFP de 2 hilos. Estos SFP son del tipo SDH y deben ser solicitados según su capacidad STM-1, STM-4 o STM-16.

**Figura 18**

*SFP-SDH de 2 hilos.*



*Nota:* adaptado de Manual transceptor SONET/SDH STM-16, Coretek, 2021

Estos dispositivos SFP tienen un parámetro importante: el cual es su nivel de recepción. En caso este nivel no sea óptimo para el enlace entre multiplexores, se debe usar amplificadores ópticos para superar el problema del nivel de recepción. En la figura 19, se muestra un amplificador óptico que ocupa 1 RU (rack unit). Este tipo de amplificador cuenta con dos fuentes de alimentación de 48 Vdc.

**Figura 19**

*Amplificador óptico.*

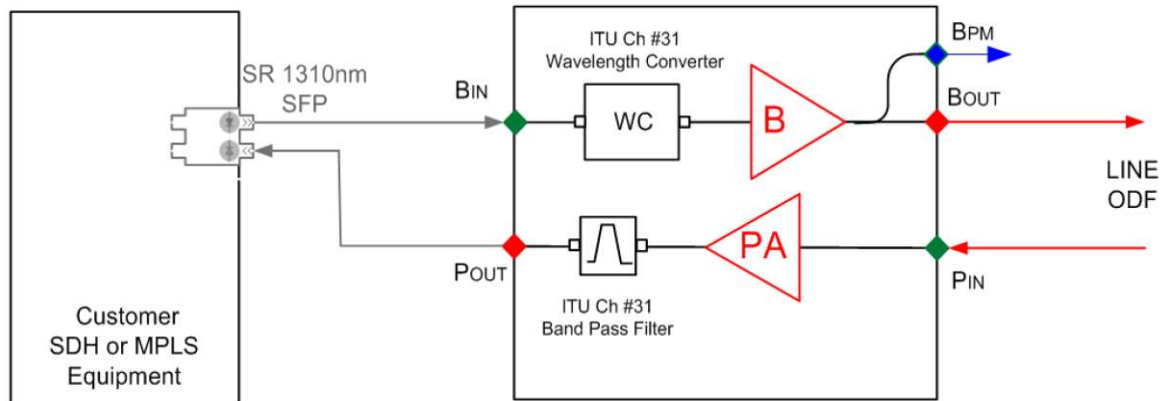


*Nota:* adaptado de Guía de usuario y montaje de dispositivo en rack, IPG Photonics, 2022.

En la figura 20, se muestra un diagrama de bloques del amplificador óptico, donde se observa la interconexión de cables de fibra óptica entre el multiplexor, amplificador óptico y ODF (*Optical Distribution Frame*). El amplificador *Booster* (B) se ubica en el hilo transmisor del SFP y el preamplificador (PA) se ubica en el hilo receptor del SFP.

**Figura 20**

*Diagrama de bloques de amplificador óptico.*

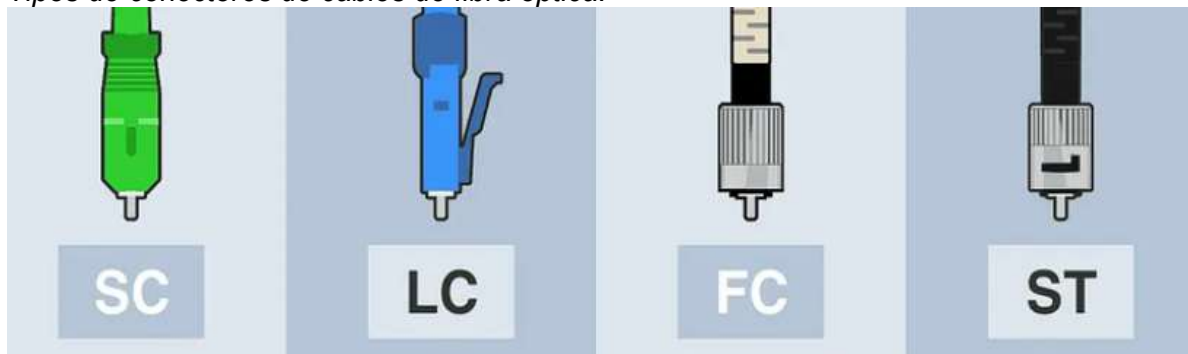


*Nota:* adaptado de *Guía de usuario y montaje de dispositivo en rack*, IPG Photonics, 2022.

Para la interconexión de multiplexores hacia los ODF's se usan los llamados patch cords de fibra óptica, que dependen de su tipo de conector o pulido. En la Figura 21 se muestra los tipos de conectores más usados para telecomunicaciones, donde esto depende del equipo y/o ODF al que se va a conectar la fibra óptica.

**Figura 21**

*Tipos de conectores de cables de fibra óptica.*

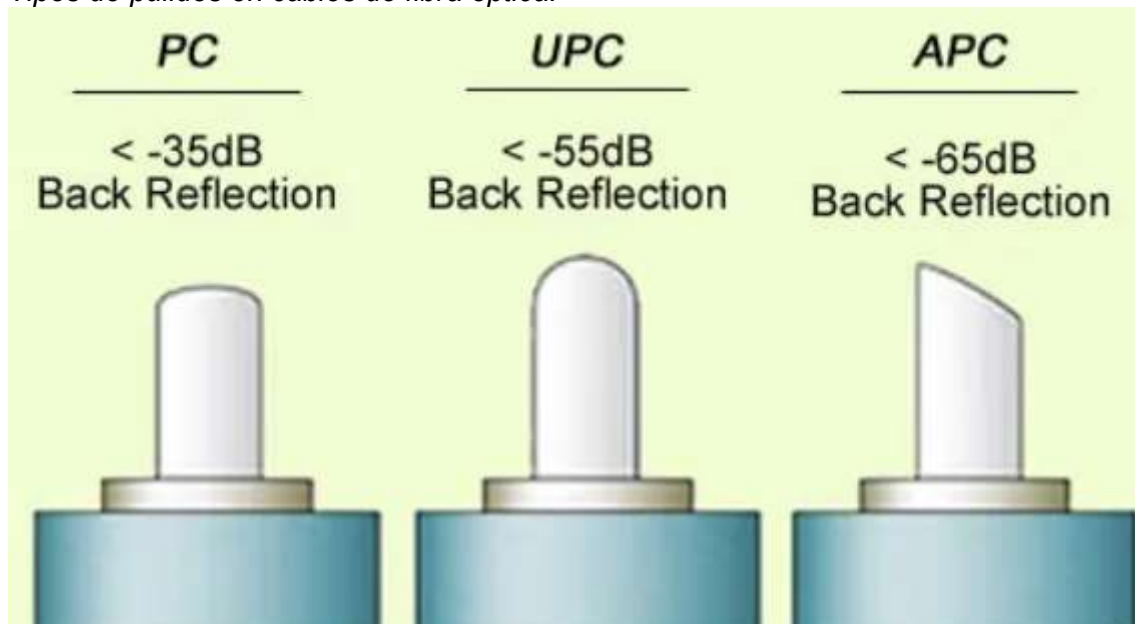


*Nota:* adaptado de *Diferencias entre tipos y pulidos de conectores de fibra óptica*, <https://medium.com/@gustavo.regucom06/diferencias-entre-tipos-y-pulidos-de-conectores-de-fibra-%C3%B3ptica-fd3eb9975a4d>.

Los tipos de pulido tiene una relación con las pérdidas de retorno entre el contacto de la fibra óptica, por ello la importancia de su mejor elección y necesidad. En la Figura 22 se muestra los pulidos PC, UPC y APC, donde el APC tiene menor pérdida de retorno.

**Figura 22**

*Tipos de pulidos en cables de fibra óptica.*



*Nota:* adaptado de Diferencias entre tipos y pulidos de conectores de fibra óptica, <https://medium.com/@gustavo.regucom06/diferencias-entre-tipos-y-pulidos-de-conectores-de-fibra-%C3%B3ptica-fd3eb9975a4d>.

### **2.1.6 Sincronismo de una red digital TDM**

Es importante contar con una sincronización para la red TDM, para el bus PDH y SDH. PDH es una red casi síncrona, debido a que el reloj opera independiente en cada equipo y, por tanto, aunque todos los relojes (independientes) trabajen a la misma frecuencia pueden existir diferencias. Estas diferencias deben estar dentro de los márgenes permitidos para no producir error o pérdida de información en el equipo receptor. La velocidad de las tramas PDH se establecen en 2 Mbps; sin embargo, en el transcurso del tiempo se volvió una necesidad contar con altas tasas o superiores velocidades. Es ahí donde nace SDH, el cual, debido a esta alta tasa de transferencia de datos, se vuelve necesario contar con una red síncrona. Por ello, en este diseño se escogerá la sincronización tipo esclavo-maestro, donde todos los multiplexores se sincronizarán por un reloj maestro de un único multiplexor.

La red de sincronismo es aquella que distribuye la información de temporización o reloj a todos los nodos que conforman la red de transporte SDH. Debido a que esta red de

transporte se basa en altas velocidades, es necesario la temporización en sus elementos de red para recibir y transmitir la información, y, en consecuencia, tener la recepción correcta de la trama y evitar pérdidas de información, donde es crítico para señales de protección de líneas de transmisión.

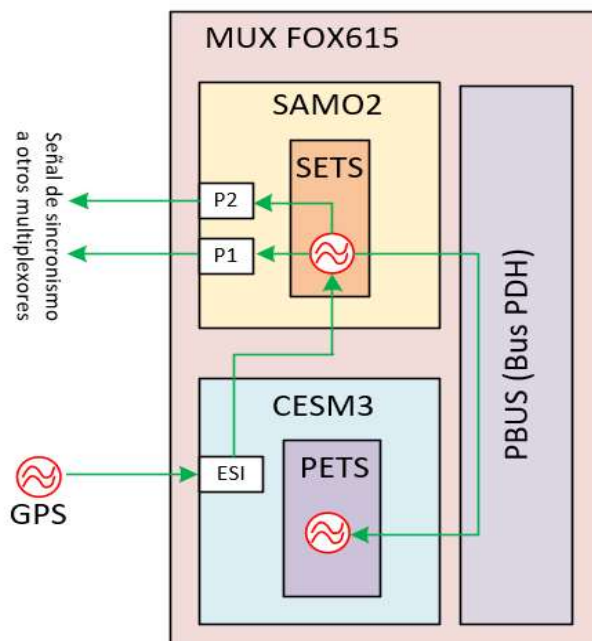
Para este sustento se toma referencia las recomendaciones siguientes:

- ITU-T G.811: características de temporización de los relojes de referencia primario
- ITU-T G.812: requisitos de temporización de relojes subordinados adecuados para utilización como relojes de nodo en redes de sincronización
- ITU-T G.813: características de temporización de relojes subordinados de equipos de la jerarquía digital síncrona

En la figura 23, se muestra un esquema de cómo se sincroniza el multiplexor de la marca Hitachi Energy modelo FOX615. Para sincronizar el reloj de la red SDH, se usa SETS (*Synchronous Equipment Timing Source*) y para sincronizar el reloj del bus PDH, se usa PETS (*Plesiochronous Equipment Timing Source*); sin embargo, al contar con un sincronizador externo (GPS), este último sincronizará al multiplexor por la interface ESI (*External Synchronous Input*) de la tarjeta controladora CESM3, sincronizando al reloj de SETS, y luego SETS sincronizará al reloj de PETS. Es así que el bus PDH quedará sincronizado para no producir errores en este nivel de la trama. Además, el reloj de SETS también enviará señales de sincronismo por todos sus puertos físicos habilitados de la tarjeta SAMO2. Esta señal de sincronismo será recibida por otro multiplexor por un puerto óptico SDH, sincroniza, primero, su reloj SETS y, luego, su reloj PETS. De esta manera, se da sucesivamente si se tiene más enlaces con otros multiplexores.

**Figura 23**

*Esquema de sincronismo en multiplexor.*



En la figura 24, se muestra un equipo GPS, el cual se usará para sincronizar a toda la red SDH por medio de los multiplexores. Este equipo entrega una señal de 2 MHz al multiplexor que se conecta directamente. El GPS ocupa 1 RU (rack unit) y se energiza con 110 Vdc. Además, es importante validar que la antena del GPS se ubique en un lugar totalmente despejado para tener la mejor recepción de los satélites.

**Figura 24**

*Sincronizador externo GPS.*



*Nota: adaptado de Guía de usuario y montaje de dispositivo en rack, Meinberg, 2022.*

### **2.1.7 Transporte de tráfico Ethernet sobre una red SDH y VLAN**

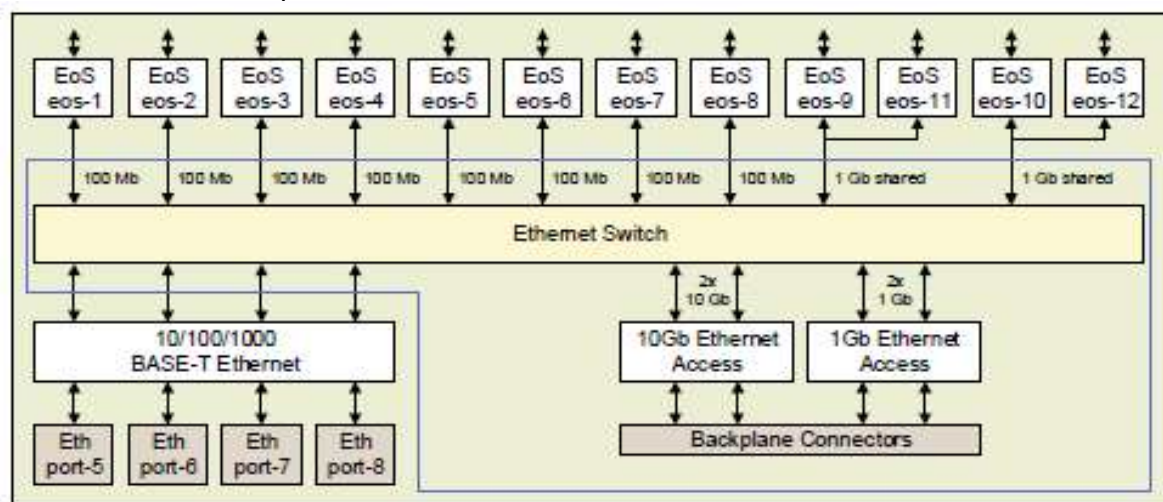
El protocolo EoS (*Ethernet over SDH*) permite transportar tráfico Ethernet sobre una red *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH). La funcionalidad de este protocolo es posible mediante el procedimiento de entramado genérico (GFP, *Generic Framing Procedure*)



según recomendación ITU-T G.7041 y la concatenación virtual (VCAT, *Virtual Concatenation*). El multiplexor elegido tiene la tarjeta necesaria, llamada SAMO2, que proporciona 12 canales EoS tal como se muestra en la figura 25. Este protocolo permite transportar el tráfico de datos corporativos (internet), datos IEC 104 hacia los centros de control, y otros datos Ethernet que sean necesarios transportar desde las subestaciones eléctricas hacia otros puntos por la red SDH.

**Figura 25**

*Canales EoS de multiplexor.*

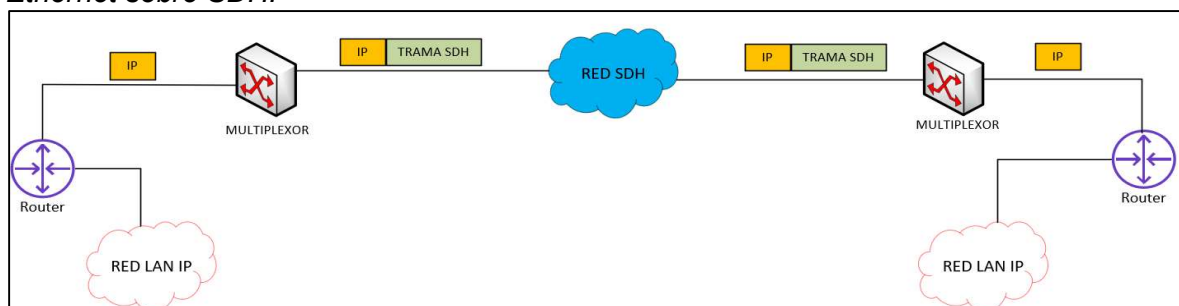


*Nota:* adaptado de Manual tarjeta SAMO2, Hitachi Energy, 2020.

En la figura 26, se observa un esquema de cómo el multiplexor recibe un paquete IP y este, por medio del protocolo GFP y la concatenación virtual, encapsula el paquete en una trama de mayor jerarquía para transportarlo por la red SDH. Luego, otro multiplexor recibe esta trama y la desencapsula para entregarlo al cliente final de la red LAN.

**Figura 26**

*Ethernet sobre SDH.*





El multiplexor es un conmutador compatible con VLAN, es decir, dentro de la funcionalidad del bus ethernet se pueden reenviar tramas etiquetadas con VLAN. Esta funcionalidad es usada para los canales EoS o cualquier tráfico que ingresa al bus Ethernet del multiplexor. Según manual de fabricante del multiplexor se mencionan los siguientes modos de puerto:

- Puerto modo acceso: reenvía tramas sin etiquetar
- Puerto modo troncal: reenvía tramas únicamente etiquetadas con una VLAN
- Puerto modo troncal con VLAN nativa: reenvía tramas etiquetadas con una VLAN y tramas sin etiqueta VLAN que corresponden al número de la VLAN nativa
- Puerto modo general: este modo de puerto brinda flexibilidad para el etiquetado de tramas, debido a que se elige qué VLAN transportará únicamente
- Puerto modo QinQ: este modo de puerto reenvía todas las tramas recibidas, agregándole una etiqueta adicional que será retirada en el extremo final.

En la figura 27 y figura 28, se muestran los esquemas de los tipos de puertos mencionados anteriormente.

Figura 27

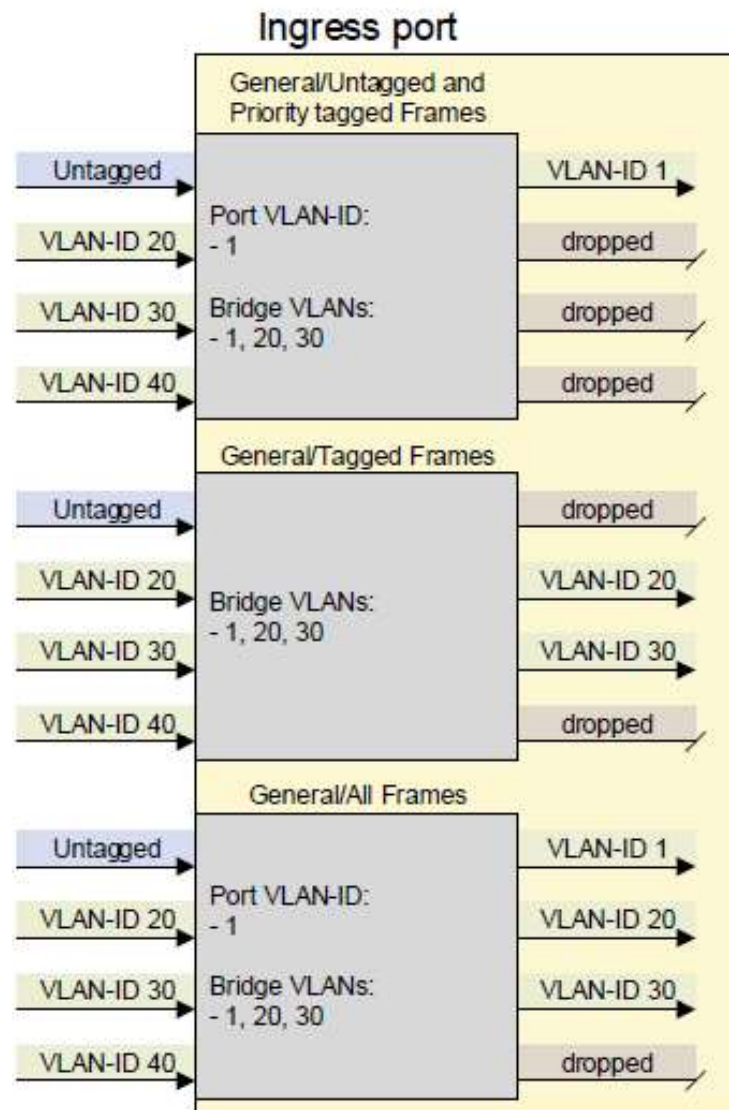
Modos de puerto para tráfico Ethernet.



Nota: adaptado de *Manual Ethernet Switching*, Hitachi Energy, 2020.

**Figura 28**

*Puerto general.*



*Nota:* adaptado de *Manual Ethernet Switching*, Hitachi Energy, 2020.

### **2.1.8 Transporte de tráfico TDM sobre una red Ethernet**

En una red TDM, es ideal siempre contar con rutas redundantes para las comunicaciones, siempre y cuando la arquitectura TDM facilite esta solución; sin embargo, las rutas alternas no solo pueden hacerse en una arquitectura TDM, sino también en una red ethernet. Para esto se cuenta con la tarjeta CEPI1, que proporciona las funciones para el servicio de emulación de circuitos por paquetes (CESoP). La emulación de circuitos, llamados *Pseudowires*, proporcionan los medios para transportar las señales o servicios TDM provenientes de los clientes a través de la red de Ethernet, IP o MPLS.

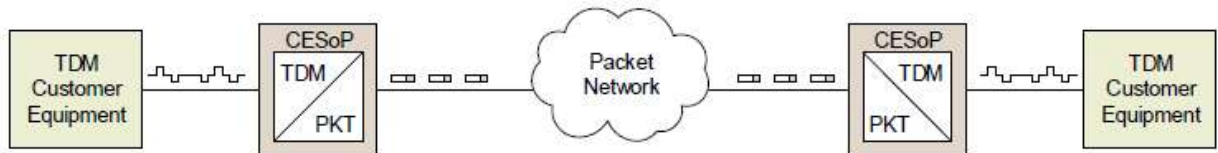
La tarjeta CEPI1 acepta 2 tipos de encapsulación

- *Structure agnostic mapping*, que utiliza los métodos
  - *Structure Agnostic TDM over Packet (SAToP)*, definido en el RFC 4553.
  - *Circuit Emulation Services over Ethernet (CESoETH)*, definido en el MEF 8 (MEF, *Metro Ethernet Forum*) con hasta 8 *Pseudowires*.
- *Structure aware mapping*, que utiliza los métodos:
  - *Circuit Emulation Service over Packet Switched Network (CESoPSN)*, definido en el RFC 5086.
  - *Circuit Emulation Services over Ethernet (CESoETH)*, definido en el MEF 8 (MEF, *Metro Ethernet Forum*) con hasta 64 *Pseudowires*.

En la figura 29, se observa un esquema general del transporte de señales TDM sobre una red de paquetes usando el protocolo CESoP.

**Figura 29**

*Transporte de señales TDM sobre una red de paquetes.*



*Nota:* adaptado de Manual tarjeta CEPI1, Hitachi Energy, 2020.

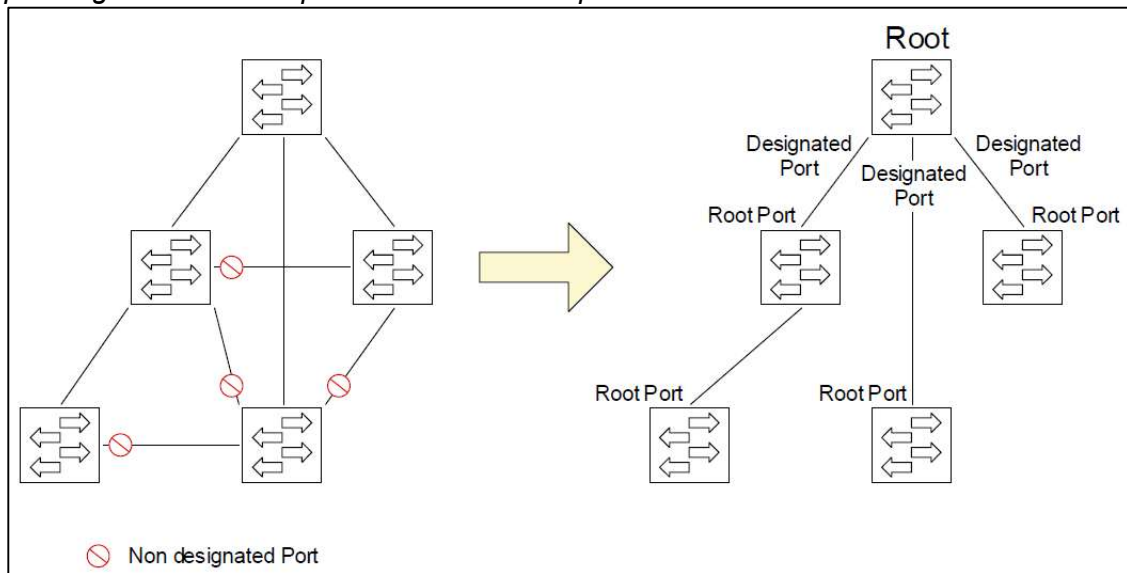
### **2.1.9 Protocolo para aplicar redundancia en la red de transporte**

STP es el protocolo usado y conocido que permite tener rutas redundantes en un diseño de red jerárquico, que se puede utilizar en cualquier diseño de red, tales como enlaces punto a punto, anillo y mallado. Este protocolo reduce la topología física al bloquear los puertos a una topología de árbol activa que llegue a todos los segmentos de la red. RSTP, el sucesor de STP, proporciona una convergencia más rápida después de un cambio de topología al reducir la cantidad de estados de puerto del conmutador. Ambos protocolos son soportados por el multiplexor y garantizan que solo exista una ruta lógica entre todos los destinos de una red, usado para redundancia de canales EoS.

En la figura 30, se muestra un esquema de la aplicación del protocolo STP en los multiplexores, donde la convergencia ocasiona distintos tipos de puertos como bloqueados, raíz y designados.

**Figura 30**

*Spanning Tree Protocol para una red de multiplexores.*

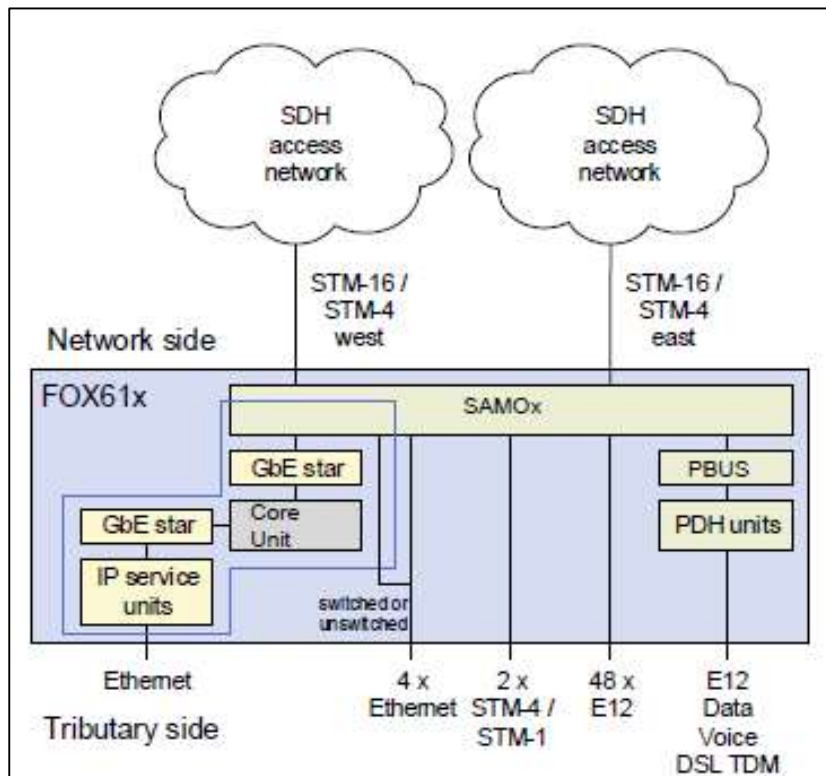


*Nota:* adaptado de Manual Ethernet Switching, Hitachi Energy, 2020.

En la figura 31, se muestra que, para la protección de canales o redundancia de circuitos TDM, se debe considerar configurar, en la tarjeta SAMO2, una ruta principal por un puerto óptico (west), tal que, si existe alguna falla en algún punto de la fibra, automáticamente se debe activar la ruta de respaldo (east) y dar continuidad del servicio. Esta funcionalidad se debe aplicar en arquitecturas tipo anillo o mallado.

**Figura 31**

*Protección de canales SDH.*



*Nota:* adaptado de Manual tarjeta SAMO2, Hitachi Energy, 2020.

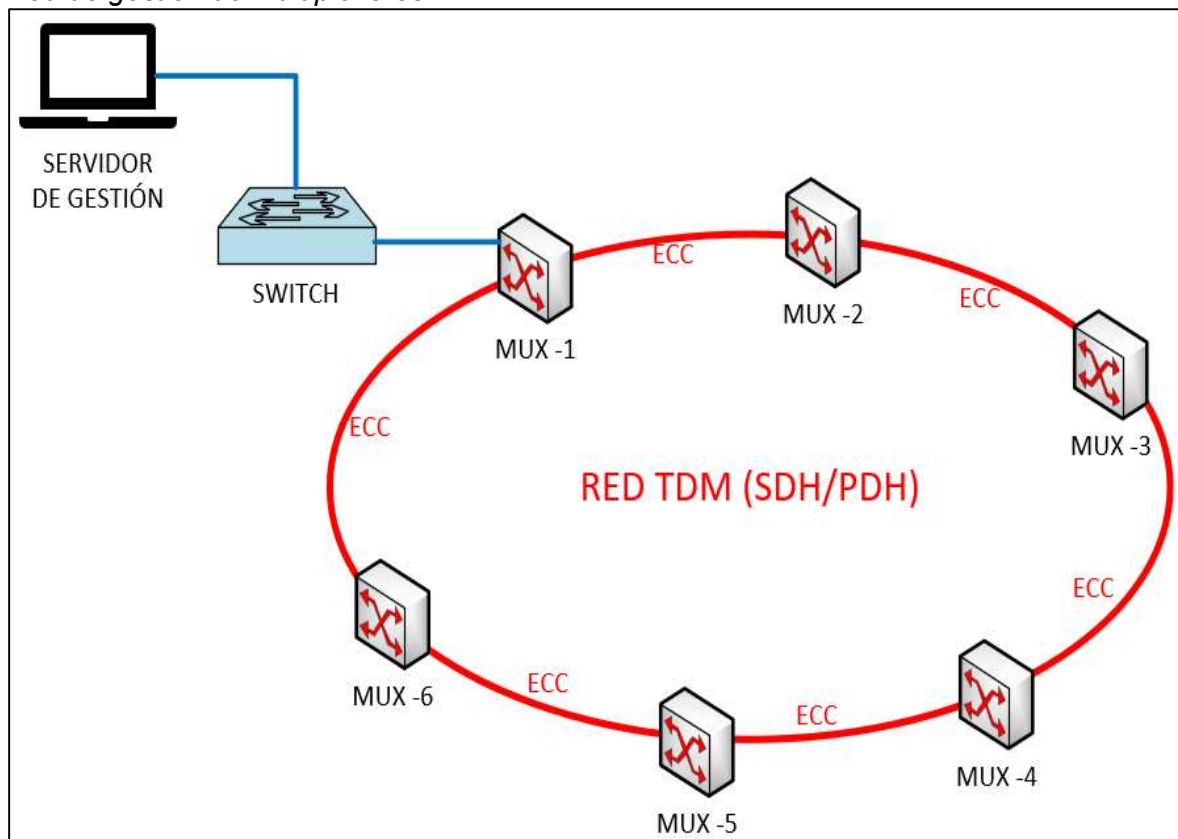
### **2.1.10 Gestión de Multiplexores usando la red TDM**

Como se mencionó en los objetivos, es de suma importancia contar con infraestructura independiente para la gestión centralizada de los multiplexores, tener como fin poder monitorear estos equipos y actuar ante fallas de tarjetas, enlaces caídos por los puertos ópticos, fallas de servicios; además, poder realizar configuraciones remotas, ya sea para agregar servicios adicionales o realizar algún cambio en el redireccionamiento de tramas. En la recomendación ITU-T G.784, se explican los conceptos fundamentales del Canal de Control Integrado (ECC, *Embedded Control Channel*) y el Canal de Comunicaciones de Datos (DCC, *Data Communications Channel*), donde para DCC se definen 2 canales. El primero que comprende 3 octetos, dando un canal de 192 Kbps, y el segundo comprende 9 octetos, da un canal de 576 Kbps: estos octetos se encuentran dentro de la trama STM-N descrito en la recomendación ITU-T G.707.

Todos estos conceptos ayudan a entender y proporcionar una gestión *in-band* de todos los multiplexores a implementar. Esta comunicación se da a nivel del protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*), donde se aprovecha de la mejor manera si la arquitectura cuenta con anillos. En la figura 32, se muestra una red TDM implementada por equipos multiplexores, donde el multiplexor MUX-1 es interconectado a una red LAN que comprende el switch y el servidor de gestión. Este servidor, por medio de un software propietario del multiplexor, monitorea alarmas de estos equipos, permite ingresar por la red *in band* para realizar configuraciones remotas y/o revisar eventos de interés. Todo esto de manera centralizada con una red de infraestructura homogénea.

**Figura 32**

*Red de gestión de multiplexores.*



## 2.2 Marco conceptual

A continuación, se presentan conceptos mencionados en el marco teórico.

### 2.2.1 Relé de protección

Es un dispositivo compacto que se conecta en conjunto con otros relés a lo largo de los sistemas eléctricos de potencia para detectar condiciones intolerables o indeseables dentro de un área asignada. Estos equipos tienen, entre los más usados, las funciones de protección 21/21N (Protección de distancia de fase y fase-tierra), 67/67N (Protección de sobrecorriente direccional de fase y fase-tierra) y 87L (Protección diferencial de línea) para el envío de comandos de apertura. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Transferencia de disparo directo (DTT, *Direct Transfer Tripping*): consiste en que el relé de protección envía un comando de apertura directamente al interruptor del extremo remoto de la línea, sin que el comando sea regulado por ninguna otra protección.
- Transferencia de disparo permisivo (PTT, *Permissive Transfer Tripping*): consiste en que ambos relés de protección de los extremos de la línea deben detectar la falla para realizar la apertura del interruptor.

En la figura 33, se muestra la imagen de un relé de la marca Siemens. Normalmente, las líneas de alta tensión cuentan con 2 relés de protección: uno principal, cuyo medio es por fibra óptica usando multiplexores, y otro de respaldo, donde, generalmente, se utiliza el equipo onda portadora o PLC (*Power Line Carrier*), que usa la misma línea de transmisión para transportar señales de datos.



**Figura 33**

*Relé de protección.*



*Nota:* adaptado de Manual relé Siprotec, Siemens, 2022.

### **2.2.2 Equipo de teleprotección**

Es aquel equipo diseñado para ser utilizado en conjunto con el sistema de protección, el cual requiere un enlace de comunicaciones para transportar la información de comandos (órdenes de equipos de protección que debe ser recibida por el equipo de protección remoto en el menor tiempo posible) hacia el otro extremo, donde existe otro equipo homólogo. Para esta transmisión utilizan señales analógicas o digitales.

Estos equipos, generalmente, transportan comandos de las funciones 21/21N y 67/67N. En la figura 34, se muestra un equipo de teleprotección de la marca Hitachi Energy modelo NSD570. Estos equipos están comunicados con el relé de protección mediante cables de control para poder recibir las órdenes y enviar los comandos hacia el equipo de teleprotección remoto.

**Figura 34**

*Equipo de teleprotección.*



*Nota: adaptado de Manual NSD570, Hitachi Energy, 2016.*

### **2.2.3 Multiplexor**

Llamado también MUX, es un dispositivo o circuito lógico combinatorio, que permite seleccionar una o más señales de entrada digitales o analógicas para combinarlas y transportarlas a una alta velocidad por una única salida. Esta salida es un medio como cable de cobre o fibra óptica.

### **2.2.4 GPS**

El sistema de posicionamiento global o GPS (*Global Positioning System*) es un dispositivo que proporciona información relativa de ubicación, velocidad y sincronización horaria por medio de los satélites captados con una antena. Para la sincronización de una red SDH, es de suma importancia considerarlo como reloj primario, debido a la precisión en el sincronismo de estos equipos.

### **2.2.5 Amplificador óptico**

Es un dispositivo que tiene la función de amplificar una señal óptica directamente sin tener la necesidad de convertirlo en señal eléctrica y, como consecuencia, permite lograr enlaces a mayores distancias. Generalmente, un amplificador cuenta con un *Amplificador Booster*, que se ubica en el lado del transmisor, y un preamplificador, que se

ubica en el lado del receptor. Para el buen uso de un amplificador, se debe tener en cuenta el estudio de las pérdidas de potencia en toda la longitud de la fibra óptica.

### 2.2.6 PDH

*Plesiochronous Digital Hierarchy* (Jerarquía Digital Síncrona) es aquella tecnología usada en telecomunicaciones, tradicionalmente en telefonía, que permite enviar varios canales telefónicos sobre un mismo medio que puede ser cable coaxial o microondas. En la tabla 1, se muestra los niveles de jerarquía de una red PDH para estándares desarrollados en Norteamérica, Europa y Japón.

**Tabla 1**

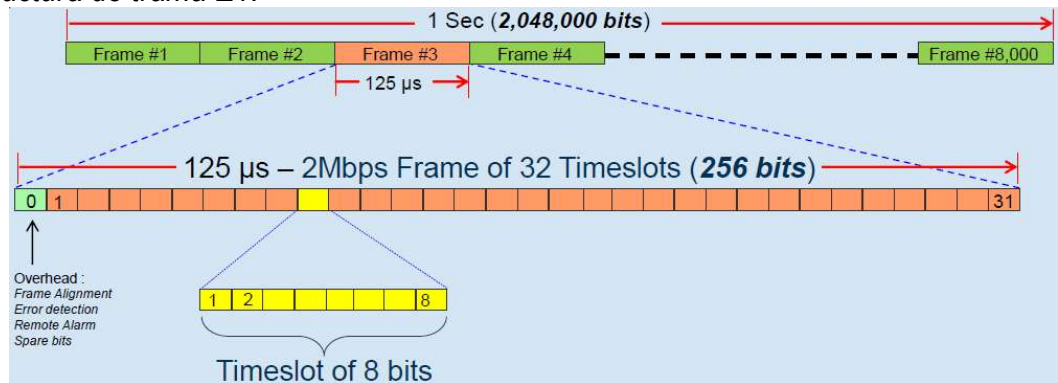
*Niveles de jerarquía PDH según ubicación geográfica.*

Nivel	Norteamérica		Europa		Japón	
	Velocidad	#CH	Velocidad	#CH	Velocidad	#CH
<b>1</b>	T1=1.544Mbps	24	E1=2.048Mbps	32	J1=1.544Mbps	24
<b>2</b>	T2=6.312Mbps	96	E2=8.448Mbps	128	J2=6.312Mbps	96
<b>3</b>	T3=44.736Mbps	672	E3=34.368Mbps	512	J3=32.064Mbps	480
<b>4</b>	T4=139.264Mbps	4032	E4=139.264Mbps	2048	J4=97.728Mbps	1500

En la recomendación ITU-T G.704, se define la estructura de la trama E1 o nivel jerárquico de 2.048 Mbps, donde el TS0 y TS16 son reservados para administración y señalización de canal. La señalización es opcional debido a que también se puede usar este canal para datos o servicios. En la figura 35, se muestra una trama E1 de la red PDH, el cual contiene 32 time slots y cada time slot contiene 8 bits de datos.

Figura 35

Estructura de trama E1.

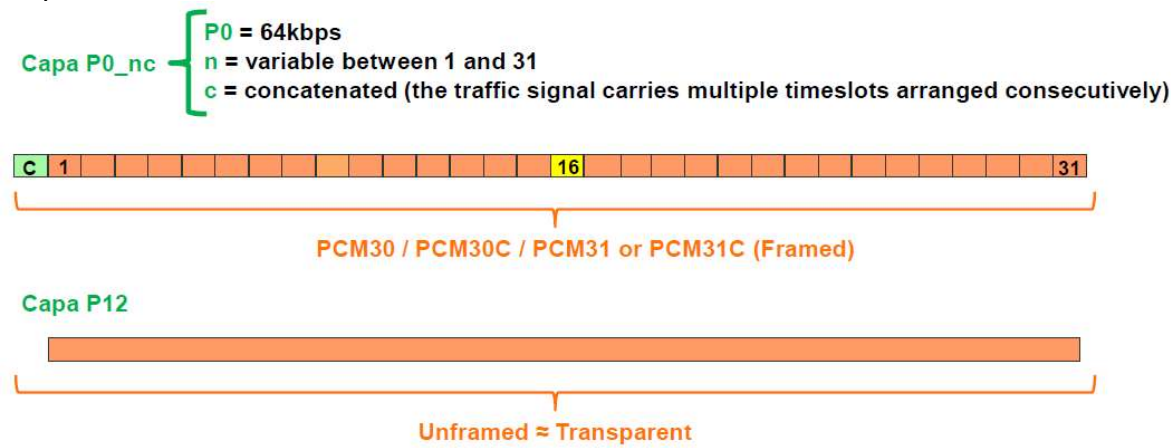


Nota: adaptado de Manual FOX615, Hitachi Energy, 2020.

En los modos de trama E1, se considera si se cuenta con CAS (*Channel Associated Sig-nalling*, ubicado en el TS 16 y usado para señalización de voz) y CRC-4 (*Check Redundancy Ciclic-4*). En la figura 36, se muestra un esquema de los modos de la trama E1 de la red PDH, donde puede ser entramado (capa P0\_nc) y no entramado (Capa P12). Si la trama usa CAS, entonces reserva el time slot 16 para señalizacion de voz y si no usa CAS, el time slot 16 es usado para datos.

Figura 36

Esquema modos de trama E1.



Nota: adaptado de Manual FOX615, Hitachi Energy, 2020.

En la tabla 2, se muestra los modos de la trama E1 y su relación con las opciones CAS y CRC-4.

**Tabla 2**

*Modos de trama E1.*

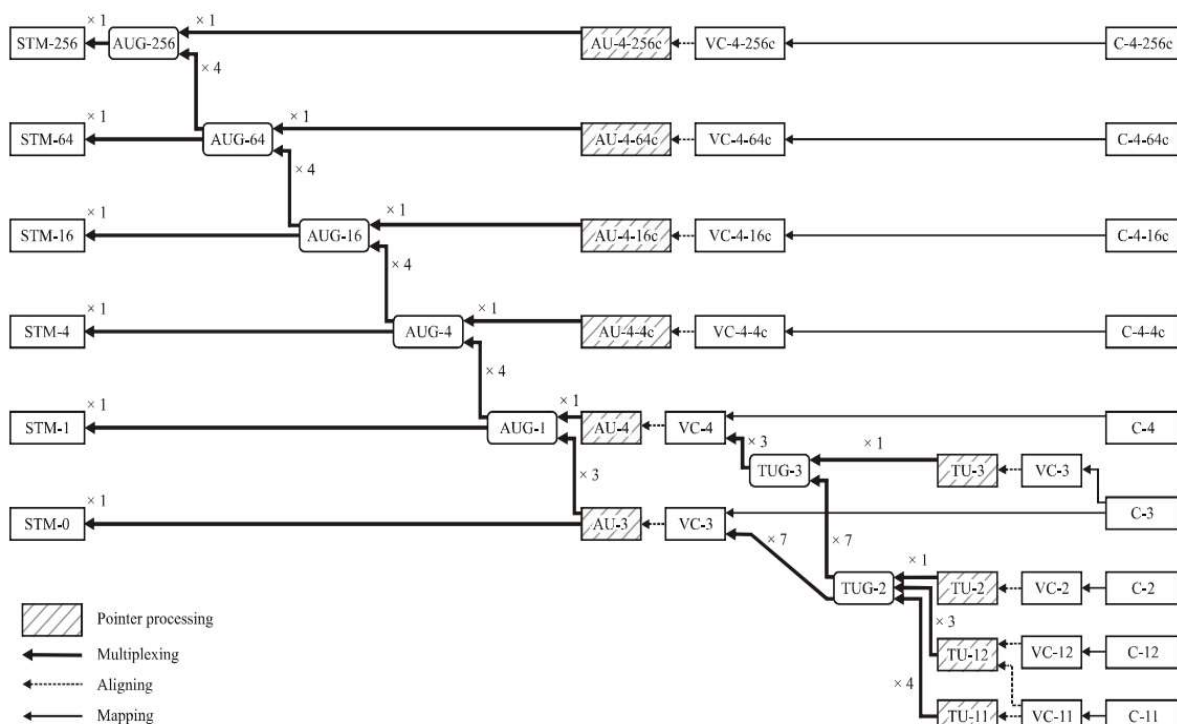
<i>Modo</i>	<i>CAS</i>	<i>CRC-4</i>
<b>PCM30</b>	Si	No
<b>PCM30C</b>	Si	Si
<b>PCM31</b>	No	No
<b>PCM31C</b>	No	Si

### **2.2.7 SDH**

La Jerarquía Digital Síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*) es un estándar internacional para redes ópticas de telecomunicaciones de alta capacidad. Es un sistema de transporte digital sincrónico; es decir, es controlado por un reloj maestro. Esta jerarquía transporta mayor cantidad de información a diferencia de PDH, cada trama va encapsulada en un tipo especial de estructura llamada contenedor virtual (VC, Virtual Container), luego de esto, se encapsulan en otras cabeceras para pasar al proceso de multiplexación y, finalmente, integrarse dentro de una estructura de STM-1 (*Synchronous Transport Module*, 155 Mbps). En la recomendación ITU-T G.707, se explica sobre los diferentes niveles de jerarquía para SDH y estructuras de multiplexación. En la figura 37, se muestra la estructura de multiplexación según ITU-T G.707.

**Figura 37**

*Estructura de multiplexación.*

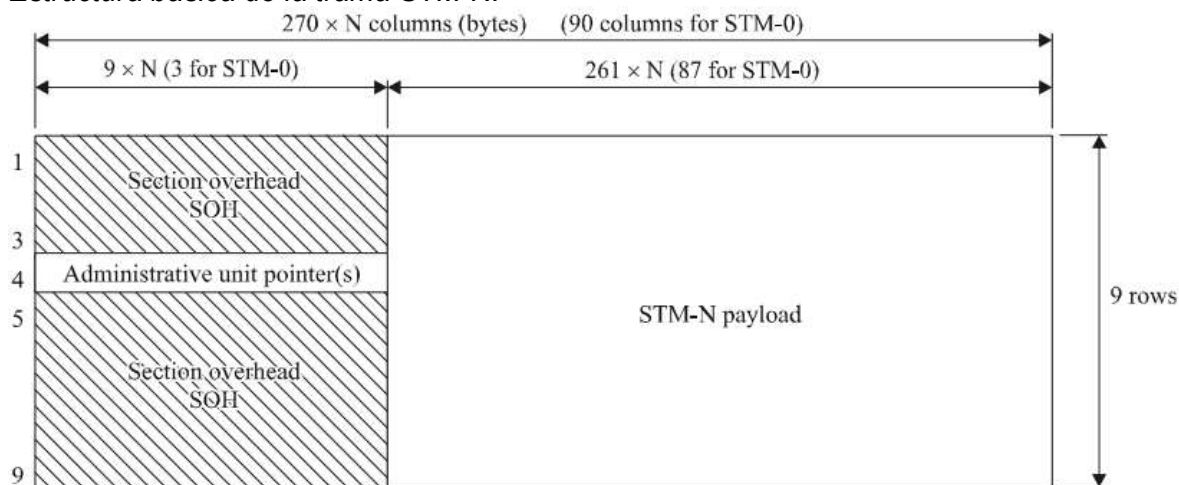


*Nota:* adaptado de Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona SDH (p.8), por recomendación de Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G.707, 2007.

En la figura 38, se muestra la estructura básica de una trama STM-N, donde N puede ser 0, 1, 4, 16, 64 y 256 según ITU-T G.707.

**Figura 38**

*Estructura básica de la trama STM-N.*



*Nota:* adaptado de Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona SDH (p.11), por recomendación de Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G.707, 2007.

En la tabla 3, se detallan algunas tasas de bits jerárquicas de contenedores virtuales para la red SDH, que son los más usuales y se deben considerar para un diseño de red de transporte.

**Tabla 3**

*Tipos de contenedores virtuales y capacidad.*

<b>Tipo VC</b>	<b>VC Bandwidth</b>	<b>VC Payload</b>
<b>VC-11</b>	1 664 Kbps	1 600 Kbps
<b>VC-12</b>	2 240 Kbps	2 176 Kbps
<b>VC-2</b>	6 848 Kbps	6 784 Kbps
<b>VC-3</b>	48 960 Kbps	48 384 Kbps
<b>VC-4</b>	150 336 Kbps	149 760 Kbps
<b>VC-4-4c</b>	601 344 Kbps	599 040 Kbps
<b>VC-4-16c</b>	2 405 376 Kbps	2 396 160 Kbps
<b>VC-4-64c</b>	9 621 504 Kbps	9 584 640 Kbps
<b>VC-4-256c</b>	38 486 016 Kbps	38 338 560 Kbps

En la tabla 4, se muestra la tasa de bits para las distintas tramas STM-N del nivel jerárquico SDH.

**Tabla 4**

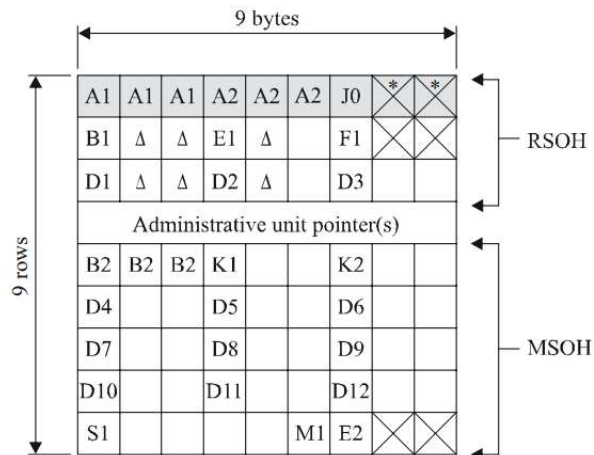
*Tasa de bits en la jerarquía SDH.*

<b>Nivel SDH</b>	<b>Tasa de bits</b>
<b>STM-0</b>	51 840 Mbps
<b>STM-1</b>	155 520 Mbps
<b>STM-4</b>	622 080 Mbps
<b>STM-16</b>	2 488 320 Mbps
<b>STM-64</b>	9 953 280 Mbps
<b>STM-256</b>	39 813 120 Mbps

Existen dos secciones de cabecera SOH (*Section Overhead*) en la trama STM-N: la sección que abarca desde la fila 1 al 3, que corresponde al RSOH (*Regenerator Section Overhead*), y la sección que abarca desde la fila 5 al 9, que corresponde al MSOH (*Multiplex Section Overhead*), tal como se indica en la figura 39. Para RSOH, los octetos D1, D2 y D3 ocupan un canal de 192 Kbps, y para MSOH, los octetos desde el D4 hasta D12 ocupan un canal de 576 Kbps. Estos canales son utilizados para la gestión de elementos en una red digital síncrona.

**Figura 39**

*Sección de cabecera SOH STM-1.*



*Nota:* adaptado de *Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona* SDH (p.66), por Recomendación de Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G.707, 2007.

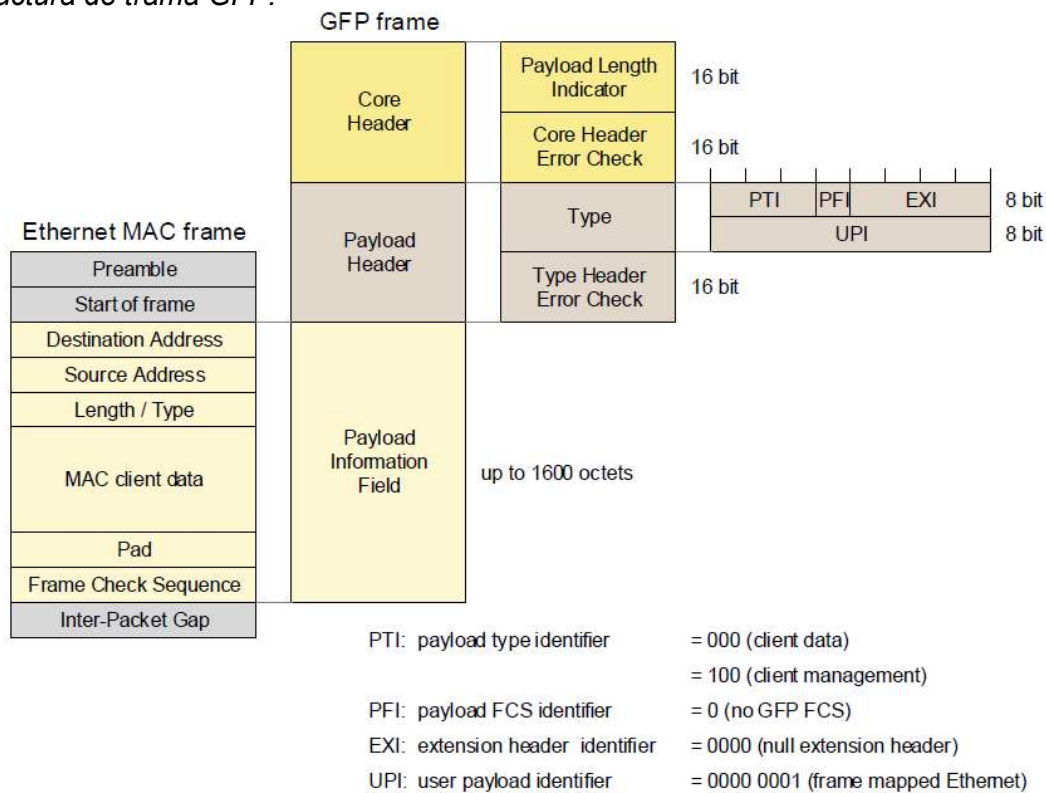
**2.2.8 GFP (Generic Framing Procedure)**

El procedimiento de entramado genérico GFP (*Generic Framing Procedure*) está definido en la recomendación ITU-T G.7041. Esta recomendación define los procedimientos necesarios para transportar tramas de longitud variable a través de trayectos de transporte SDH (transporte de datos ethernet sobre una red SDH). GFP proporciona una forma unificada de encapsular y transportar señales de clientes en lugar de protocolos de mapeo específicos de la aplicación. En la figura 40, se muestra el procedimiento de entramado genérico y su estructura.



**Figura 40**

*Estructura de trama GFP.*



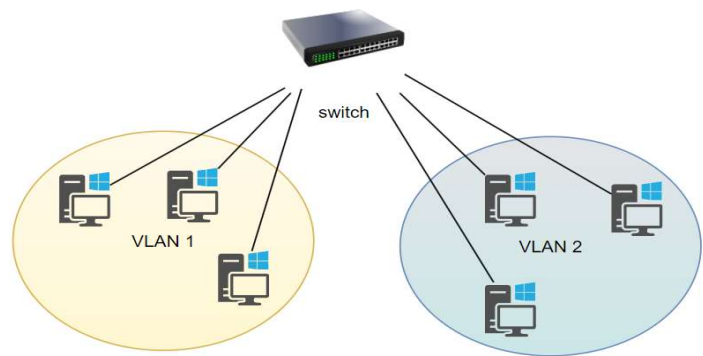
*Nota:* adaptado de *Manual tarjeta SAMO2*, Hitachi Energy, 2020.

### 2.2.9 VLAN

La VLAN (*Virtual LAN*) o redes de área local virtual se consideran como dominios de difusión lógica. Esta VLAN divide grupos de usuarios de una red física real en segmentos de redes lógicas. En la figura 41, se muestra un ejemplo de implementación de VLAN en un switch donde se segmenta lógicamente 2 dominios de difusión llamados VLAN 1 y VLAN 2.

**Figura 41**

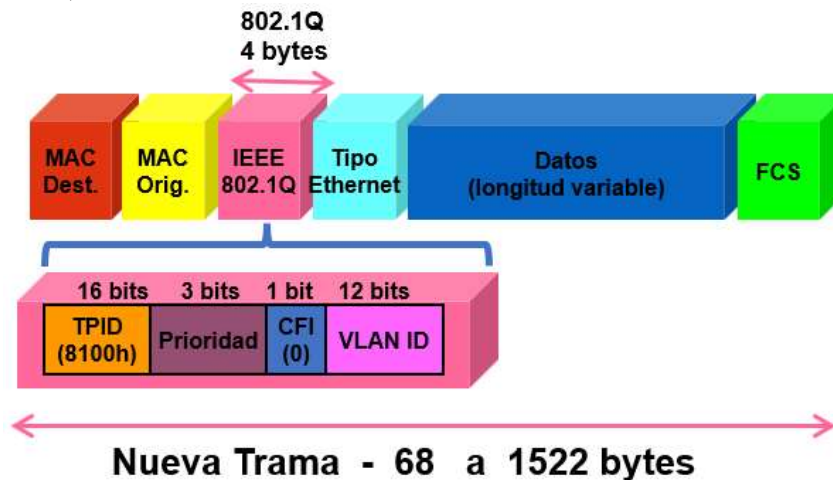
*Red implementada con VLAN.*



Esta práctica de dividir en redes lógicas se vuelve más beneficioso cuando se desea pasar este tráfico de un switch a otro switch. Es aquí donde se define el estándar IEEE 802.1Q, que permite el etiquetado a las tramas Ethernet para así diferenciarlos y transportarlos. En la figura 42, se muestra que el protocolo 802.1Q agrega un campo de 4 bytes en la trama Ethernet.

**Figura 42**

*Protocolo 802.1Q en la trama Ethernet.*

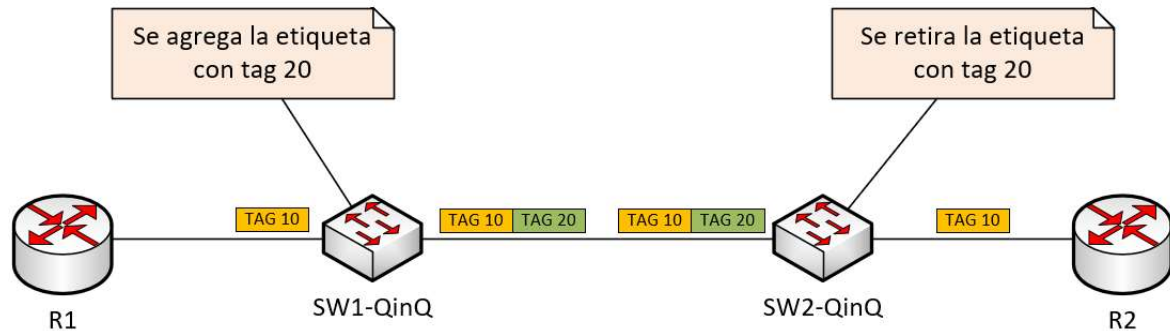


### 2.2.10 Protocolo Q-in-Q

El protocolo Q-in-Q está descrito en el estándar 802.1ad. Este protocolo que trabaja en la capa 2 permite insertar varias etiquetas (también llamados tags) VLAN en la trama ethernet, suelen ser utilizados por proveedores de servicios de red para proporcionar mayor flexibilidad. En la figura 43, se observa que R1 envía un paquete con etiqueta de VLAN 10, el equipo SW1 recibe este paquete y aplica el protocolo Q-in-Q agregando otra etiqueta con VLAN 20, para luego enviarlo equipo SW2, por último, SW2 retira la etiqueta con VLAN 20 para luego entregarlo a R2. Se observa que para R1 y R2, el tráfico de datos es transparente; es decir, en ningún momento analizan la etiqueta VLAN 20.

**Figura 43**

*Topología básica de implementación Q-in-Q.*



### **2.2.11 Protocolo Spanning Tree**

El protocolo árbol de expansión (STP, *Spanning Tree Protocol*) evita que se formen bucles cuando los conmutadores o switches se interconectan a través de múltiples rutas. Este protocolo está definido en el estándar IEEE 802.1D, donde se explica que los mensajes BPDU (*Bridge Protocol Data Units*) son intercambiados entre switches para detectar los bucles y eliminarlos. RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*) es aquel protocolo mejorado con respecto a STP, debido a su tiempo de convergencia de 10 segundos, STP tiene un tiempo de convergencia de 50 segundos.

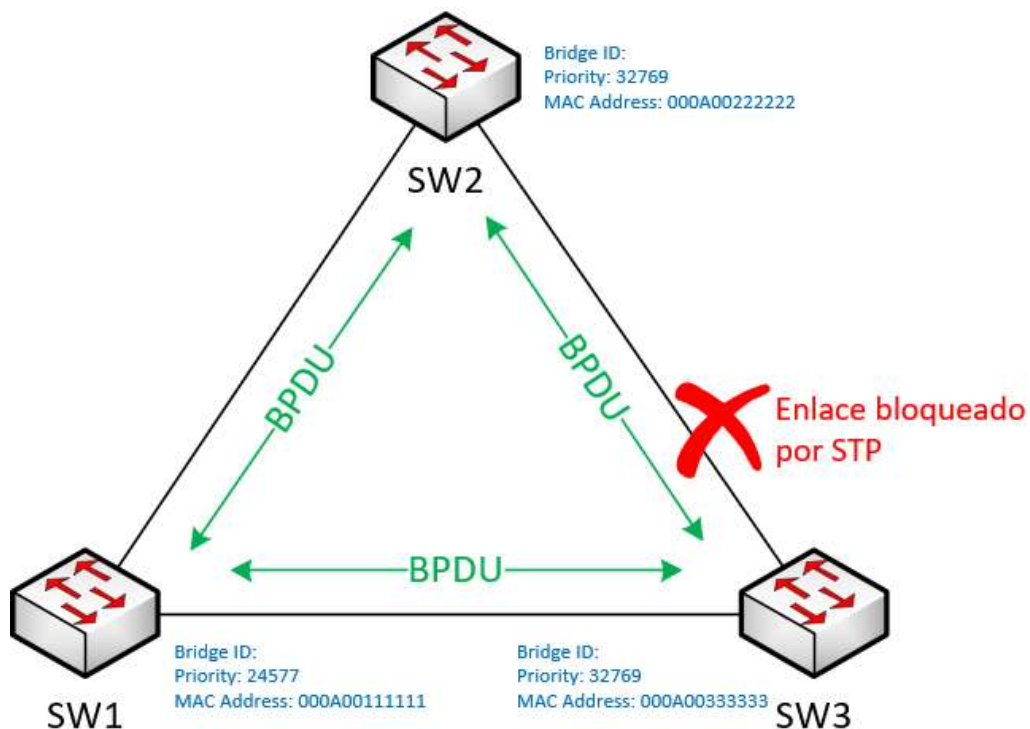
El STP designa a un único switch como puente raíz o *root bridge*, y lo utiliza como punto de referencia para todos los cálculos de rutas. Existe un término llamado *bridge ID* (BID) para determinar la elección del *root bridge*, donde el *root bridge* será quien tenga el menor valor de BID. El BID tiene 3 campos separados, los cuales son la prioridad del *bridge*, ID del sistema extendido y la dirección MAC del switch. El primer campo de prioridad de *bridge* oscila entre los valores 0 a 61440, por defecto el valor es 23768, el segundo campo ID del sistema extendido se refiere cuando se trabaja con VLAN, donde este número de VLAN se suma a el valor de prioridad del bridge, el tercer campo de la dirección MAC usualmente se usa cuando se tienen prioridades iguales y como segunda opción se elige el menor número de dirección MAC para elegir el BID.

En la figura 44, se muestra un esquema de cómo el STP bloquea uno de los enlaces al detectar un bucle. Para este ejemplo, se asume que todos trabajan en la VLAN 1. Es por

ello que las prioridades se les suma 1, por ejemplo, el switch SW1 tiene una prioridad de  $24576+1=24577$ , y los otros switches tienen una prioridad por defecto  $32768+1=32769$ . Algo que se debe tener en cuenta es que debido a que el switch SW1 tiene el BID más bajo sus enlaces nunca serán bloqueados.

**Figura 44**

*Esquema de funcionamiento STP.*



### 2.2.12 Sistema SCADA

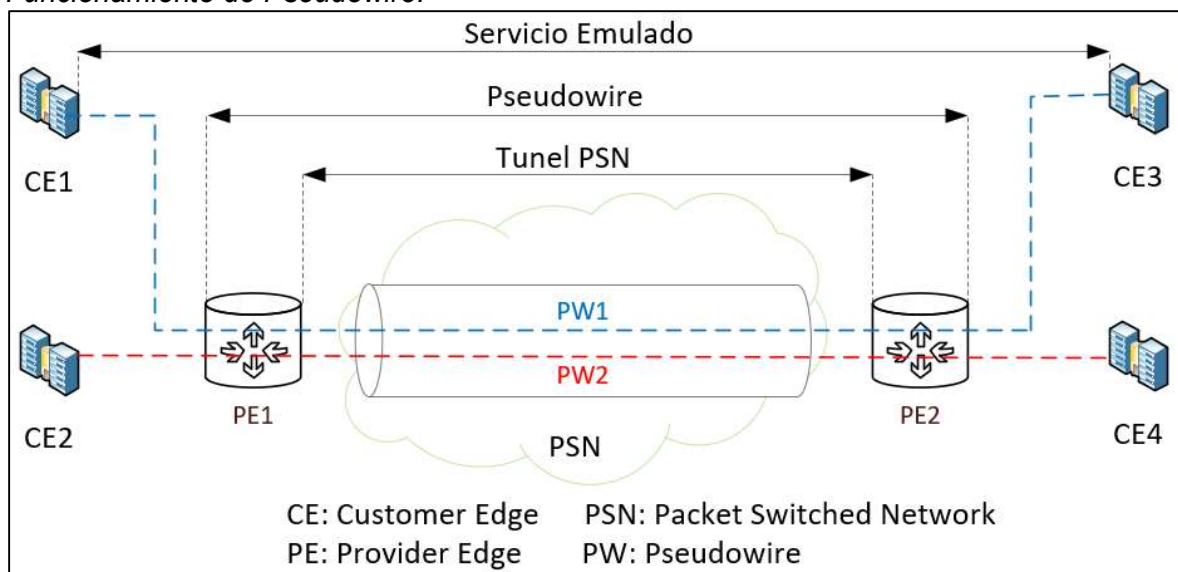
El término SCADA que proviene del acrónimo *Supervisory Control And Data Acquisition* (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Es un software implementado en un hardware, el cual permite supervisar y controlar procesos industriales remotamente. Entonces, definimos como sistema SCADA a la herramienta de automatización y control industrial utilizada en los procesos productivos, que realiza las funciones de controlar, supervisar, recopilar y analizar datos a distancia por medio de una aplicación o software. El sistema SCADA tiene una comunicación constante con equipos terminales como RTU o PLC, considerando las funciones ya antes mencionadas.

### 2.2.13 Pseudowire

El *pseudowire* o pseudocable se define en el RFC 3985, el cual menciona que es un mecanismo que emula los atributos esenciales de un servicio de telecomunicaciones (TDM, *Frame Relay*) a través de una red conmutada de paquetes. Además, se afirma que las funciones requeridas de los pseudocables incluyen encapsular flujos de bits, celdas o PDU específicos del servicio que llegan a un puerto de entrada y los transportan a través de una ruta IP o un túnel MPLS. En la figura 45, se muestra los extremos donde actúa el *pseudowire*. Los clientes CE pueden trabajar en una red TDM y, al ingresar al equipo proveedor PE, estos crean los *pseudowire* en los puertos de entrada para transportarlos en una red PSN (*Packet Switched Network*).

**Figura 45**

*Funcionamiento de Pseudowire.*



### 2.2.14 Protocolo SAToP

El protocolo SAToP (*Structure Agnostic TDM over Packet*), definido en el RFC 4553, es un método para encapsular flujos de bits en serie TDM (estructuras E1 completas) como *pseudowire* o pseudocables, que proporcionan las funciones de emulación y transporte para servicios TDM no canalizados; es decir, aborda toda la estructura TDM. Usado cuando se necesita el transporte de servicios basados en E1 sobre una red de paquetes. El *payload* del paquete SAToP tiene un número fijo de bytes donde siempre se

encapsulará una trama completa o múltiplos de tramas. Las implementaciones de SAToP deben ser capaces de admitir los siguientes tamaños de carga útil: 256 bytes para E1, 192 bytes para T1 y 1024 bytes para E3 o T3.

Este protocolo es el más simple de encapsular y desencapsular, por el cual suele usarse donde se tiene baja latencia y un ancho de banda considerable. En este protocolo no es posible encapsular solo algunos time slot de la trama E1. En la figura 46, se muestra el formato de encapsulación de un paquete SAToP según RFC 4553.

**Figura 46**

*Formato de encapsulación de un paquete SAToP.*



### 2.2.15 Protocolo CESoPSN

El protocolo CESoPSN (*Circuit Emulation Service over Packet Switched Network*), definido en el RFC 5086, es aquel método para encapsular tramas TDM como pseudocables o *pseudowires*, que proporcionan funciones de emulación y transporte de servicios TDM canalizados; es decir, CESoPSN identifica el formato de las tramas TDM.

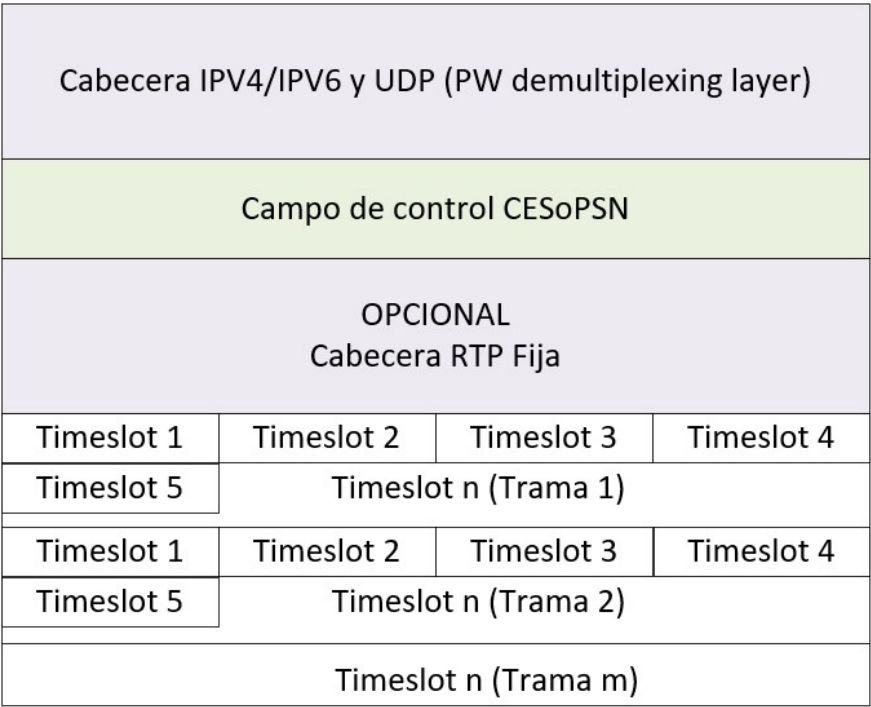
La utilidad de este protocolo se produce cuando el usuario necesita el transporte de servicios basados en *time slots* o intervalos de tiempo. En la figura 47, se muestra el formato de encapsulación de un paquete CESoPSN según RFF 5086, donde se observa que este protocolo encapsula *time slots* y no necesariamente una trama completa E1.

**Figura 47**

*Formato de encapsulación de un paquete CESoPSN.*

0

31

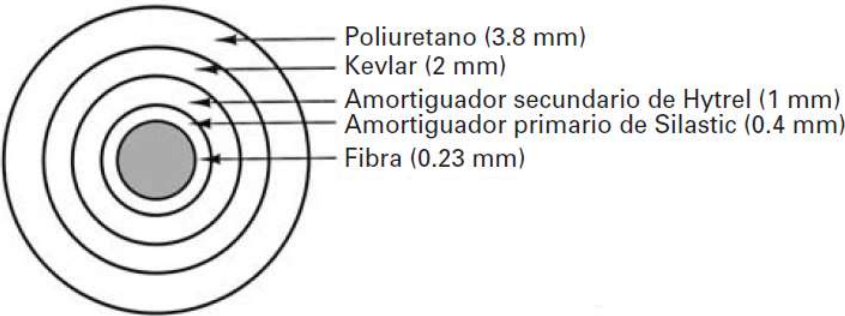


**2.2.16 Fibra óptica**

Es un medio físico utilizado para la transmisión de información, que consiste en un filamento de vidrio donde viajan los pulsos de luz láser o LED que contienen los datos a transmitir. En la figura 48, se muestra un ejemplo de estructura de una fibra óptica.

**Figura 48**

*Estructura de fibra óptica.*



*Nota:* adaptado de *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (p. 429), por Wayne Tomasi, 2003, Pearson Educación.

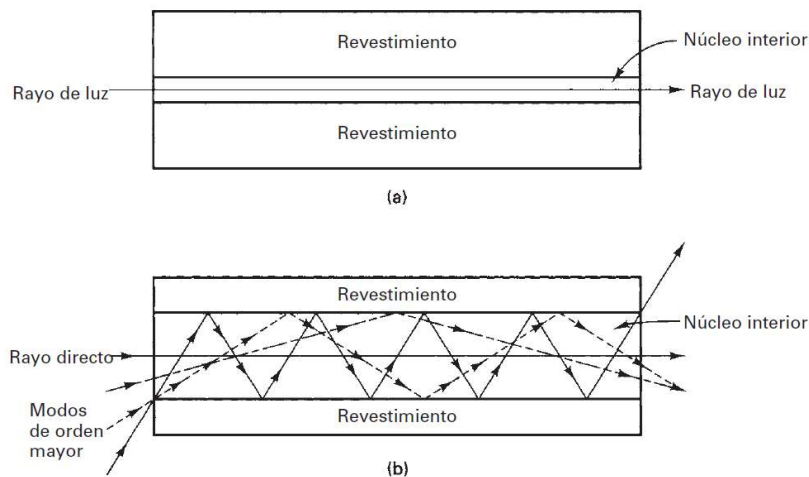
Existen dos modos de propagación: unimodal (fibras monomodo) y multimodal (fibras multimodo).

- Fibra monomodal: permite la propagación de un único modo de luz a través de la reducción del diámetro del núcleo de fibra. Esto permite enviar datos a larga distancia con un gran ancho de banda.
- Fibra multimodal: permite que los haces de luz se propaguen en más de una manera, lo cual incrementa el margen de error y, por consiguiente, no recomendable para largas distancias.

En la figura 49, se muestra los modos de propagación sobre una fibra óptica. Para el primer caso, (a) se visualiza la propagación de un rayo de luz sobre una fibra monomodal y, para el segundo caso, (a) sobre una fibra multimodal.

**Figura 49**

*Modos de propagación sobre la fibra óptica.*



*Nota:* adaptado de *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (p. 434), por Wayne Tomasi, 2003, Pearson Educación.

Entre los diferentes fenómenos que afectan a las transmisiones sobre fibra óptica se pueden enunciar los siguientes:

- Pérdida de potencia: Llamada también atenuación a la pérdida de potencia provocada al atravesar al cable. En la ecuación 1, se muestra el cálculo que se realiza para conocer esta atenuación.



$$A(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \quad (1)$$

Donde  $A(\text{dB})$ : atenuación total de la potencia

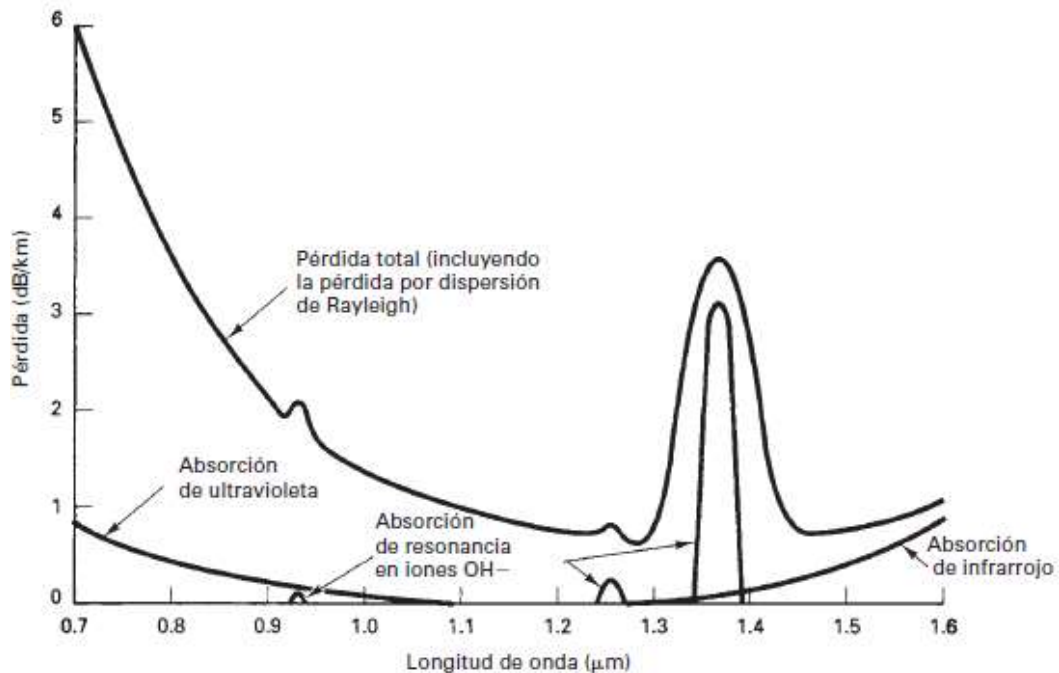
$P_{\text{sal}}$ : potencia de salida del cable (Watts)

$P_{\text{ent}}$ : potencia de entrada al cable (Watts)

- Pérdida por absorción: esta pérdida es análoga a la disipación de potencia en los cables de cobre, donde las impurezas que existen en la fibra absorben la luz y la convierten en calor. En la figura 50, se muestra la relación entre la longitud de onda y la pérdida por absorción.

**Figura 50**

*Pérdida por absorción de la fibra óptica.*



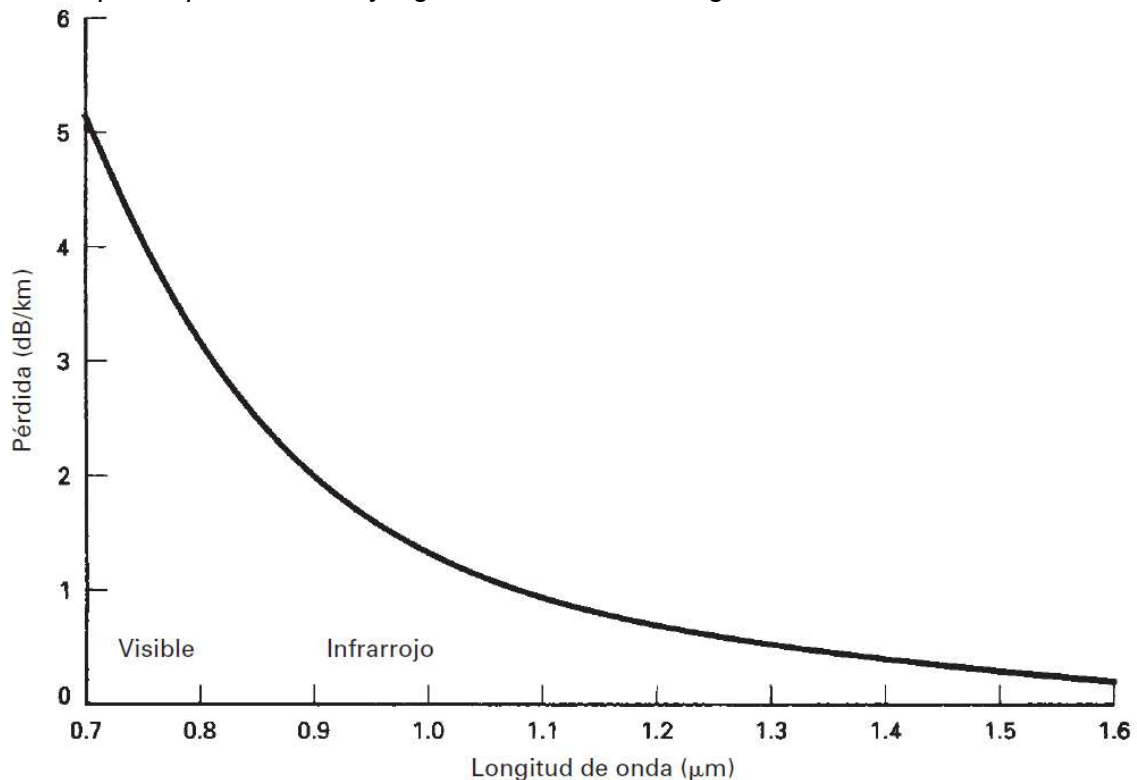
*Nota:* adaptado de *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (p. 445), por Tomasi, 2003.

- Dispersión cromática: retardo espectral de un pulso óptico conforme se propaga la luz por la fibra óptica.
- Pérdida por dispersión de *Rayleigh*: esta pérdida que ocurre en las fibras ópticas es debido a las impurezas producidas en el proceso de fabricación.

En la Figura 51 se muestra la relación entre la longitud de onda y la pérdida por dispersión de Rayleigh, el cual se visualiza que a mayor longitud de onda es menor la pérdida por dispersión de Rayleigh.

**Figura 51**

*Pérdida por dispersión de Rayleigh en función de la longitud de onda.*



*Nota:* adaptado de *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (p. 445), por Tomasi, 2003.

### **2.2.17 Interfaz RS-232**

El estándar recomendado 232 (RS-232, *Recommended Standard 232*) es una interfaz que designa un protocolo para un intercambio en serie de datos binarios entre un DTE (*Data Terminal Equipment*, equipo terminal de datos) y un DCE (*Data Communication Equipment*, equipo de comunicación de datos). Acepta la transmisión síncrona para velocidades hasta 128 Kbps y asíncrona para velocidades hasta 38.4 Kbps. Este estándar es compatible con V.24 y V.28.

### 2.2.18 Interfaz X.21

Interfaz estándar para comunicaciones seriales, definida en la recomendación ITU X.21. Acepta la transmisión síncrona para velocidades hasta 2048 Kbps y asíncrona para velocidades hasta 38.4 Kbps. Este estándar es compatible con X.24 y V11.

### 2.2.19 Interfaz G.703

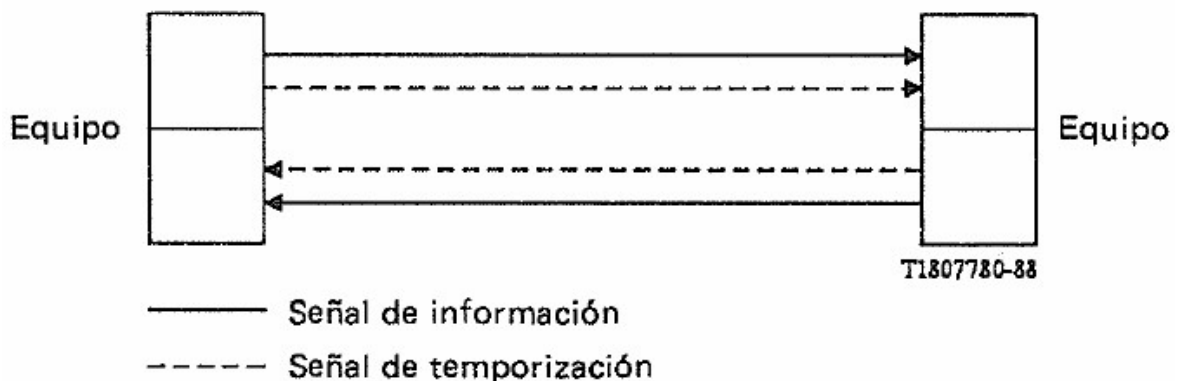
Es definida en la recomendación ITU-T G.703, donde se define las características físicas y eléctricas de la interfaz para transmitir voz o datos sobre canales digitales como los E1 (2.048 Mbps).

### 2.2.20 Interfaz G.703 codireccional

Es definida solo para 64 Kbps según la recomendación ITU-T G.703. El término codireccional se utiliza para describir una interfaz a través del cual la información y las señales de temporización asociadas se transmiten en el mismo sentido. En la figura 52, se muestra que la información y la señal de temporización van en el mismo sentido.

**Figura 52**

*Interfaz G.703 codireccional.*



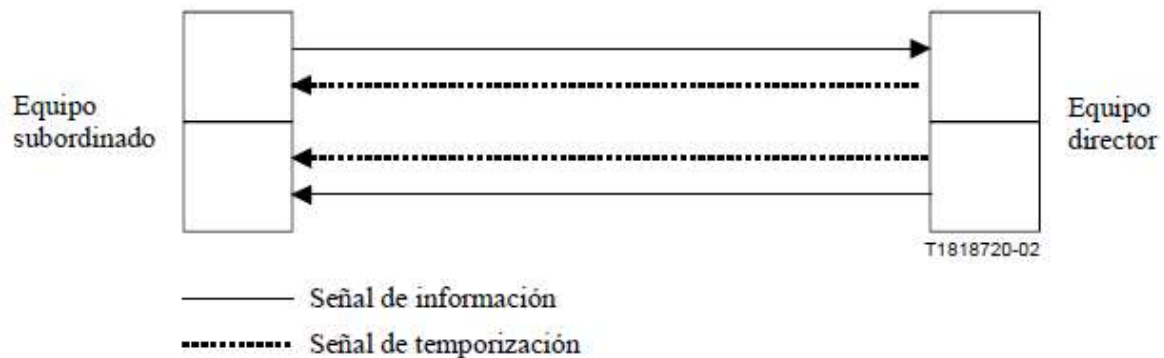
*Nota:* adaptado de *Características físicas y eléctricas de las interfaces digitales jerárquicas* (p. 4), por Recomendación de Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G.703, 2001.

En el caso de una interfaz G.703 contradireccional, el término contradireccional refiere a que las señales de temporización asociadas a ambos sentidos de transmisión se

dirigen hacia el equipo subordinado. En la figura 53, se muestra que la señal de temporización siempre va en un solo sentido del equipo director al equipo subordinado.

**Figura 53**

*Interfaz G.703 contradireccional.*



*Nota:* adaptado de *Características físicas y eléctricas de las interfaces digitales jerárquicas* (p. 5), por Recomendación de Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G.703, 2001.

#### **2.2.21 Protocolo IEC 101**

Proporciona un perfil de comunicación para enviar mensajes de telecontrol básicos, monitorización o supervisión de sistemas de energía entre una estación central hacia sus estaciones remotas. Se da por una comunicación serial asíncrona entre un DTE y DCE.

#### **2.2.22 Protocolo IEC 104**

Es una mejora de IEC 101, donde la comunicación se da a través de una red *Ethernet* utilizando el estándar TCP/IP.

#### **2.2.23 Interfaz IEEE C.37.94**

El estándar IEEE C.37.94 describe el uso de esta interfaz para la implementación de cualquier protocolo comunicaciones automáticas, transparentes entre dispositivos protección y multiplexores, utiliza la fibra óptica multimodo usando canales de  $n \times 64$  Kbps ( $n=1,2,3, \dots, 12$ ) para distancias de 2 km.

### **Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación**

En este capítulo se detalla los criterios de diseño para la elaboración de la arquitectura de la red troncal de multiplexores, que transportará servicios TDM y *Ethernet*, que cumplen con los estándares necesarios para el correcto funcionamiento de estos servicios. Además, se realizará la propuesta de gestión, implementación y puesta en servicio del proyecto para cumplir con los alcances solicitados.

#### **3.1 Diseño de la red troncal de multiplexores y sus servicios**

En primer lugar, se realizó un diagrama de bloques que represente, de manera resumida, la funcionalidad de la arquitectura de multiplexores tal como se muestra en la figura 54. Menciona detalles generales para el diseño de la red de multiplexores que se deben implementar soportando los servicios necesarios que se deben transportar.

Los equipos de teleprotección A y B tendrán en principio una comunicación punto a punto por medio de los multiplexores MUX 03-MUX 04, que usan interfaces seriales como X.21, G.703 codireccional (64 Kbps) e interfaz E1 G.703 por coaxial de 75 ohm. Estos equipos de teleprotección envían sus comandos (21 y 67N) uno al otro en respuesta a una falla en la línea de transmisión detectada por los relés. Estos canales deben cumplir con los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento. Además, se realiza un diseño que permita tener redundancia por la red TDM, por ejemplo, siguiendo la secuencia de los multiplexores MUX 03-MUX 02-MUX 01-MUX 04.

El relé-A y relé-B tienen una comunicación punto a punto por medio de los multiplexores MUX 03-MUX 04. Para este caso, se utiliza la interfaz que soporte el protocolo C37.94 entre el multiplexor y el relé. Se obtiene, de esta manera, que los relés tengan una comunicación para la función protección diferencial de línea (87L), el flujo de datos de esta función es constante. Por ello, se necesita tener un canal confiable; además, se debe considerar el ancho de banda debido a que el protocolo C37.94 acepta  $n \times 64$  Kbps ( $n=1,2,3,\dots,12$ ). Se plantea también tener rutas redundantes.

Cada uno de los RTU deben enviar y recibir datos, hacia y desde el SCADA, de los 2 centros de control. Por ejemplo, el RTU-A puede tomar la ruta MUX 03-MUX 04-MUX 01 para llegar al SCADA principal y tomar la ruta MUX 03-MUX 02 para llegar al SCADA respaldo. En el diseño del canal, se toma en cuenta que existen subestaciones eléctricas que tienen RTU que funcionan con protocolo serial IEC 101 (usando la interfaz RS 232) o protocolo *Ethernet* IEC 104. Para este servicio, también se plantea tener rutas redundantes para la comunicación hacia el SCADA de los 2 centros de control.

Para la red corporativa, se tiene un punto de conexión de internet en el *router* del Centro de Control 1. Es desde el multiplexor MUX 01, donde se diseñará los canales ethernet para transportar el internet por la red TDM, a todas las subestaciones eléctricas involucradas, llega como punto final a los *switch* de cada subestación y, desde ahí, distribuyendo el servicio a su red LAN correspondiente. Para este diseño, solo se considera, estrictamente, brindar el canal de comunicación o canal de transporte entre el *router* y los *switch*. El diseño del sistema permite ser actualizable y escalable en el futuro.

Se selecciona un GPS externo adecuado, que se ubicará el Centro de Control 1. En principio, este GPS debe sincronizar al MUX 01 con una señal de 2 MHz, luego, desde este multiplexor MUX 01, se distribuirá la señal de sincronismo a todos los multiplexores por la red SDH. Esto por la necesidad de tener toda la red sincronizada con el fin de no tener errores en el envío de tramas para los servicios de misión crítica.

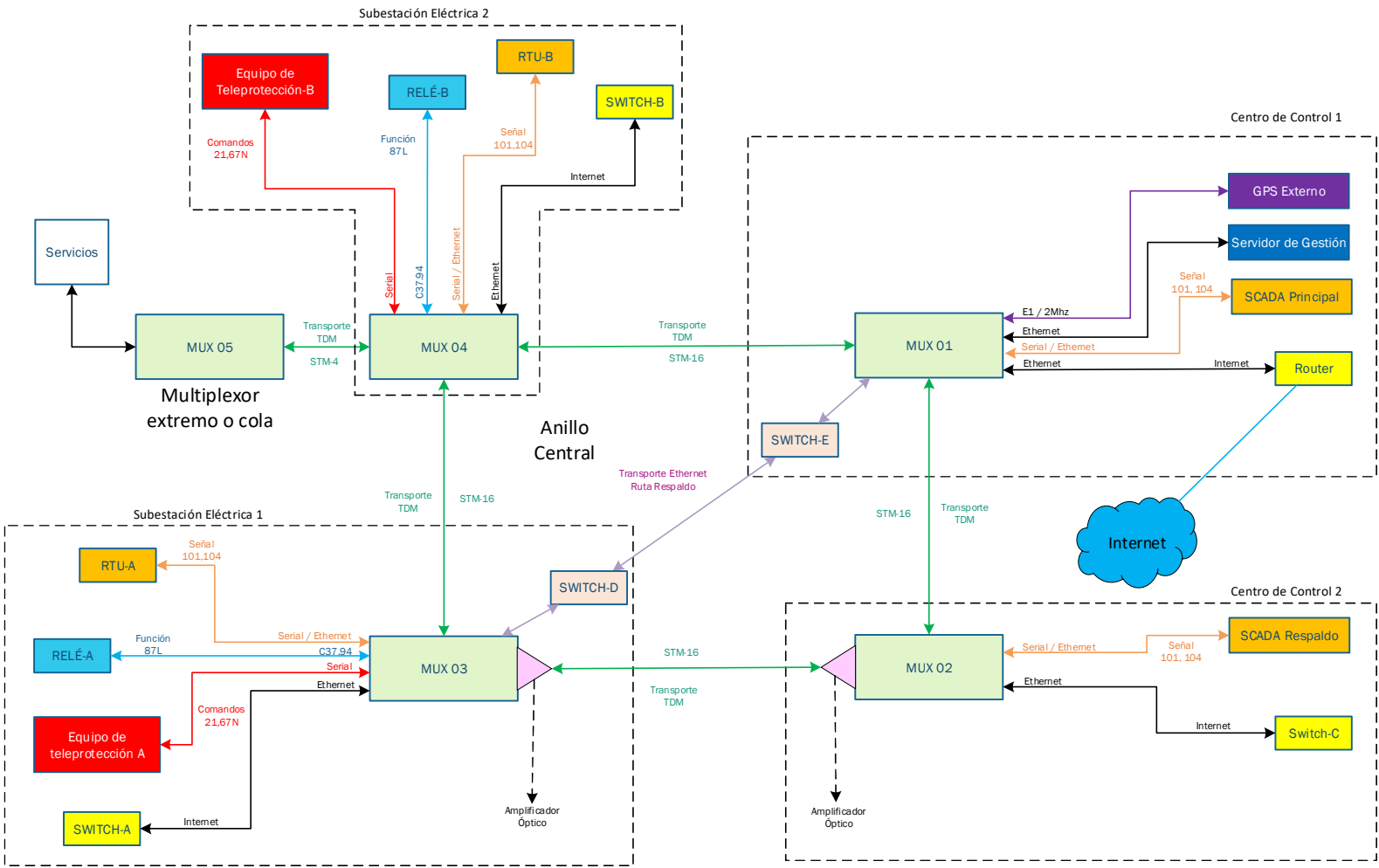
En el Centro de Control 1, se tendrá un servidor de gestión. El cual, mediante una conexión *Ethernet* al multiplexor MUX 01, se podrá gestionar a todos los multiplexores de la arquitectura SDH, por medio de la cabecera MSOH de la trama SDH y usando el protocolo OSPF integrado en el multiplexor.

Se deben instalar amplificadores ópticos entre multiplexores, en caso la distancia sea mayor al alcance de los SFP.

Se tiene un canal *Ethernet* para proponer una ruta redundante, que aprovecha un enlace existente entre *Switch-D* y *Switch-E*. Por este canal se transportarán servicios de IEC 101.

Figura 54

Diagrama de bloques sintetizado de la red de multiplexores

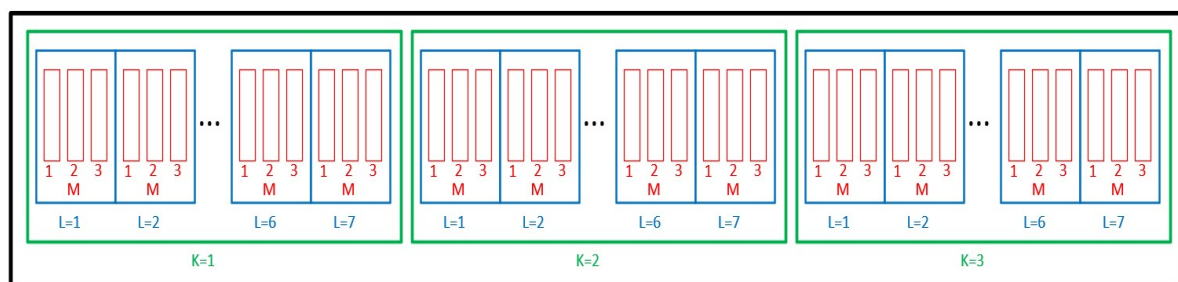


Para realizar el diseño en la distribución de tramas para los servicios, se debe tomar en cuenta algunos términos y consideraciones. A nivel de tramas, los servicios PDH serán insertados en contenedores virtuales VC12 (que tienen 32 time slots según estándar), que pertenecen a un nivel jerárquico bajo de SDH (VC12=2.048 Kbps). El multiplexor elegido tiene 64 contenedores virtuales VC12 para utilizar. Este contenedor virtual VC12 es insertado en un canal de ubicación KLM, que pertenece a un contenedor superior llamado VC4 (un VC4 tiene 63 canales de 32 time slots). KLM es la ubicación del servicio dentro de los 63 canales que tiene una trama básica STM-1 o equivalente a un VC4, tal como se muestra en la figura 55.

**Figura 55**

*Numeración KLM en SDH.*

Trama STM-1: Contiene 63 canales

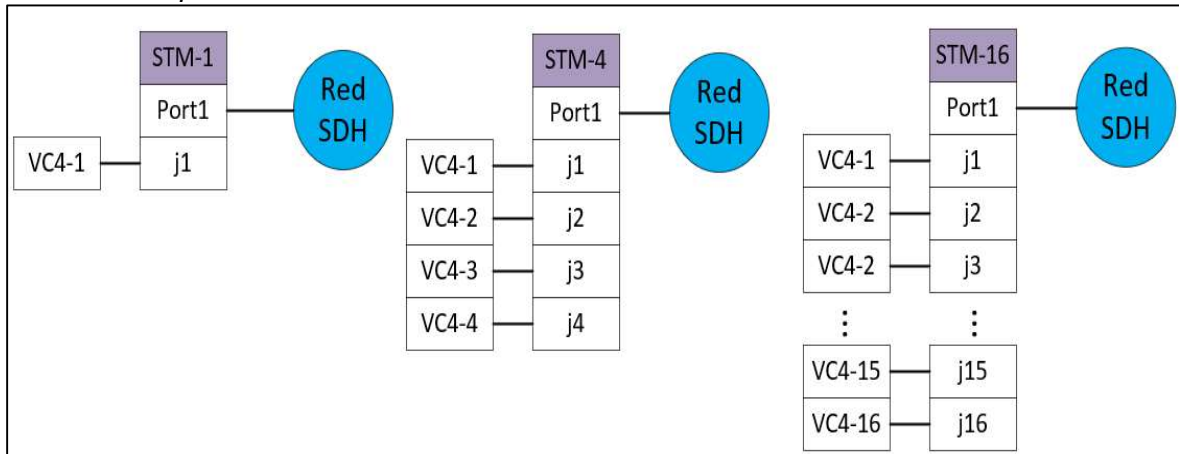


Una vez que el servicio llegue al contenedor virtual VC4, este se ingresa a la trama STM-N. Una trama STM-1 contiene un contenedor virtual VC4, una trama STM-4 contiene 4 contenedores virtuales VC4 y una trama STM-16 contiene 16 contenedores virtuales VC4. Esta cantidad de contenedores VC4 serán nombrados como “j” dependiendo de la capacidad de enlace que se considera para el diseño. Una vez formada la trama, esta es enviada por el puerto designado tal como se muestra en la figura 56.



**Figura 56**

*Niveles de capacidad de enlace en el enlace SDH.*

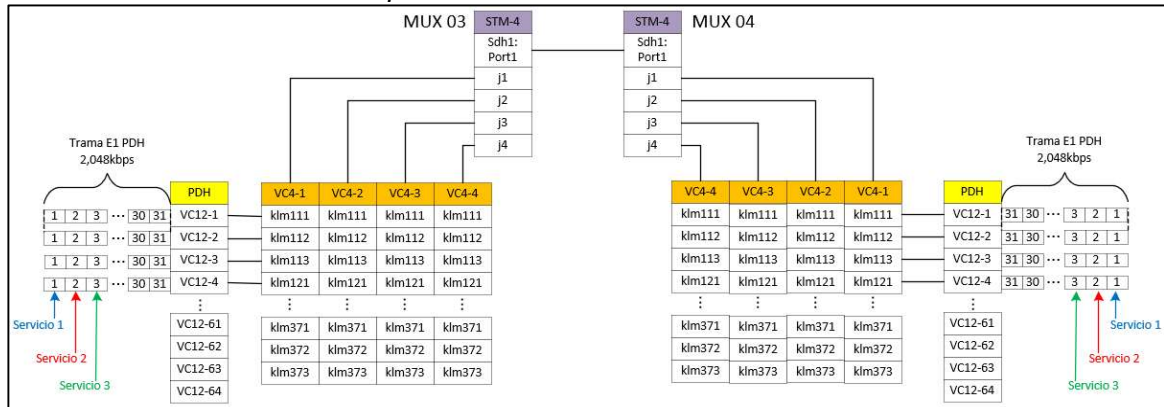


Para dimensionar las capacidades de enlace, se va a considerar, en el diseño, tener la capacidad de STM-16 (2.5 Gbps) en el anillo central donde se concentre el tráfico y se considerará enlaces STM-4 (622 Mbps) para los puntos extremos o colas donde no formen parte del anillo.

Según lo explicado líneas arriba, en la figura 57, se observa el procedimiento de entramado del multiplexor para transportar servicios PDH hacia una trama STM-4 de SDH. Los servicios 1, 2 y 3 pueden ser insertados en *time slots* de un único contenedor virtual. Por ejemplo, se elige el VC12-4 (considerando que los servicios ocupan 1 TS). Este VC12-4 es ingresado en el KLM121 del contenedor virtual VC4-1, a su vez este último contenedor es ingresado en el KLM121 del contenedor virtual VC4-1, a su vez este último contenedor es ingresado en j1 de la trama STM-4, transportándose luego por el puerto 1 del multiplexor MUX 03 y llegando al puerto 1 del multiplexor MUX 04, luego este último multiplexor realiza la operación inversa y desagrega el servicio. La tarjeta SAMO2 es quien realizará este procedimiento de conectar los contenedores virtuales para llevar un servicio PDH hacia la red SDH.

**Figura 57**

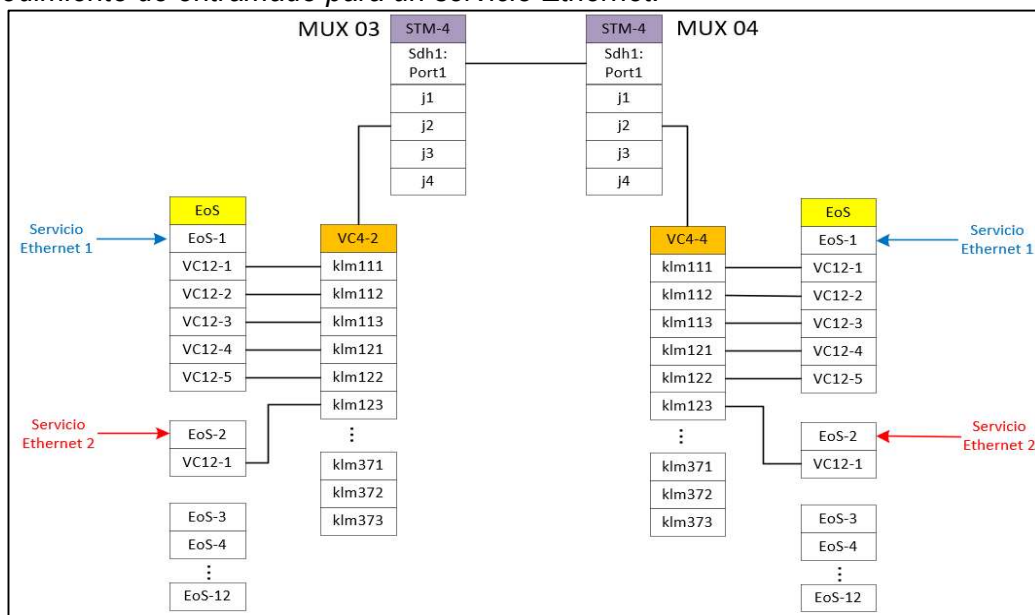
*Procedimiento de entramado para un servicio PDH.*



Para transportar el servicio *Ethernet* sobre la red SDH (EoS) se realiza un proceso similar a lo mencionado anteriormente. Primero, se dimensiona el ancho de banda del canal *Ethernet* considerando que cada VC12 es, aproximadamente, 2 Mbps; entonces, si se desea tener un canal de 10 Mbps, el canal EoS debe contener 5 veces VC12. Luego, se procede a canalizar a los contenedores superiores hasta formar la trama completa. En la figura 58, se observa el servicio *Ethernet* 1 de 10 Mbps y el servicio *Ethernet* 2 de 2 Mbps.

**Figura 58**

*Procedimiento de entramado para un servicio Ethernet.*

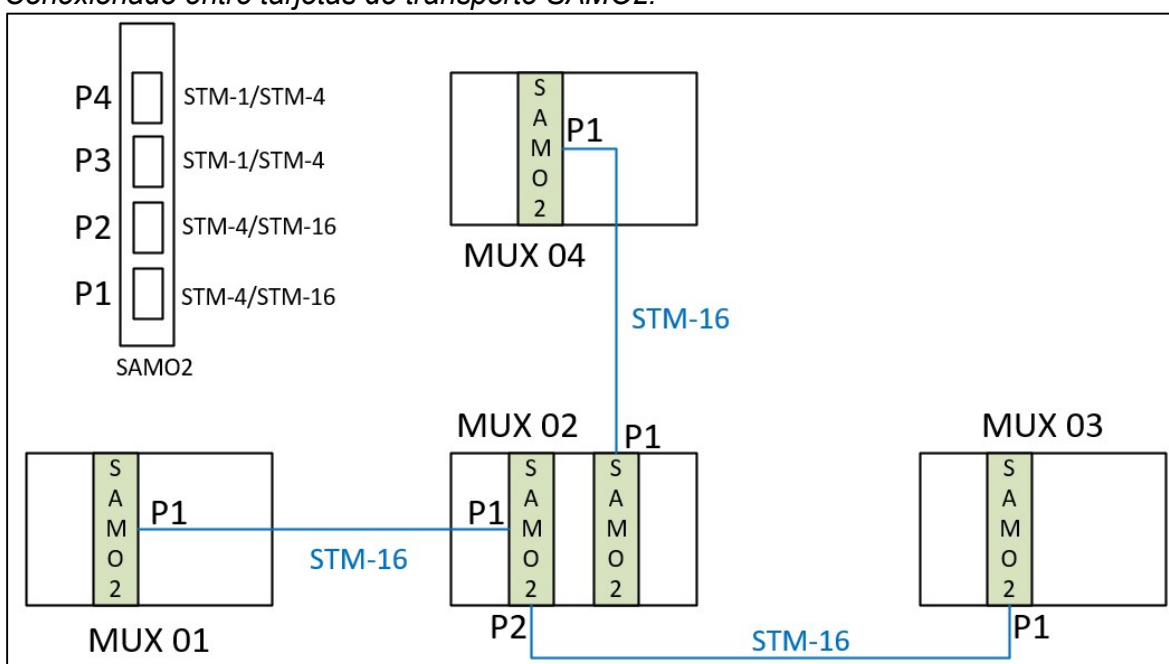


Los contenedores virtuales VC12 serán configurados como PCM30C; es decir, no se considerará el *time slot* 16 (*time slot* para señalización de voz) y se tomará en cuenta con el algoritmo de corrección de errores CRC-4.

Los enlaces desde cada multiplexor para el anillo central, donde se concentrará todo el tráfico, deben ser de capacidad STM-16 (2.5 Gbps); entonces, considerando que la tarjeta SAMO2 solo cuenta con 2 puertos STM-16 configurables (puerto 1 y 2), el multiplexor debe tener 2 tarjetas SAMO2, para el caso que se desee establecer 3 enlaces STM-16 como en el MUX 02. En la figura 59, se muestra el conexionado y uso de la tarjeta SAMO2 para lograr 3 enlaces STM-16.

**Figura 59**

*Conexionado entre tarjetas de transporte SAMO2.*



Para el caso que el multiplexor tenga 3 enlaces STM-4, es necesario solo una tarjeta de transporte SAMO2, debido a que esta cuenta con 4 puertos configurables con esta capacidad.

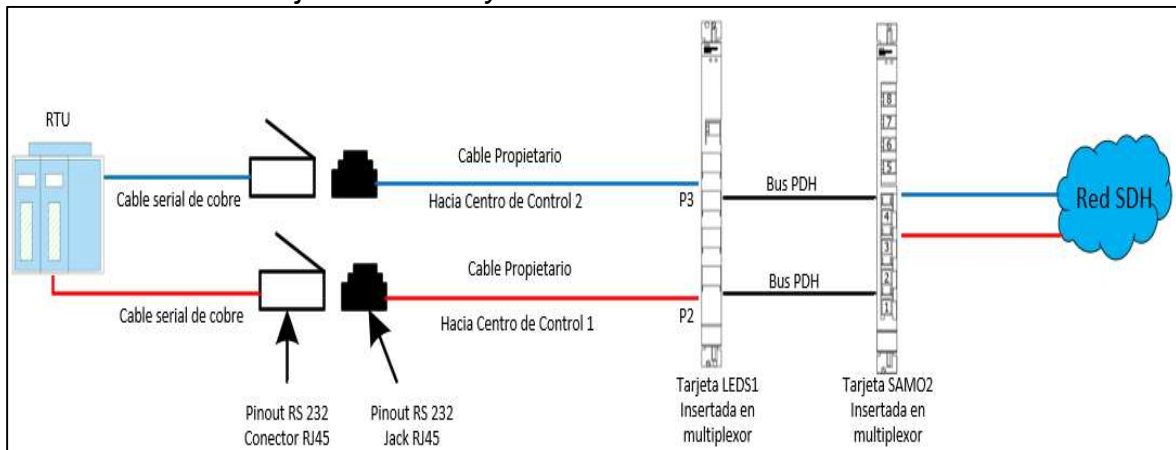
### 3.1.1 Diseño del canal de comunicación para las señales del protocolo IEC 101 y protocolo IEC 104 hacia los 2 centros de control

**A. Servicio IEC 101.** Para este servicio, se usará la tarjeta LEDS1. Se debe considerar los requerimientos siguientes: la tasa de bits o baudios el cual trabaja el RTU, de modo que se establezca el mismo valor en la interfaz de la tarjeta, establecimiento del modo de transmisión asíncrono para este servicio, ya que los RTU trabajan de esta manera actualmente, y contar con 2 canales desde el RTU hacia los 2 centros de control.

La tasa de bits o los baudios varían para cada RTU según información del proyecto, donde los más comunes son 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 bps (bits por segundo). Para la interconexión entre el multiplexor y el RTU, se usa un cable serial (hilos de cobre) con el *pinout* correspondiente para el estándar RS 232 (en el anexo 1 se muestra el *pinout* para el estándar RS232). En la figura 60, se muestra que desde el RTU salen 2 cables seriales de cobre. Uno dirigido hacia el Centro de Control 1 y el otro hacia el Centro de Control 2, conectados a los puertos de la tarjeta de servicio LEDS1 (por ejemplo, puerto 2 y puerto 3). Estos puertos son configurados para soportar el estándar RS 232 (equivalente a los estándares V.24 y V.28). Luego, desde esta tarjeta LEDS1 se canaliza a la tarjeta SAMO2 para ser transportada por la red SDH.

**Figura 60**

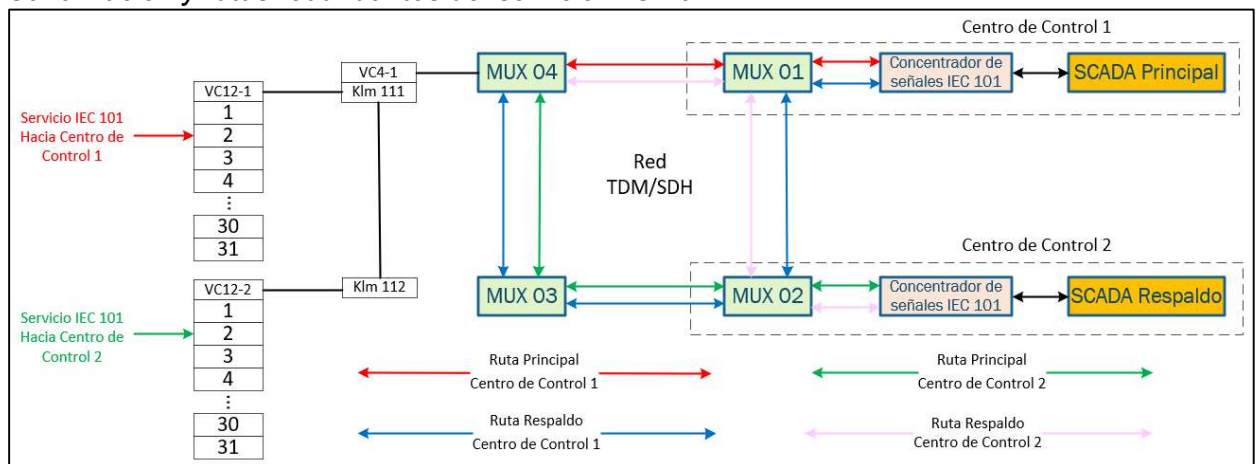
*Interconexión entre tarjeta la LEDS1 y RTU.*



Para este servicio, se diseñarán canales redundantes por la red TDM/SDH, se tiene en consideración que la señal del RTU debe ir hacia los 2 centros de control, esto quiere decir, crear 2 canales en el multiplexor. En la figura 61, se observa que los servicios IEC 101 se insertan en el *time slot* 2 del contenedor virtual VC12 (se debe tener en cuenta que cada RTU de la subestación eléctrica estará asignado a un único y distinto *time slot* en toda la red SDH), entonces la señal que va hacia el Centro de Control 1 se inserta en el *time slot* 2 del contenedor virtual VC12-1 y la señal que se dirige hacia el Centro de Control 2 se inserta en el *time slot* 2 del contenedor virtual VC12-2. Estos 2 contenedores virtuales insertados en los KLM111 y KLM 112 siguiendo con el entramado STM-N, teniendo habilitado los canales TDM (ruta principal y respaldo) en todos los multiplexores. Estos llegarán hasta los multiplexores MUX 01 y MUX 02 de los centros de control, donde se desagregarán los servicios llegando a un equipo concentrador de señales IEC 101, para que luego sea enviado a los sistemas SCADA. Es de esta manera, estas señales tienen alta disponibilidad ante cualquier evento de corte de enlace por fibra óptica en un par de multiplexores de transporte.

**Figura 61**

*Canalización y rutas redundantes del servicio IEC 101.*

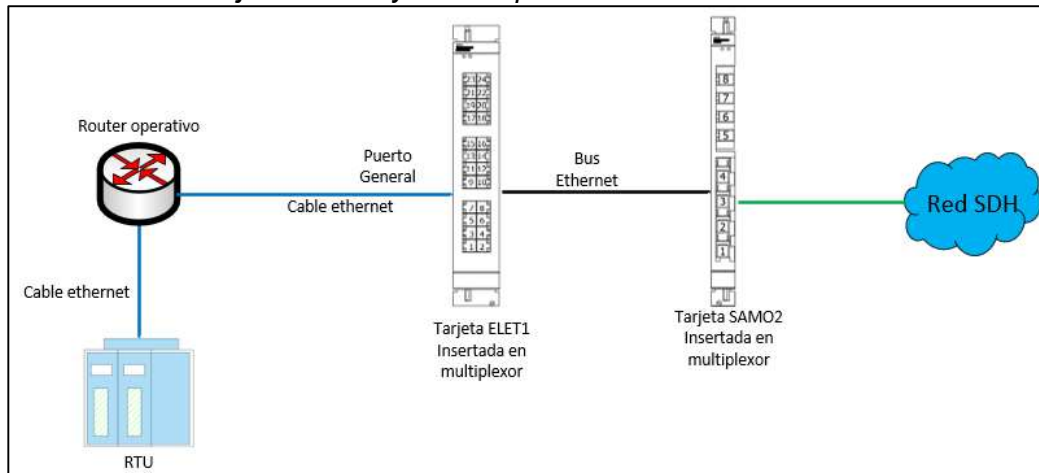


**B. Servicio IEC 104.** Para este servicio, se usará la tarjeta ELET1 en el multiplexor, debido que este servicio es del tipo *Ethernet*. Se debe crear un canal EoS en la tarjeta SAMO2, asignarlo a una VLAN y canalizarlo a la red SDH. En la figura 62, se muestra que

la interconexión entre el multiplexor y el RTU se realiza mediante un cable *Ethernet* CAT6, tiene como equipo intermedio un *router* operativo, además el puerto de la tarjeta ELET1 se debe configurar como “Puerto General” donde se asigna la VLAN correspondiente que se desea transportar.

**Figura 62**

*Interconexión entre tarjeta ELET1 y router operativo IEC 104.*



Para establecer el canal EoS para el servicio IEC 104, primero se definirá su ancho de banda. En la ecuación 2, se muestra el cálculo básico para obtener la cantidad de VC12 que se necesita para canalizar el EoS.

$$\text{Ancho de banda (Mbps)} = 2x(\#VC12) \quad (2)$$

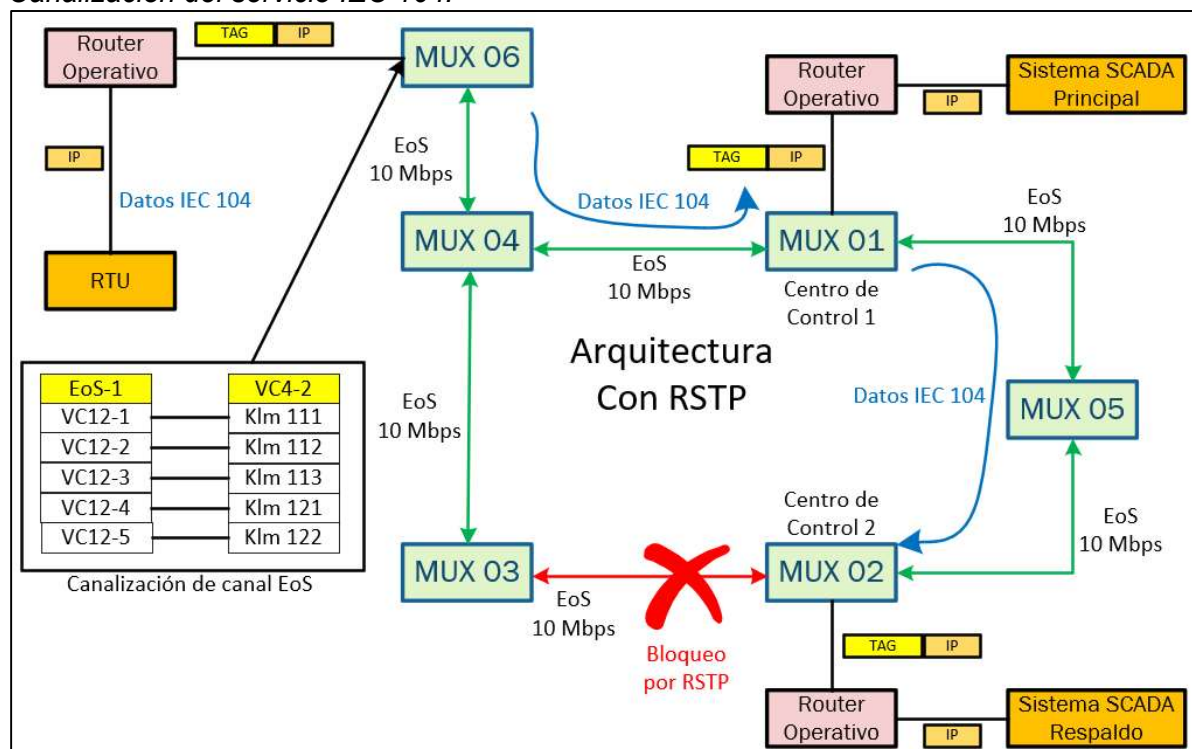
Para el diseño del canal, se propuso un ancho de banda de 10 Mbps (debido al bajo consumo del servicio IEC 104), entonces, según la ecuación anterior, se necesitaría considerar 5 contenedores virtuales VC12. Estos contenedores serán insertados en los KLM correspondientes a un VC4 para formar la trama STM-N y transportarlos a la red SDH.

En la figura 63, se muestra que el multiplexor MUX 06 recibirá tramas *Ethernet* con un tag de VLAN específico (cada *router* operativo de las subestaciones tendrán asignados un tag de VLAN distintos), por lo cual el multiplexor debe ser configurado para aceptar este tag de VLAN. Para usar los canales redundantes y al ser un servicio que se transporta por ethernet, se usará el protocolo RSTP en los canales EoS, que estarán habilitados en toda

la red de multiplexores. Este protocolo detectará el bucle y automáticamente bloqueará un enlace. Para el diseño de esta arquitectura, se establecerá una prioridad baja en el multiplexor MUX 01 para que este funcione como *Root Bridge* según protocolo RSTP, y con esto según definición, los enlaces con el nodo *Root Bridge* nunca serán bloqueados. Esta decisión se toma debido a que el multiplexor MUX 01 es el punto de conexión hacia el sistema SCADA Principal.

**Figura 63**

*Canalización del servicio IEC 104.*



### 3.1.2 Diseño del canal de comunicación para los servicios de Teleprotección y Protección diferencial de línea

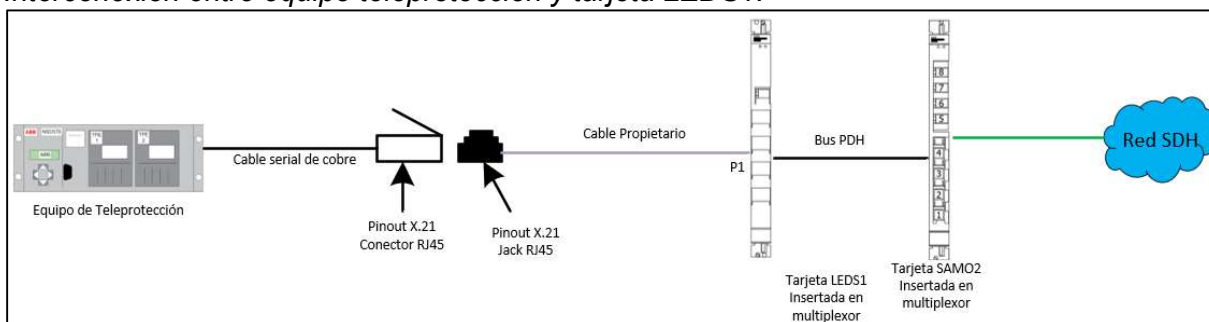
Para diseñar el canal de servicio de teleprotección (donde se envían los comandos de las funciones 21 y 67N) y protección diferencial de línea (donde se transmite la comunicación de la función 87L) se debe considerar los protocolos que están trabajando actualmente en las subestaciones eléctricas.

**A. Canal de Teleprotección.** Para satisfacer los requerimientos de este canal, se debe considerar la tarjeta en el multiplexor según protocolo de comunicación, teniendo en cuenta 3 tipos de interfaces X.21 (tarjeta LEDS1), G.703/E1 (Tarjeta LEDE1), y G.703 codireccional (Tarjeta LECO1).

- Para la interfaz X.21, es configurable la tasa de bits desde 0.6 Kbps hasta 2.048 Kbps en modo síncrono; sin embargo, para este diseño se considera una tasa de 64 Kbps que ocupa un *time slot* en el bus PDH (esto debido a que el equipo de teleprotección existente funciona a esta tasa de bits). Luego, la trama es enviada a través de la red SDH, además, se debe preparar un cable serial (hilos de cobre) con el *pinout* correspondiente para la interconexión entre el multiplexor y el equipo de teleprotección (en el anexo 1 se muestra el *pinout* para el estándar X.21). En la figura 64, se muestra la interconexión entre el equipo de teleprotección y la tarjeta LEDS1 del multiplexor.

**Figura 64**

*Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LEDS1.*



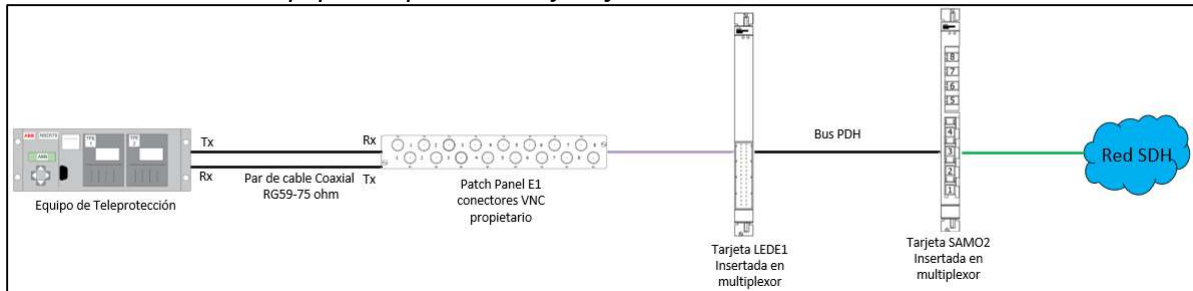
- Para la interfaz G.703/E1 de teleprotección, se usa un canal transparente de la trama E1 de 32 *time slots* para transferencia de comandos por la red TDM (esto es debido a que se debe mantener el canal de comunicación existente). Este canal creado en el bus PDH es luego transportado por la red troncal SDH. Para la interconexión entre el multiplexor y el equipo de teleprotección, se usa un par de cables coaxiales RG59 de impedancia 75 ohm. En la figura 65, se muestra el uso



del cable coaxial RG59 para conectar el equipo de teleprotección y la tarjeta LEDE1 del multiplexor.

**Figura 65**

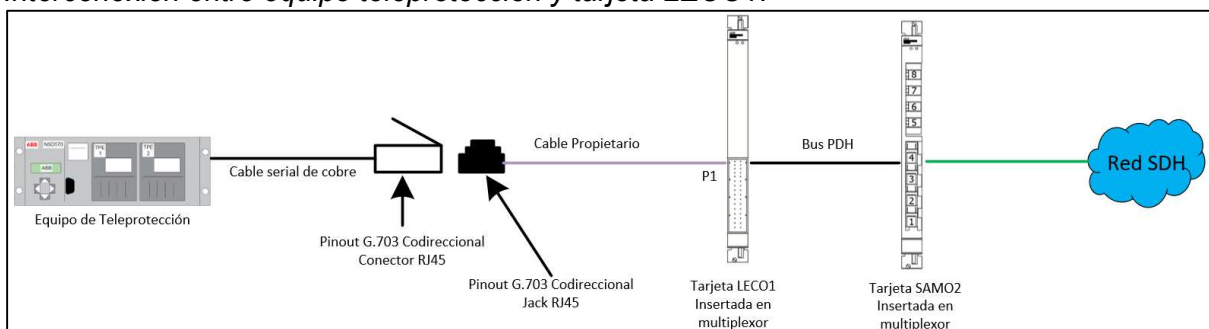
*Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LEDE1.*



- La interfaz G.703 codireccional ofrece un canal único de 64 Kbps, el cual será insertado en un *time slot* del *bus* PDH, para luego ser transportado por la red SDH. La interconexión entre el multiplexor y el equipo de teleprotección es un cable serial (hilos de cobre) con el *pinout* correspondiente para este estándar (en el anexo 1 se muestra el *pinout* para el estándar G.703 codireccional). En la figura 66, se muestra la interconexión entre el equipo de teleprotección y la tarjeta LECO1 del multiplexor.

**Figura 66**

*Interconexión entre equipo teleprotección y tarjeta LECO1.*

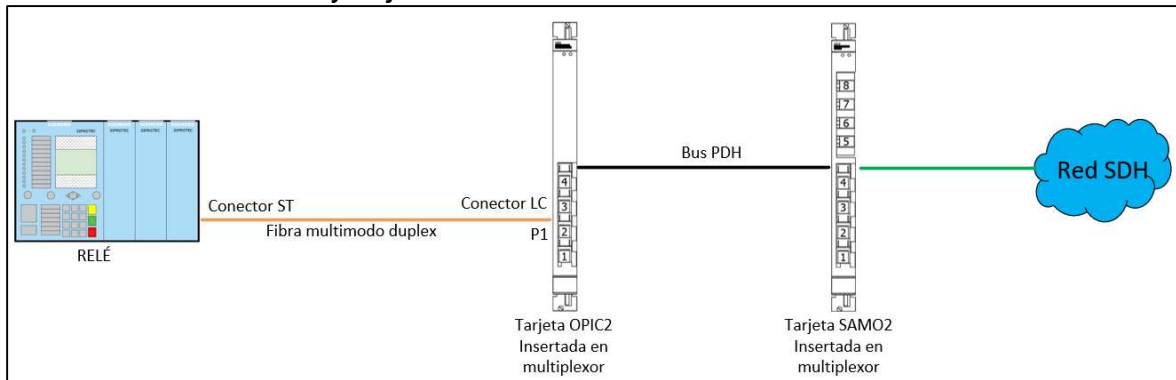


**B. Canal Protección Diferencial de Línea.** Este canal es aquel donde los relés intercambiarán datos constantemente, comparando la magnitud y fase de la corriente en la línea de transmisión. Debido a esta importancia en la funcionalidad de la protección diferencial de línea, se usará la interfaz C37.94, donde se tiene, como medio físico, la fibra

óptica multimodo para interconectar el multiplexor y el relé según se muestra en la figura 67, además de considerar un SFP que soporte el protocolo C37.94 en el multiplexor. El canal para la protección diferencial será  $n \times 64$  Kbps ( $n=1, 2, 3, \dots, 12$ ), el cual, para este diseño, considerará 1 *time slot* ( $n=1$ , 64 Kbps), debido a que los equipos relés están configurados con ese ancho de canal. Se puede agregar un *time slot* adicional para monitorear el rendimiento del canal de extremo a extremo. Esta funcionalidad se llama PMTS (*Performance Monitoring Time Slot*). Por consiguiente, el canal total de este enlace para el diseño será 128 Kbps (2 *time slots*).

**Figura 67**

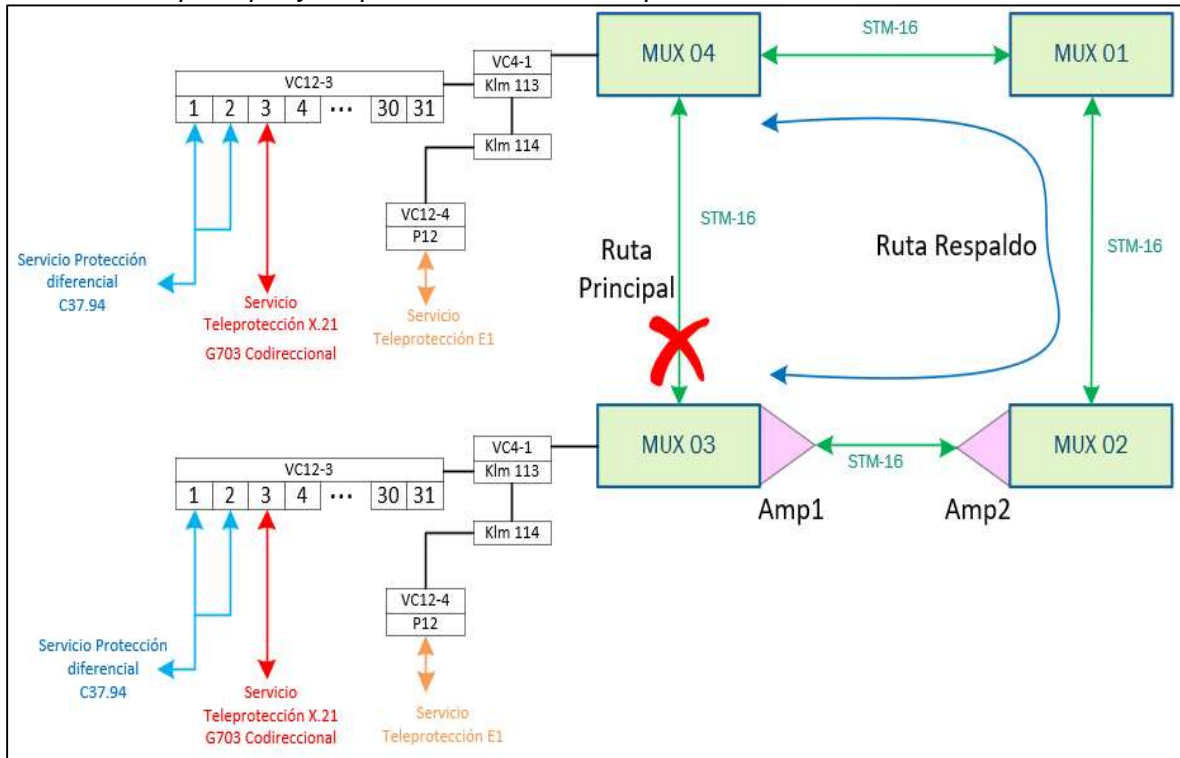
*Interconexión entre Relé y tarjeta OPIC2.*



En la figura 68, se muestra, en resumen, el canalizado de los servicios de teleprotección y protección diferencial que fueron mencionados anteriormente. Estos servicios son canalizados en *time slots* a diferencia del servicio de teleprotección por E1, que necesita un canal transparente de 32 *time slots* (P12, E1 completo), esto según requerimiento del equipo de teleprotección para usar esa interface. Además, como se mencionó anteriormente, para el diseño se ha considerado tener un canal redundante; es decir, en caso falle el enlace entre los multiplexores MUX 03 y MUX 04, ya sea por rotura de la fibra óptica o por mantenimiento de este, automáticamente el canal debe conmutar para que los servicios pasen por la ruta de respaldo. A esto llamamos canales protegidos.

**Figura 68**

*Canalización principal y respaldo de servicios de protecciones.*

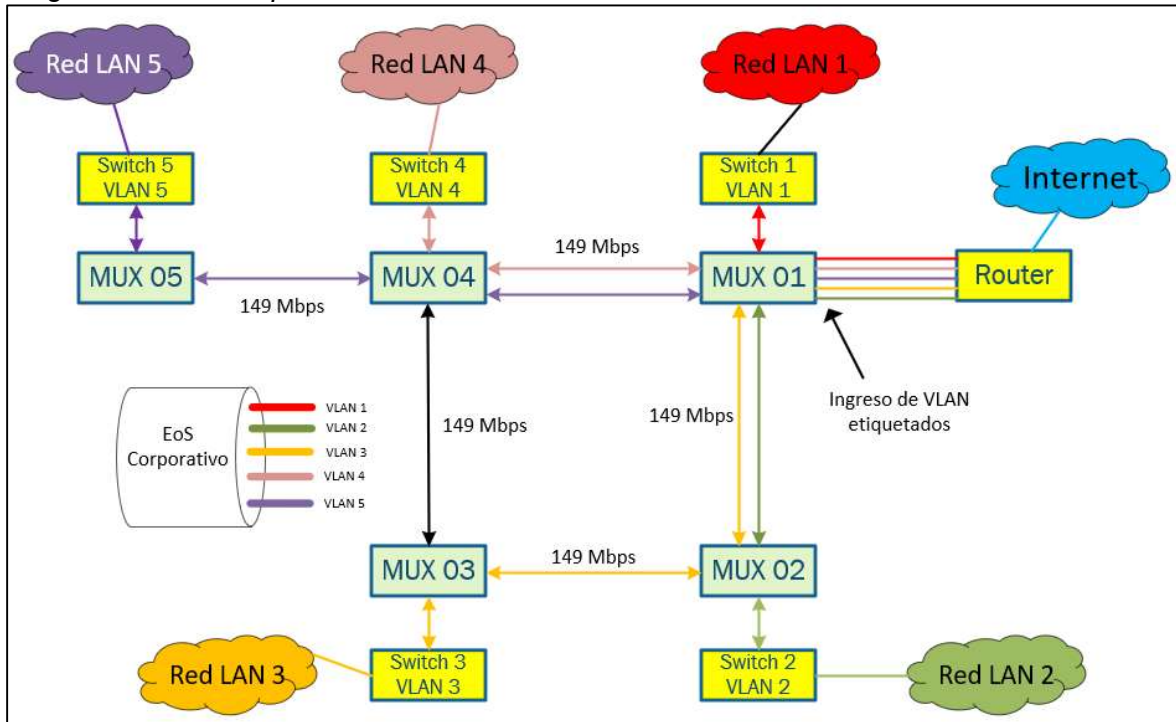


### 3.1.3 Diseño del canal de comunicación para la red corporativa

Para la red corporativa (servicio de internet), se crea un canal EoS independiente, se asigna una VLAN para cada *switch* de las subestaciones. Para el diseño de este canal, se establecerá un ancho de banda de 1 VC4 (149 Mbps aproximadamente). En la figura 69, se muestra un *router* con salida a internet, que es el que distribuirá este servicio a todos los *switches* de las subestaciones eléctricas con una etiqueta de VLAN. El multiplexor MUX 01 recibirá los datos etiquetados por un puerto, que será configurado como "Puerto General" donde se declararán las VLAN y los transportará a todos los multiplexores por medio del canal EoS. Este EoS tendrá un camino único y contendrá a todas las VLAN correspondientes.

**Figura 69**

*Diagrama de red corporativa.*



### **3.1.4 Diseño de la arquitectura de sincronismo**

Para diseñar la arquitectura de sincronismo, se debe tener en cuenta el punto de inicio en donde se instalará el GPS externo.

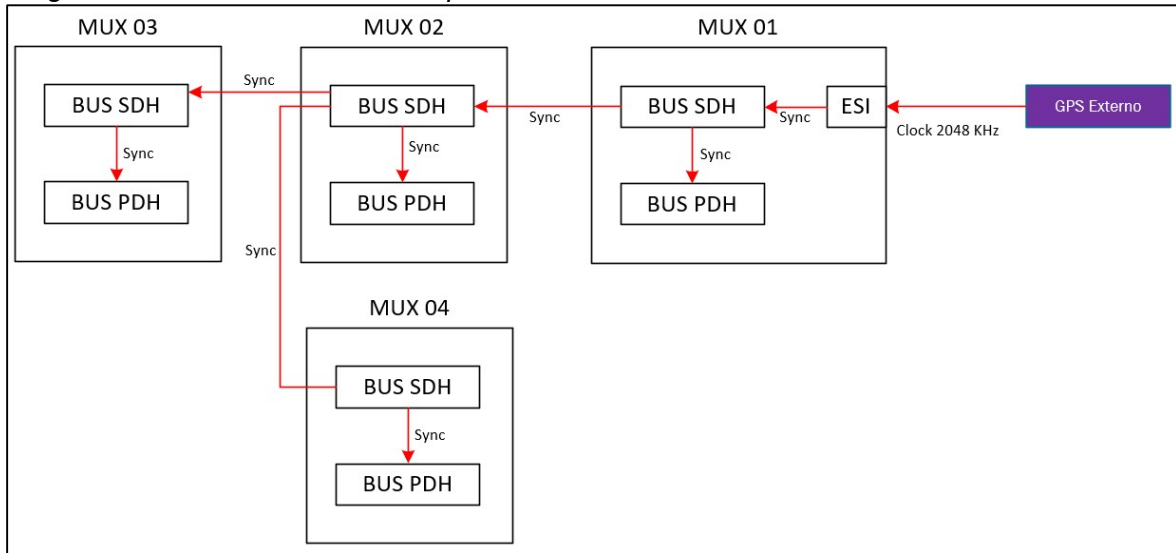
En la figura 70, se muestra como el GPS externo sincroniza al multiplexor MUX 01 por su interfaz ESI (*External Synchronous Input*), recibe una señal de 2048 KHz (señal que el multiplexor necesita, según manual de fabricante, para sincronizar o distribuir el sincronismo a los demás multiplexores por la red SDH). Esta señal sincroniza, automáticamente, el bus SDH y, luego, el bus PDH del multiplexor MUX 01. El sincronismo es enviado por las interfaces SDH hacia los demás multiplexores, el siguiente multiplexor MUX 02 recibe esta señal sincronizando, de igual manera, primero su bus SDH y, luego, su bus PDH. Una vez recibido el sincronismo, el multiplexor reenvía la señal de 2048 KHz a todas sus interfaces, menos a la interfaz por donde recibió esta señal, y se repite el mismo procedimiento para los siguientes multiplexores MUX 03 y MUX 04. La recomendación que se tiene es que, para el diseño de arquitectura, se debe limitar hasta

máximo 15 saltos de multiplexor a multiplexor, pasado este límite se recomienda colocar otro GPS externo.

Tener la red sincronizada asegura el correcto envío y recepción de las tramas, no produciéndose errores, siendo así de importancia para el tráfico de datos críticos.

**Figura 70**

*Diagrama de sincronismo de multiplexores.*



### 3.1.5 Diseño del canal de comunicación para la gestión de multiplexores

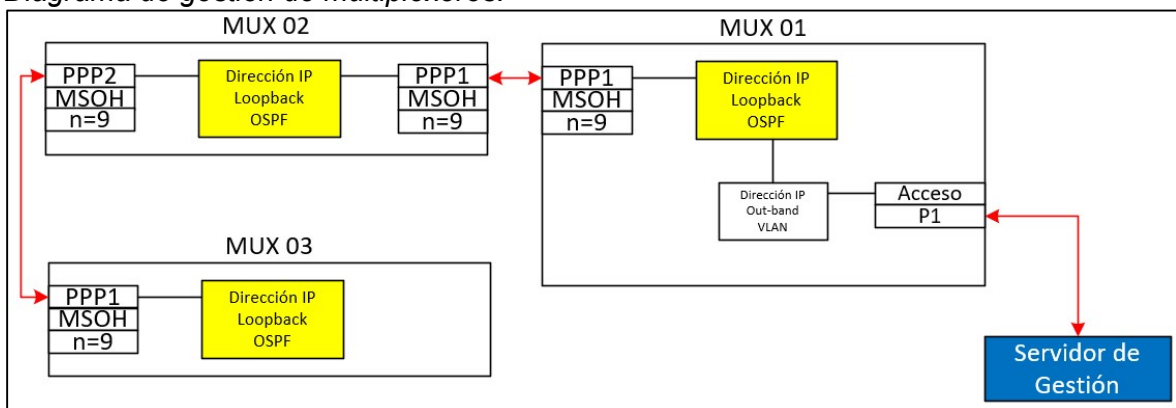
Para el diseño del canal de la gestión de multiplexores, se toma en cuenta la recomendación ITU G.784 (Gestión de la Jerarquía Digital Síncrona), donde se explica el funcionamiento de las cabeceras MSOH y RSOH de la trama STM-N. Para este diseño, se toma en cuenta la cabecera MSOH que ocupa 9 *time slots*. Además, se debe considerar que, para la intercomunicación de los multiplexores a nivel de gestión, se realizará por el protocolo punto a punto (PPP). Esto en conjunto con el protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*) para enlazar las direcciones *loopback* de gestión de cada multiplexor; para ello, se debe diseñar una tabla de direcciones IP de *loopback* correspondiente a cada multiplexor en la arquitectura de red.

En la figura 71, se muestra un diagrama de la gestión de multiplexores. En este diseño, se parte desde la interconexión del equipo Servidor de Gestión conectado al multiplexor por un puerto físico, asignado a una dirección IP con la VLAN correspondiente.

Con esta conexión, se crean las interfaces PPP de 9 *time slots*, que serán insertados en la cabecera MSOH de la trama STM-N. La interfaz PPP1 del multiplexor MUX 01 enlaza con el otro multiplexor MUX 02 por medio de su interfaz PPP1, a su vez las interfaces PPP1 y PPP2 del multiplexor MUX 02 se vinculan a una dirección IP de *loopback* para su gestión, sucesivamente, la interfaz PPP2 del multiplexor MUX 02 se enlaza con la interfaz PPP1 del multiplexor MUX 03. Es así que desde el Servidor de Gestión es posible gestionar, remotamente, los multiplexores con tan solo digitar su dirección IP de *loopback*.

**Figura 71**

*Diagrama de gestión de multiplexores.*



### 3.1.6 Diseño y propuesta para el uso del canal ethernet existente como ruta de respaldo para señales IEC 101

Debido a que se tiene un enlace existente por una red Ethernet entre 2 subestaciones eléctricas, del cual una de ellas es el Centro de Control 1, se usará este enlace para dar una redundancia adicional para el protocolo IEC 101 con la tarjeta CEPI1 del multiplexor. Esta tarjeta permite transportar tramas TDM a paquetes IP y realizar el proceso inverso.

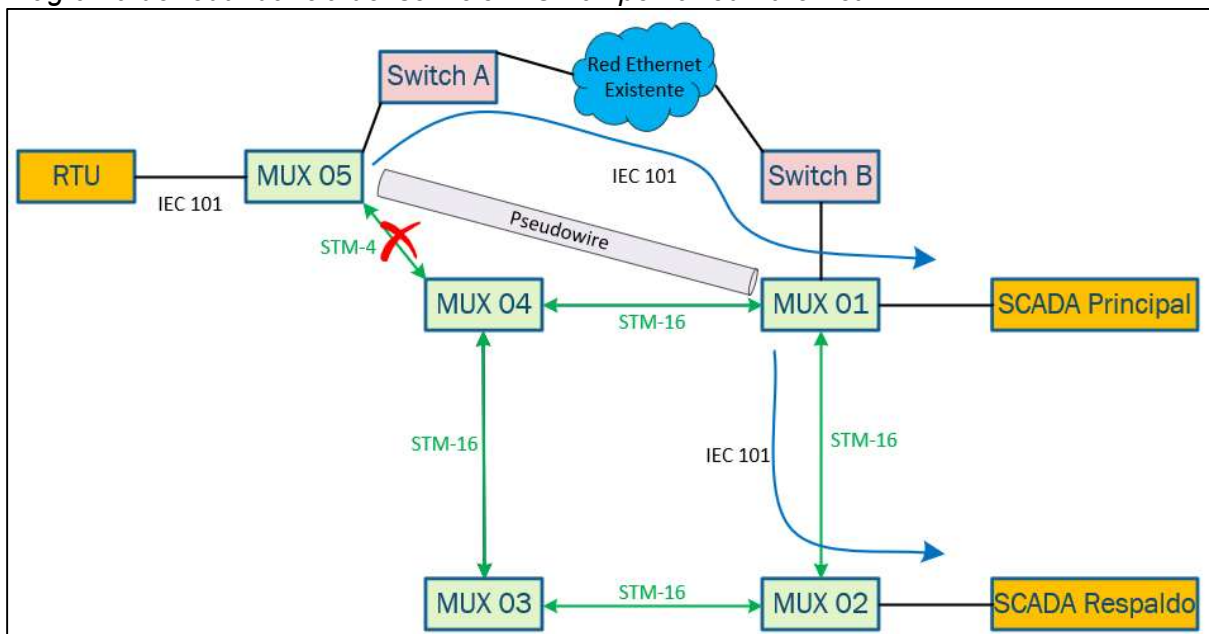
En la figura 72, se observa un diagrama de cómo funciona esta ruta que transporta tramas TDM sobre una red *Ethernet* existente. Si el enlace de fibra óptica entre los multiplexores MUX 04 y MUX 05 falla, el RTU perdería comunicación con el sistema SCADA para la comunicación a nivel del protocolo IEC 101. Por ello, se propone el canal *Ethernet* existente entre el *Switch A* y *Switch B* para transportar las señales del protocolo

IEC 101. En caso exista una falla en la fibra que enlaza los multiplexores MUX 04 y MUX 05, se realiza una conmutación automática en el multiplexor MUX 05 para redirigir las tramas TDM, encapsulándolo en paquetes *Ethernet* y enviarlas al *Switch A*. Este último envía al *Switch B* por la red existente *Ethernet*; luego el *Switch B* envía a la interfaz *Ethernet* del multiplexor MUX 01 y, por medio de la tarjeta CEPI1, lleva los paquetes *Ethernet* a tramas TDM para enviar los servicios hacia el destino final. Para este caso, al SCADA Principal y al SCADA Respaldo por medio del multiplexor MUX 02, obteniendo con esto la continuidad y alta disponibilidad del servicio.

El funcionamiento de este canal es, básicamente, la creación de un *pseudowire* desde el multiplexor MUX 05 hacia el multiplexor MUX 01, vinculados por una VLAN para su interconexión. Para este diseño de red, se usa el protocolo SAToP para llevar las tramas TDM a paquetes *Ethernet*.

**Figura 72**

*Diagrama de redundancia del servicio IEC 101 por la red Ethernet.*

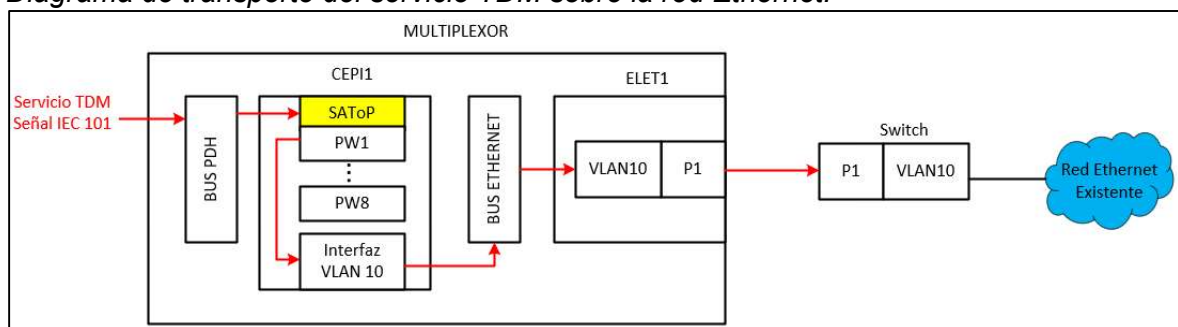


En la figura 73, se observa un diagrama donde el servicio TDM, el cual para este caso es la señal IEC 101, ingresa al bus PDH del multiplexor. Seguidamente, esta trama es encapsulada por un *pseudowire* mediante el protocolo SAToP (se debe considerar que

este protocolo cuenta con 8 canales *pseudowire*). Este *pseudowire* PW1 es vinculado a una VLAN y llevado al bus *Ethernet* del multiplexor y, por último, la VLAN usada es asociada a la tarjeta de servicio ELET1, que cuenta con puertos *Ethernet*, para luego hacer la conexión hacia el *Switch* y transportar los datos hacia el multiplexor extremo por la red *Ethernet* existente. Este último multiplexor realiza el proceso inverso para llevar los paquetes *Ethernet* a tramas TDM.

**Figura 73**

*Diagrama de transporte del servicio TDM sobre la red Ethernet.*



### 3.2 Implementación en el proyecto

Para la implementación del proyecto, se debe tener en cuenta que la empresa eléctrica ya cuenta con equipos multiplexores existentes de su propiedad y equipos multiplexores de una empresa tercera que le presta servicios de transporte de sus datos. Por ello, la empresa eléctrica adquiere nuevos equipos para reemplazar los multiplexores de la empresa tercera y tener una red totalmente independiente en su propiedad.

En los equipos existentes de la empresa eléctrica, se realizarán configuraciones adicionales para coexistir con los nuevos multiplexores que se implementarán. Para los multiplexores nuevos, se realiza un plan de migración para reemplazar a los equipos de la empresa tercera. Este plan de migración debe tomar el menor tiempo posible, debido a que los equipos multiplexores transportan señales de misión crítica.

En la tabla 5, se muestra la cantidad de multiplexores, su estado y ciudad a la que pertenecen, cada multiplexor pertenece a una subestación eléctrica, a excepción de los centros de control que contienen 2 multiplexores, MUX 01 y MUX 02 para el Centro de



Control 1, MUX 03 y MUX 04 para el Centro de Control 2. En la figura 74, se muestra el diseño de la arquitectura general de multiplexores del proyecto.

**Tabla 5**

*Ubicación y estado de multiplexores.*

<b>Multiplexor</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Estado</b>
<b>MUX 01</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 02</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 03</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 04</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 05</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 06</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 07</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 08</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 09</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 10</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 11</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 12</b>	Ciudad 01	Nuevo
<b>MUX 13</b>	Ciudad 01	Existente
<b>MUX 14</b>	Ciudad 02	Nuevo
<b>MUX 15</b>	Ciudad 03	Nuevo
<b>MUX 16</b>	Ciudad 03	Nuevo
<b>MUX 17</b>	Ciudad 03	Nuevo
<b>MUX 18</b>	Ciudad 04	Existente
<b>MUX 19</b>	Ciudad 05	Existente
<b>MUX 20</b>	Ciudad 05	Nuevo

*Arquitectura general de multiplexores.*



Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que las subestaciones eléctricas cuentan con RTU, que trabajan con el protocolo IEC 101 y otros con el protocolo IEC 104, este último para transmisión por *Ethernet*, a diferencia del primero que trabaja por transmisión serial. En la tabla 6, se muestra el tipo de protocolo de supervisión que transportará cada multiplexor y que esté conectado directa o indirectamente al RTU. Los multiplexores MUX 02 y MUX 04, referente a la figura 74, son equipos de convergencia de servicios IEC 101 e IEC 104 en los centros de control para, luego, enviar al sistema SCADA; es decir, estos multiplexores no están conectados a ningún RTU.

**Tabla 6**

*Relación de multiplexores y protocolos IEC 101 – IEC 104.*

<b>Multiplexor</b>	<b>Protocolo</b>
<b>MUX 01</b>	IEC 104
<b>MUX 02</b>	----
<b>MUX 03</b>	IEC 104
<b>MUX 04</b>	----
<b>MUX 05</b>	IEC 101
<b>MUX 06</b>	IEC 104
<b>MUX 07</b>	IEC 104
<b>MUX 08</b>	IEC 104
<b>MUX 09</b>	IEC 104
<b>MUX 10</b>	IEC 101
<b>MUX 11</b>	IEC 101
<b>MUX 12</b>	IEC 104
<b>MUX 13</b>	IEC 104
<b>MUX 14</b>	IEC 101
<b>MUX 15</b>	IEC 104
<b>MUX 16</b>	IEC 104
<b>MUX 17</b>	IEC 101
<b>MUX 18</b>	IEC 101
<b>MUX 19</b>	IEC 101
<b>MUX 20</b>	IEC 101

Se debe tener en cuenta la información proporcionada sobre la tasa de bits en el cual están trabajando, actualmente, los RTU. En la tabla 7, se muestra la relación entre los multiplexores y la tasa de bits que deben ser configurados según RTU que trabaja con el protocolo IEC 101.

**Tabla 7**

*Relación entre multiplexor y tasa de bits de RTU.*

<i>Multiplexor</i>	<i>Tasa de bits (bps)</i>
<b>MUX 05</b>	19200
<b>MUX 10</b>	4800
<b>MUX 11</b>	9600
<b>MUX 14</b>	2400
<b>MUX 17</b>	2400
<b>MUX 18</b>	4800
<b>MUX 19</b>	1200
<b>MUX 20</b>	1200

Esta información de la tasa de bits es válida para los nuevos multiplexores (según Tabla 5), donde se debe configurar la interfaz asíncrona RS 232. Se debe tener en cuenta que se reemplazará la tecnología *Frame Relay* por una red SDH, es por ello que involucra retirar el equipo existente que conecta al RTU.

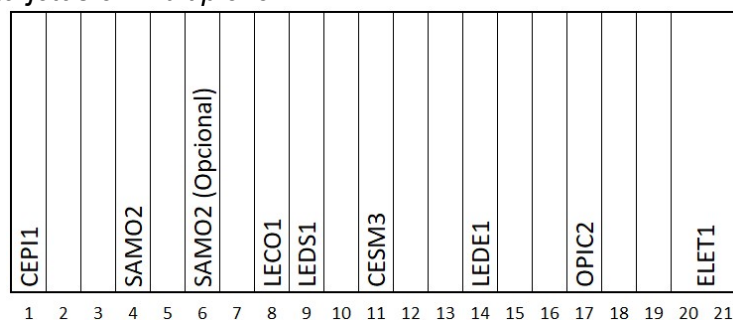
### **3.2.1 Implementación de tarjetas en el multiplexor**

Para la implementación se debe tomar en cuenta la cantidad de tarjetas necesarias a instalar en el multiplexor para cubrir con los servicios necesarios tales como teleprotección, protección diferencial, IEC 101, IEC 104 y servicio corporativo (internet).

El multiplexor cuenta con 21 *s/ots* o ranuras; por ello, se realiza una distribución típica de las tarjetas a utilizar, usando una sola tarjeta controladora (CESM3), una o dos tarjetas de transporte SDH (SAMO2) y tarjetas de servicio (CEPI1, LECO1, LEDS1, LEDE1, OPIC2, ELET1), tal como se muestra en la figura 75.

**Figura 75**

*Distribución de tarjetas en multiplexor.*



En la Tabla 8, se muestra el uso de cada tarjeta para el diseño propuesto.

**Tabla 8**

*Funcionalidad de tarjetas.*

Tarjeta	Funcionalidad
<b>CESM3</b>	Tarjeta controladora del multiplexor
<b>SAMO2</b>	Tarjeta de transporte SDH
<b>LEDE1</b>	Tarjeta para teleprotección G.703
<b>LECO1</b>	Tarjeta para teleprotección G.703 codireccional (64Kbps)
<b>LEDS1</b>	Tarjeta para teleprotección / Tarjeta para servicio IEC 101
<b>OPIC2</b>	Tarjeta para protección diferencial IEEE C37.94
<b>ELET1</b>	Tarjeta para servicio IEC 104 o red corporativa (internet)
<b>CEPI1</b>	Tarjeta para transportar servicios TDM por Ethernet

### 3.2.2 Energización y ventilación de multiplexor

En la figura 76, se muestra un módulo de ventilación llamado FAMO1, que permite que el funcionamiento del multiplexor trabaje en óptimas condiciones. Este accesorio es necesario y no es posible su omisión.

**Figura 76**

*Módulo de ventilación FAMO1.*



*Nota:* adaptado de *Manual multiplexor FOX615*, Hitachi Energy, 2020.

Para la alimentación o energización del multiplexor, se tiene el módulo llamado DUPF1, tal como se muestra en la figura 77, que permite tener redundancia energética debido a que cuenta con 2 puertos de alimentación, considerar que el multiplexor se alimenta con 48 VDC.

**Figura 77**

*Módulo de energía dual DUPF1.*



*Nota: adaptado de Manual multiplexor FOX615, Hitachi Energy, 2020.*

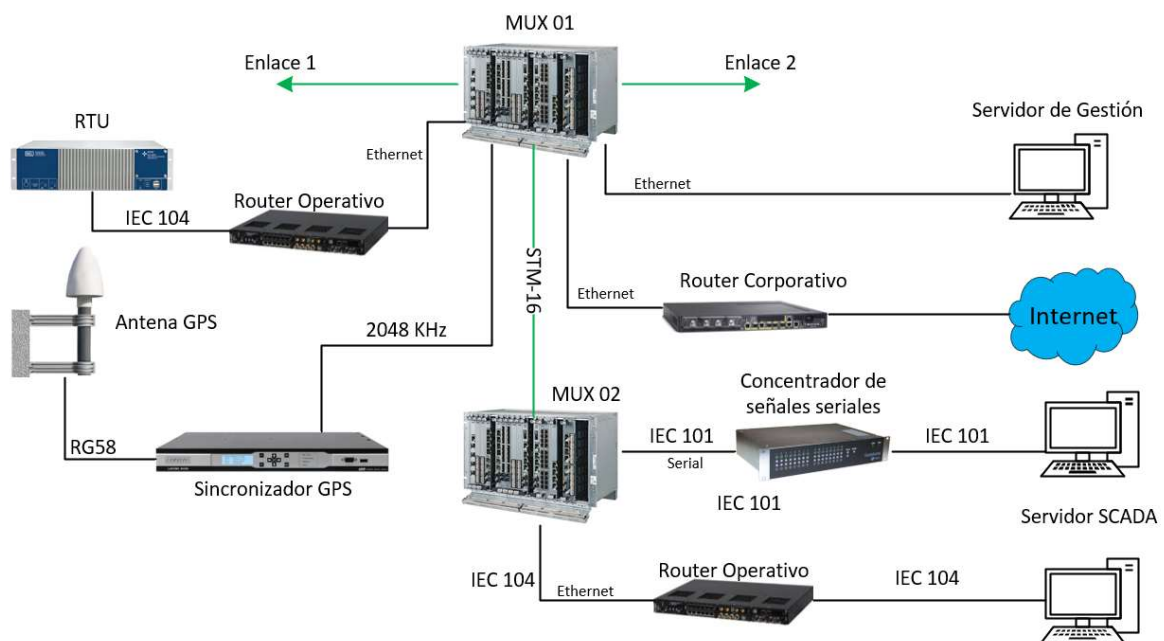
### **3.2.3 Implementación en los centros de control**

Para los centros de control, se consideró en el diseño tener 2 multiplexores. Un multiplexor para el tráfico de datos, que se concentra en el anillo central, y un multiplexor de cola, donde convergen las señales de los protocolos IEC 101 e IEC 104, para luego enviarlos al sistema SCADA. En la figura 78, se muestra la implementación en el Centro de Control 1, el cual se muestra la interconexión de los multiplexores MUX 01 y MUX 02 por medio de un enlace STM-16. Este multiplexor MUX 01 es sincronizado por un GPS externo de marca Meinberg, modelo M1000, que se conecta a una antena externa usando un cable coaxial RG58. El equipo GPS cuenta con una tarjeta que permite brindar el sincronismo con una señal de 2048 KHz, se conecta a la entrada ESI de la tarjeta CESM3 del multiplexor. El multiplexor MUX 02 recibe las señales IEC 101 e IEC 104, provenientes del multiplexor MUX 01, y los envía a los servidores SCADA.

El multiplexor MUX 01 tiene una conexión *Ethernet* al Servidor de Gestión. Es desde aquí y por esta conexión, que se puede gestionar los multiplexores nuevos y existentes. Por último, desde este mismo multiplexor (MUX 01) se conecta a un *router* corporativo de un proveedor de internet para distribuir este servicio a todas las subestaciones eléctricas.

**Figura 78**

*Implementación en Centro de Control.*



*Nota:* la figura nos indica la interconexión de servicios en el Centro de Control 1 implementado en el Proyecto. Fuente de imágenes, abstraídas de los manuales de fabricantes.

Para el sistema de gestión de multiplexores, se diseña una tabla de direcciones IP de *Loopback*, la cual, de esta manera, se pueda dar una gestión *in band* centralizada de todos los multiplexores entre existentes y nuevos.

En la tabla 9, se muestra la distribución de direcciones IP *Loopback* para los multiplexores, donde se asignó un segmento de red que no produzca conflicto con la red existente de la empresa eléctrica.

**Tabla 9***Direcciones IP Loopback.*

<b>Multiplexor</b>	<b>IP Loopback</b>	<b>Máscara</b>
<b>MUX 01</b>	10.251.0.1	255.255.255.255
<b>MUX 02</b>	10.251.0.2	255.255.255.255
<b>MUX 03</b>	10.251.0.3	255.255.255.255
<b>MUX 04</b>	10.251.0.4	255.255.255.255
<b>MUX 05</b>	10.251.0.5	255.255.255.255
<b>MUX 06</b>	10.251.0.6	255.255.255.255
<b>MUX 07</b>	10.251.0.7	255.255.255.255
<b>MUX 08</b>	10.251.0.8	255.255.255.255
<b>MUX 09</b>	10.251.0.9	255.255.255.255
<b>MUX 10</b>	10.251.0.10	255.255.255.255
<b>MUX 11</b>	10.251.0.11	255.255.255.255
<b>MUX 12</b>	10.251.0.12	255.255.255.255
<b>MUX 13</b>	10.251.0.13	255.255.255.255
<b>MUX 14</b>	10.251.0.14	255.255.255.255
<b>MUX 15</b>	10.251.0.15	255.255.255.255
<b>MUX 16</b>	10.251.0.16	255.255.255.255
<b>MUX 17</b>	10.251.0.17	255.255.255.255
<b>MUX 18</b>	10.251.0.18	255.255.255.255
<b>MUX 19</b>	10.251.0.19	255.255.255.255
<b>MUX 20</b>	10.251.0.20	255.255.255.255

Para la red corporativa, se configuró los multiplexores con las mismas VLAN existentes que trabajaban los *switches* y *routers* con la finalidad de mantener los servicios y la misma configuración de estos equipos. El multiplexor solo se basa en transportar o propagar estas VLAN.

Para los servicios de las señales IEC 104, debido a que este se transporta por el protocolo *Ethernet*, se reasigno el tag de VLAN para cada *router* operativo que conecta con el multiplexor para enviar este servicio. El multiplexor únicamente transporta el paquete a nivel de capa 2; por ello, solo se debe declarar las VLAN del servicio IEC 104 correspondientes en los puertos del multiplexor. En la tabla 10, se muestra el multiplexor y la VLAN que se debe declarar en los puertos de estos equipos para ser transportados hacia los centros de control.



**Tabla 10**

*VLAN de servicios IEC 104.*

<i>Multiplexor</i>	<i>VLAN IEC 104</i>
<b>MUX 01</b>	1001
<b>MUX 03</b>	1003
<b>MUX 06</b>	1006
<b>MUX 07</b>	1007
<b>MUX 08</b>	1008
<b>MUX 09</b>	1009
<b>MUX 12</b>	1012
<b>MUX 13</b>	1013
<b>MUX 15</b>	1015
<b>MUX 16</b>	1016

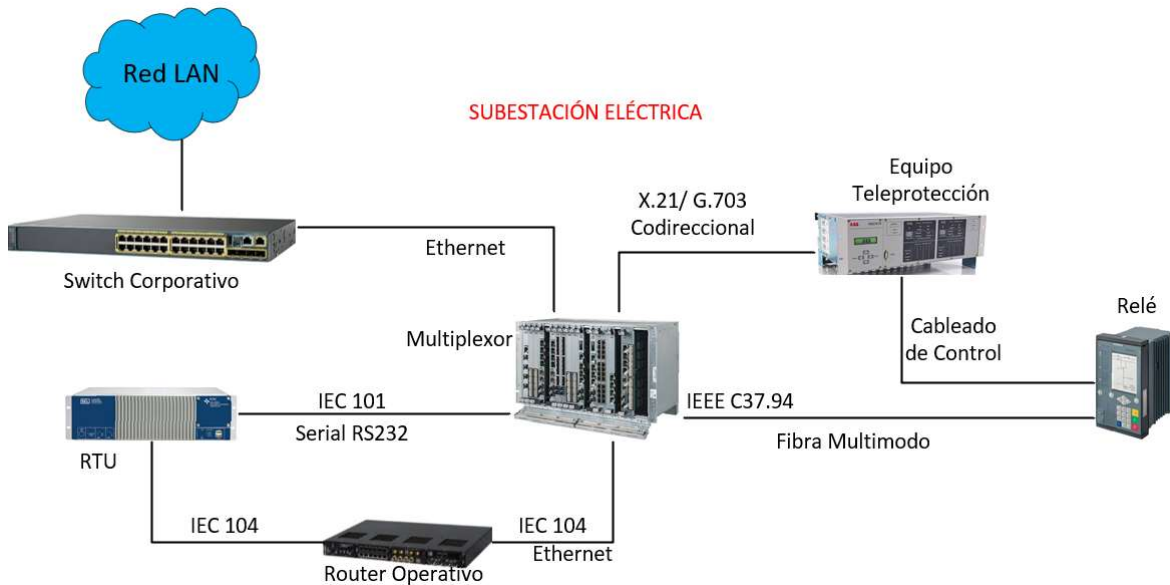
### **3.2.4 Implementación de servicios en las subestaciones eléctricas**

En la figura 79, se muestra todos los servicios en general que se tienen en una subestación eléctrica y que el multiplexor debe estar preparado para soportar y transportar.

Para el caso del equipo de teleprotección, se tienen diferentes marcas en este proyecto que difieren en el *pinout*. Para las conexiones al multiplexor, se prepara el cable serial entre el multiplexor y el equipo de teleprotección, de igual manera, se usa un cable serial desde el multiplexor al equipo RTU. En el anexo 1, se muestra el *pinout* general de los distintos equipos y protocolos de teleprotección. Para los servicios de red corporativa y señales IEC 104 se usa un cable *Ethernet* que interconecta al multiplexor con el *switch* y el *router* operativo, respectivamente para cada servicio. Por último, para el servicio de protección diferencial de línea por el protocolo IEEE C37.94, se usa un cable de fibra multimodo con un extremo de conector ST (lado del relé) y el otro con conector LC (lado del multiplexor).

**Figura 79**

*Arquitectura general de servicios en una subestación eléctrica.*



*Nota:* la figura nos indica la interconexión de servicios en una subestación eléctrica implementado en el proyecto. Fuente de imágenes, abstraídas de los manuales de fabricantes.

Para la configuración de estos canales de teleprotección y protección diferencial se usaron equipos de medición para certificar el canal antes de realizar la migración. En el anexo 2 y anexo 3, se muestra un ejemplo del resultado de certificación de canal X.21/G.703 codireccional y certificación de canal C37.94, respectivamente.

### **3.2.5 Implementación del amplificador óptico**

La distancia entre subestaciones que involucran a los multiplexores puede ser un detalle que no permita enlazar adecuadamente estos equipos por medio de la fibra óptica, por ello, se utilizan los amplificadores ópticos para elevar la potencia óptica y obtener valores óptimos de recepción en el multiplexor. Las subestaciones eléctricas que contienen a los multiplexores MUX 14 y MUX 15 (referente a la figura 74) están distanciados 175 Km aproximadamente. Para este enlace, se propuso una capacidad STM-16, debido a que el multiplexor MUX 15 tiene la proyección de enlazar con otros multiplexores en un futuro. Para la implementación, se escogió el SFP STM-16 de marca Coretek, comercialmente se venden para una distancia máxima de 120 Km, según *datasheet* del fabricante el nivel de recepción oscila entre -8 y -32 dBm, y la potencia óptica de transmisión oscila entre 0 y 5

dBm. Además, se sabe, según información del proyecto, que la atenuación total de la fibra óptica entre los multiplexores MUX 14 y MUX 15 es de 38 dBm. En la ecuación 3, se muestra el cálculo básico para determinar el nivel de recepción del SFP en un extremo del multiplexor.

$$NR (dBm) = P.Out(dBm) - At.total(dB) \quad (3)$$

Donde

NR: nivel de recepción

P. Out: potencia óptica de salida

At. Total: atenuación total de la fibra óptica

Reemplazando los valores, teniendo en cuenta que la potencia óptica de salida es 5 dBm y la atenuación total 38 dBm, se tiene un nivel de recepción de -33 dBm. El cual, comparando con el nivel de recepción umbral del SFP (-32 dBm), no se podrá lograr el enlace óptico que se necesita. Por ello, la necesidad de implementar un amplificador óptico. Este amplificador tiene la capacidad de sumar hasta 15 dBm a la potencia óptica de salida, teniendo un nivel de recepción máximo de -13dBm. El amplificador óptico se alimenta con un voltaje de 48 Vdc. Este amplificador se instala en el mismo gabinete que el multiplexor, conectado con un *patch cord dúplex* de fibra óptica de aproximadamente 3 metros.

### **3.2.6 Implementación del canal redundante para el servicio IEC 101**

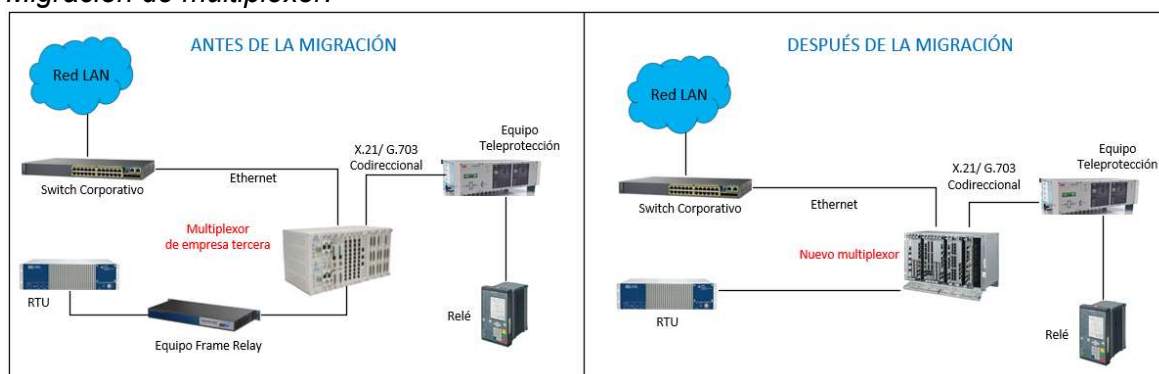
El objetivo de insertar la tarjeta CEPI1 en el multiplexor y usar la red *Ethernet* existente es poder tener una ruta de respaldo de las señales IEC 101, que salen de los multiplexores MUX 17, MUX 18, MUX 19 y MUX 20 (referente a la figura 74). Estos multiplexores envían sus señales IEC 101 por medio de la ruta MUX 15, MUX 14, MUX 13 hasta llegar hacia los centros de control. Existe la posibilidad de que el enlace entre los multiplexores MUX 15 – MUX 16 pueda fallar, los multiplexores conmutan, automáticamente, para salir por la red *Ethernet* existente.

### 3.2.7 Procedimiento de migración de servicios

La migración de servicios involucra retirar el multiplexor existente de la empresa tercera e instalar el nuevo multiplexor de la empresa eléctrica. Este tiempo debe ser el mínimo posible, debido a que se interrumpirán servicios de misión crítica, como el de protecciones y protocolos de supervisión. Además, esta solicitud debe ser gestionada con anticipación con el cliente. El tiempo de corte estipulado para la migración de servicios en el nuevo multiplexor se estima de 1 hora. El procedimiento involucra desconectar los cables que van al multiplexor de la empresa tercera para luego desmontarlo del gabinete. Seguidamente, se instala el nuevo multiplexor previamente configurado, se prueban los canales con los equipos certificadores correspondientes y se conectan los cables de servicios al nuevo multiplexor instalado en el gabinete. En la figura 80, se muestra un ejemplo particular de una migración de servicios al nuevo multiplexor de una subestación eléctrica donde funciona el protocolo IEC 101, se visualiza que el equipo *Frame Relay* se deja de utilizar para que el RTU se conecte directamente al nuevo multiplexor.

**Figura 80**

*Migración de multiplexor.*



**Nota:** la figura nos muestra el proceso de migración de servicios en una subestación eléctrica en el proyecto. Fuente de imágenes, abstraídas de los manuales de fabricantes.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo, se analiza el cumplimiento de los objetivos, análisis del presupuesto para la implementación del proyecto y la presentación del cronograma de actividades para su implementación.

### 4.1 Cálculo de los costos de equipos de telecomunicaciones

Se realiza una estimación o cálculo del costo de suministro de equipamiento para cumplir con la implementación del presente proyecto. En la tabla 11, se muestra la cantidad total de tarjetería y multiplexores que se necesitan para los nuevos equipos y equipos existentes.

**Tabla 11**

*Cantidad de multiplexores y tarjetas.*

ITEM	Multiplexor	FAMO1	DUPF1	CESM3	SAMO2	LEDS1	LEDE1	LECO1	OPIC2	CEPI1	ELET1
1	MUX 01	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2	MUX 02	1	1	1	1	5	0	0	0	0	1
3	MUX 03	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	MUX 04	1	1	1	1	5	0	0	0	0	1
5	MUX 05	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	MUX 06	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1
7	MUX 07	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
8	MUX 08	1	1	1	1	2	0	0	1	0	1
9	MUX 09	1	1	1	1	2	0	0	1	0	1
10	MUX 10	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1
11	MUX 11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
12	MUX 12	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
13	MUX 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	MUX 14	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
15	MUX 15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
16	MUX 16	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
17	MUX 17	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
18	MUX 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	MUX 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	MUX 20	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
Total		12	12	12	18	22	2	4	5	2	12

Ahora se calcula la cantidad de SFP que se necesitan en el proyecto. En la tabla 12, se muestra la lista de SFP por enlace, indicando la capacidad, distancia y cantidad necesarios a utilizar, se debe considerar que el SFP requerido es de 2 hilos.

**Tabla 12**

*Cantidad de SFP por enlace.*

<b>ITEM</b>	<b>SFP</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Distancia</b>	<b>Cantidad</b>
<b>1</b>	MUX 01-MUX 02	STM-16	15 Km	2
<b>2</b>	MUX 03-MUX 04	STM-16	15 Km	2
<b>3</b>	MUX 01-MUX 06	STM-16	40 Km	2
<b>4</b>	MUX 06-MUX 08	STM-16	15 Km	2
<b>5</b>	MUX 08-MUX 09	STM-16	15 Km	2
<b>6</b>	MUX 09-MUX 10	STM-16	40 Km	2
<b>7</b>	MUX 10-MUX 11	STM-16	15 Km	2
<b>8</b>	MUX 10-MUX 12	STM-16	120 Km	2
<b>9</b>	MUX 12-MUX 13	STM-16	80 Km	2
<b>10</b>	MUX 13-MUX 14	STM-16	120 Km	2
<b>11</b>	MUX 14-MUX 15	STM-16	200 Km	2
<b>12</b>	MUX 15-MUX 16	STM-4	80 Km	2
<b>13</b>	MUX 16-MUX 17	STM-4	15 Km	2
<b>14</b>	MUX 16-MUX 18	STM-4	120 Km	2
<b>15</b>	MUX 19-MUX 20	STM-4	80 Km	2
<b>16</b>	C37.94	2 Mbps	2 Km	4

Con la tabla anterior calculamos el total por cada capacidad y distancia. En la tabla 13, se muestra el cálculo total de SFP necesario según característica.

**Tabla 13**

*Cantidad total de SFP.*

<b>ITEM</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Distancia</b>	<b>Cantidad</b>
<b>1</b>	STM-16	15 Km	10
<b>2</b>	STM-16	40 Km	4
<b>3</b>	STM-16	80 Km	2
<b>4</b>	STM-16	120 Km	6
<b>5</b>	STM-4	80 Km	4
<b>6</b>	STM-4	15 Km	2
<b>7</b>	STM-4	120 Km	2
<b>8</b>	C37.94 2 Mbps	2 Km	4

Para estimar el costo total del equipamiento de telecomunicaciones, se usan las cantidades resultadas de la tabla 11 y tabla 13. En la figura 14, se muestra el resultado del costo total del equipamiento de telecomunicaciones.

**Tabla 14**

*Costo total de equipamiento de telecomunicaciones.*

<b>ITEM</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario (USD)</b>	<b>Total (USD)</b>
1	Multiplexor FOX615	12	2880	34560
2	FAMO1	12	585	7020
3	DUPF1	12	338	4056
4	Tarjeta CESM3	12	6832	81984
5	Tarjeta SAMO2	18	10199	183582
6	Tarjeta LEDS1	22	2000	44000
7	Tarjeta LEDE1	2	1700	3400
8	Tarjeta LECO1	4	1600	6400
9	Tarjeta OPIC2	5	3700	18500
10	Tarjeta CEPI1	2	2672	5344
11	Tarjeta ELET1	12	2000	24000
12	Amplificador Óptico	1	5500	5500
13	Sincronizador GPS	1	9800	9800
14	STM-16 / 15 Km	10	650	6500
15	STM-16 / 40 Km	4	940	3760
16	STM-16 / 80 Km	2	1500	3000
17	STM-16 / 120 Km	6	2000	12000
18	STM-4 / 80 Km	4	460	1840
19	STM-4 / 15 Km	2	140	280
20	STM-4 / 120 Km	2	770	1540
21	C37.94 2 Mbps / 2 Km	4	130	520
Total (USD)				457586

A esto se le debe agregar algunos suministros adicionales para la implementación de los equipos de comunicaciones. En la tabla 15, se detallan estos suministros y se estiman sus costos.

**Tabla 15***Costo de suministros de implementación.*

<b>ITEM</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario (USD)</b>	<b>Total (USD)</b>
<b>1</b>	Patch Panel RJ45	12	120	1440
<b>2</b>	Conectores RJ45 x 100 unidades	5	60	300
<b>3</b>	Patch cord FO-SM / 3 m	30	10	300
<b>4</b>	Patch cord FO-MM / 12 m	4	11	44
<b>5</b>	Cable de red SF/UTP Cat6 x 300 m	2	200	400
<b>6</b>	Llaves termomagnéticas	28	20	560
<b>7</b>	Cable eléctrico 12 AWG x 100 m	3	80	240
<b>8</b>	Tubería flexible conduit x 100 m	3	150	450
<b>9</b>	Borneras eléctricas	100	2	200
<b>10</b>	Otros suministros menores	---	----	630
Total (USD)				4564

**4.2 Cálculo de los costos de servicio del proyecto**

Para la estimación o cálculo de los costos de los servicios, incluye la visita técnica, implementación y puesta en marcha de los equipos multiplexores, desarrollo de ingeniería y capacitación básica de los equipos multiplexores. Además, se incluyen los gastos operativos y administrativos que involucran al proyecto. En la tabla 16, se muestra la lista de costos del servicio del proyecto.

**Tabla 16***Costo de servicios del proyecto.*

<b>ITEM</b>	<b>Descripción</b>	<b>Total (USD)</b>
<b>1</b>	Visita técnica a todas las subestaciones	13500
<b>2</b>	Implementación y puesta en marcha de los multiplexores	23500
<b>3</b>	Desarrollo de ingeniería y otros entregables	13000
<b>4</b>	Capacitación de operación de los multiplexores	4000
<b>5</b>	Gastos operativos	3500
<b>6</b>	Gastos Corporativos	2400
Total (USD)		59900



Para el cálculo del costo total del proyecto, tomaremos en cuenta la tabla 14, tabla 15 y tabla 16, sumando los costos totales de cada uno de ellas. En la tabla 17 se muestra un resumen del total para el costo del proyecto.

**Tabla 17**

*Costo total del proyecto.*

<b>ITEM</b>	<b>Descripción</b>	<b>Total (USD)</b>
<b>1</b>	Costo total de equipamiento de telecomunicaciones	457586
<b>2</b>	Costo total de suministro de implementación	4564
<b>3</b>	Costo total de servicios de implementación y puesta en marcha	59900
Total (USD)		522050

Como conclusión, se sostiene que la inversión total para la implementación y puesta en marcha del sistema de telecomunicaciones por una red troncal de multiplexores es de, aproximadamente, \$522,050.

#### **4.3 Cronograma del proyecto**

Para la ejecución del proyecto, es importante tener un cronograma de actividades donde contenga los ítems necesarios para lograr los objetivos propuestos. En el desarrollo del proyecto se tomará en cuenta las visitas a las subestaciones, desarrollo de la ingeniería con información obtenida de las visitas, diseño de arquitecturas propuestas, implementación, puesta en marcha y cierre del proyecto. Para la gestión del proyecto, se tomará en cuenta la recomendación de las buenas prácticas en el desarrollo de proyectos descritas por el PMI (Project Management Institute).

En la figura 81, se muestra el diagrama de Gantt de todo el proyecto con los tiempos estimados para su mejor desarrollo. El tiempo estimado para todo el proyecto se considera 4 meses o 16 semanas.

**Figura 81**

*Diagrama de Gantt del proyecto.*

ITEM	DESCRIPCIÓN	MES-1				MES-2				MES-3				MES-4			
		SEM1	SEM2	SEM3	SEM4	SEM5	SEM6	SEM7	SEM8	SEM9	SEM10	SEM11	SEM12	SEM13	SEM14	SEM15	SEM16
<b>1</b>	<b>Gestion del Proyecto</b>																
1.1	Inicio																
1.2	Planeamiento																
1.3	Ejecución																
1.4	Monitoreo y Control																
1.5	Cierre																
<b>2</b>	<b>Visitas técnicas</b>																
2.1	Transporte y visitas técnicas a subestaciones eléctricas																
<b>3</b>	<b>Desarrollo de ingeniería</b>																
3.1	Inicio del desarrollo de ingeniería con información de la visita técnica																
<b>3</b>	<b>Diseño de arquitecturas</b>																
3.1	Análisis y diseño de arquitectura de multiplexores																
3.2	Análisis y diseño de arquitectura de gestión de multiplexores																
3.3	Análisis y diseño de arquitectura de sincronismo de multiplexores																
3.4	Análisis y diseño de canales TDM																
3.5	Análisis y diseño de rutas redundantes																
3.6	Pruebas en laboratorio																
<b>4</b>	<b>Adquisición</b>																
4.1	Compra e importación de equipos multiplexores y tarjeterías																
4.2	Compra de suministro para instalación de multiplexores																
<b>5</b>	<b>Instalación</b>																
5.1	Instalación de multiplexores en subestaciones eléctricas																
<b>6</b>	<b>Pruebas y Comisionamiento</b>																
6.1	Pruebas y certificación de canales																
6.2	Comisionamiento de servicios operativos y corporativos																
<b>7</b>	<b>Capacitación y entrega de documentos</b>																
7.1	Capacitación para operación de multiplexores																
7.2	Desarrollo y entrega de ingeniería As Built																
7.3	Elaboración y entrega de informes finales de servicio																

## **Conclusiones**

1. Se realizó el diseño de una red funcional y escalable para un sistema de transporte de multiplexores, el cual acepta la integración de más de estos equipos en subestaciones eléctricas nuevas, donde transportan señales de protección o señales que se dirigen a los centros de control.
2. Se cumplió el objetivo de tener una red independiente de multiplexores para la gestión de estos equipos desde un punto central, que permite monitorear alarmas, configurar remotamente canales para nuevos servicios y revisar estados de puertos para verificación de señales críticas.
3. Se implementaron rutas redundantes a los servicios de señales críticos como el de protección de líneas y señales que se dirigen al SCADA, que permiten y dan continuidad operacional al sistema eléctrico.
4. Se implementó una red de multiplexores altamente confiable y robusta con una infraestructura preparada para la migración de la tecnología SDH a una red MPLS.

## Recomendaciones

1. Se recomienda evitar que los *patch cord* de fibra óptica entre el multiplexor y el ODF sean doblados, debido a que puede ocasionar atenuación que perjudique el enlace de multiplexores.
2. Se recomienda colocar una contraseña a los multiplexores para evitar la vulnerabilidad de la red.
3. En el proceso de migración o cambio de multiplexor, se debe hacer un plan de ejecución para realizar el corte de servicio por el menor tiempo posible, debido a que estos servicios de las subestaciones eléctricas son de suma importancia como el de señales de protecciones de líneas.
4. Se recomienda trabajar en los tableros de protecciones con la mejor concentración y realizar los procedimientos correctos, debido a que se pueden generar disparos en las líneas por error humano.

## Referencias bibliográficas

Barrero, F. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Thomson.

<https://books.google.com.co/books?id=wZoyiFKf5IkC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.

Coretek (2021). Fabricante de transceptores ópticos.

[https://www.coretek.com.tw/product\\_d.php?lang=en&tb=1&id=26](https://www.coretek.com.tw/product_d.php?lang=en&tb=1&id=26).

Forouzan, B. (2002). *Transmisión de datos y Redes de comunicaciones*. McGrill-Hill.

<https://es.scribd.com/document/705445826/Transmision-de-Datos-y-Redes-de-Comunicaciones-Behrouz-a-Forouzan-McGraw-Hill-eBook-Espanol>

Hitachi Energy (2020). Empresa fabricante de equipos de sistemas de energía.

<https://www.hitachienergy.com/latam/es>.

Huidobro, J. (2017). *Telecomunicaciones, Tecnología, Redes y Servicios*. Ra-Ma.

IPG Photonics (2021). Empresa fabricante de tecnología laser.

<https://www.ipgphotonics.com/solutions/laser-materials-processing>.

Kurose, J. y Ross, K. (2017). *Redes de computadoras, un enfoque descendente*. Pearson Education.

[https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/10175/1/Redes%20de%20computadoras%20\\_%20un%20enfoque%20descendente%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf](https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/10175/1/Redes%20de%20computadoras%20_%20un%20enfoque%20descendente%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf)

Meinberg (2022). Empresa fabricante de sincronizadores GPS.

<https://www.meinbergglobal.com/>

SEL (2008). Fabricante de equipos de automatización Schweitzer Engineering Laboratories. <https://selinc.com/es/products/3555/>.

SIEMENS (2022). Fabricante de equipos de sistemas de energía y automatización.

<https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-5.html>.

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Education.

<https://fernandoarciniega.com/books/sistemas-de-comunicaciones-electronicas-tomasi-4ta-edicion.pdf>

Union Internacional de Telecomunicaciones (1997). *Características eléctricas de los circuitos de enlaces simétricos de doble corriente que funcionan con velocidades binarias de hasta 10 Mbps*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-V.11/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (1997). *Características de temporización de los relojes de referencia primarios*. <https://itu.int/rec/T-REC-G.811/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (1998). *Estructura de trama síncrona utilizadas en los niveles jerárquicos 1544, 6312, 2048, 8448 y 44736 kbps*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.704/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (1999). *Funciones de capa de sincronización*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.781/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (1999). *Gestión de la jerarquía digital síncrona*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.784>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2000). *Arquitectura de redes de transporte basadas en la jerarquía digital síncrona*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.803/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2001). *Características físicas y eléctricas de las interfaces digitales jerárquicas*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.703/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2003). *Características de temporización de relojes subordinados de equipos de jerarquía digital síncrona*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.813/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2004). *Características de los bloques funcionales de equipos de red de transporte ethernet*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8021>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2004). *Requisitos de temporización de relojes subordinados adecuados para utilización como relojes de nodo en redes de sincronización*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.812/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2006). *Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.783/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2007). *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.707/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2016). *Generic framing procedure*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.7041/es>.

Union Internacional de Telecomunicaciones (2020). *Time and phase synchronization aspects of telecommunication networks*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8271/es>.

## **Anexos**

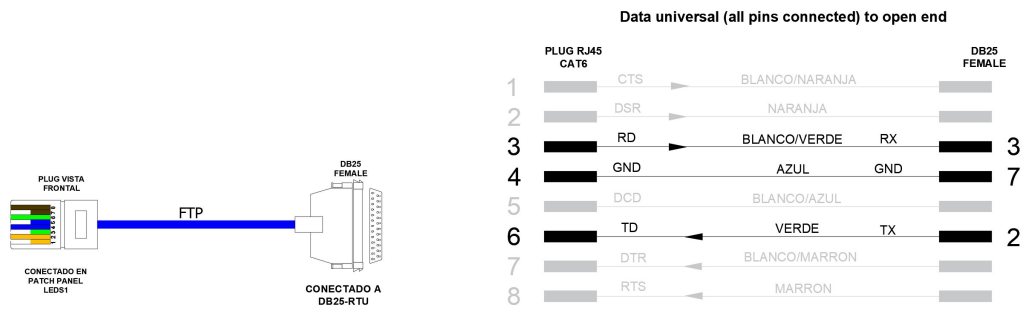
Anexo 1: <i>Pinout</i> de cables seriales conectados al multiplexor .....	1
Anexo 2: Resultado de certificación de canal X.21 .....	2
Anexo 3: Resultado de certificación de canal C37.94 .....	3
Anexo 4: Imágenes de equipamiento instalados en gabinete.....	4



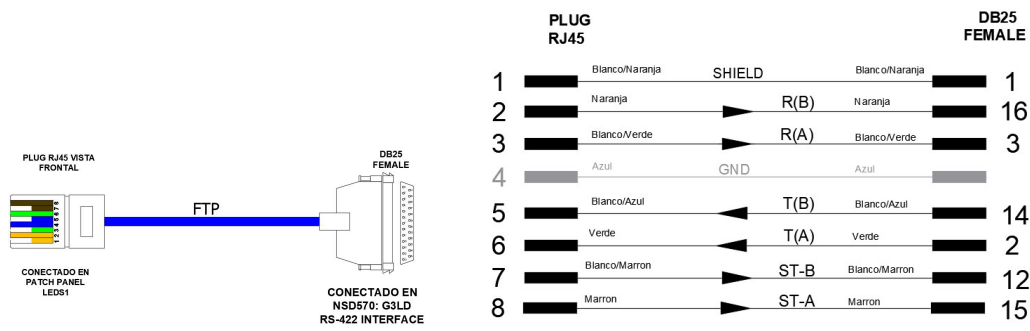
Anexo 1

Pinout de cables seriales conectados al multiplexor.

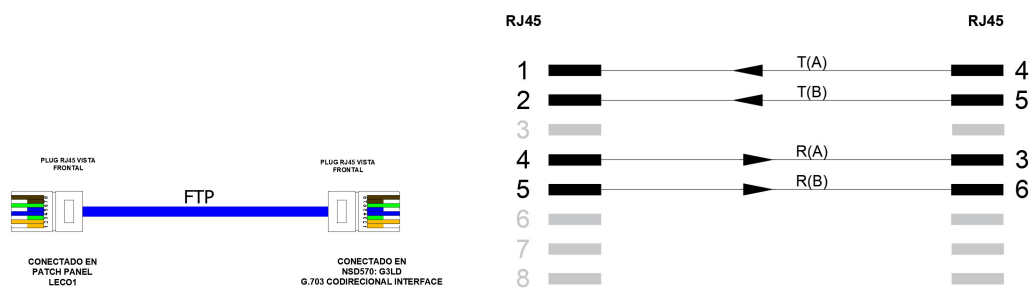
Pinout RS 232



Pinout X.21



Pinout G.703 Codireccional



## Anexo 2

Resultado de certificación de canal X.21.

XG2330 DataCom Test Report					
Print Time:	2023-12-20 09:56:18		Record No.:	20231220003	
Record Name:			DERIVACION		
Settings:					
Start Time:	2023-12-15 14:26:10		Stop Time:	2023-12-15 14:56:43	
Duration:	30M33S		Function:	DataCom	
Resolution:	1MIN		Interface:	X.21	
DTE/DCE :	DTE		Test Mode:	SYNC	
Pattern:	2^15-1		Polarity:	NORMAL	
PRBS Standard:	NON ITU-T		Error Mode:	OFF	
Error Rate:	N/A		Block Length:	1000	
TX Clock:	RX CLK	TX Out Clock Edge:	UP	TX Clock Edge:	UP
RX Clock:	RX CLK	RX Clock Edge:	UP	TX Rate:	NONE
Results:					
Basic Analysis:					
Errors:	0		EFS:	1833	
Avg Err Ratio:	0		EFS%:	100%	
Block:	117312		EB :	0	
Err Blk Ratio:	0				
Alarm Seconds:					
Signal Loss:	0		Pattern Loss:	0	
Clock Loss:	1833		Clock Slip:	0	
G.821 Analysis:					
ES:	0		SES:	0	
DM:	0		UAS:	0%	
SES%:	0%		DM%:	0%	
UAS%:	0%				
Signal Analysis:					
RX Line Rate:	64000 Hz				
Event Records:					
Event Records Sum:	30				

## Anexo 3

### Resultado de certificación de canal C.37.94.

#### Test Unit Configuration

Reference clock                      Internal  
Oscillator type                      OCXO oscillator

	Port A	Port B
Mode	C37.94 Endpoint	C37.94 Endpoint
Port mode	TX/RX	TX/RX
TX clock source	Recovered	Synthesized
TX clock offset (ppm)	--- ppm	--- ppm
Frame	C37.94	C37.94
TX data rate	64 kb/s	64 kb/s
TX timeslots	1	1
RX data rate	64 kb/s	64 kb/s
TX Pattern	Match RX	Match RX
RX Pattern	ITU PRBS 2^15	ITU PRBS 2^15

#### Port A: Defects

Event	Seconds
ACT	0 s
LOS	0 s
AIS	0 s
RDI	0 s
LSS	0 s
All 0	0 s
All 1	0 s
Slips	0 s

#### Port A: Anomalies

Event	Count	Rate	Seconds
FAS	0	0.000000e+00	0 s
TSE	0	0.000000e+00	0 s
TSBE	0	0.000000e+00	0 s

#### Port A: G.821 Performance (Near End)

Event	Count	Percentage	Goal
ES	0 s	0.0000 %	PASS
SES	0 s	0.0000 %	PASS
UAS	0 s	0.0000 %	PASS
BBE	----	---- %	----
DM	0 m	0.0000 %	PASS

## Anexo 4

*Imágenes de equipamiento instalados en gabinete.*



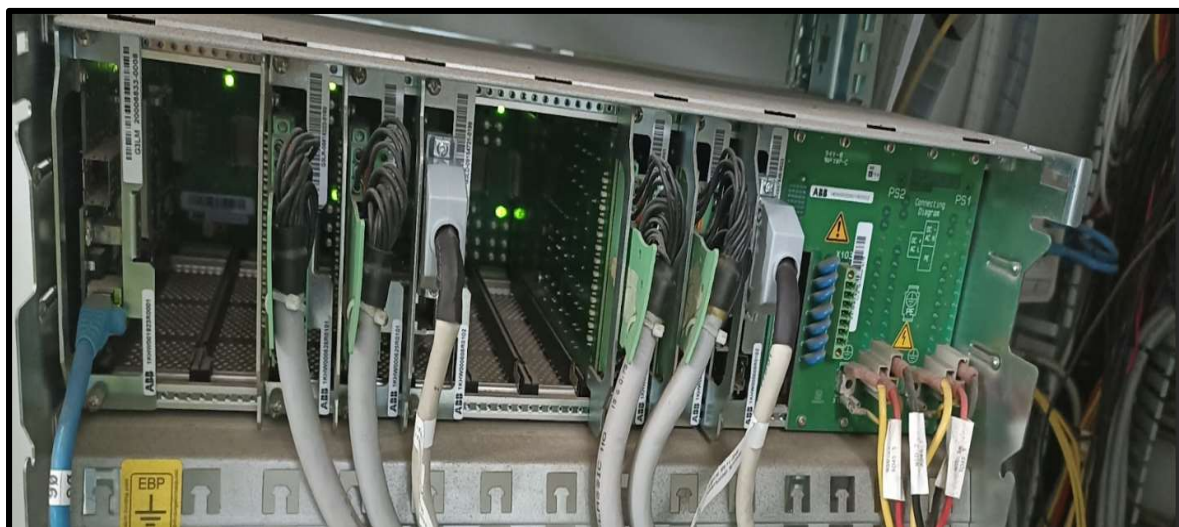
*Nota:* tarjetería de multiplexor.



*Nota:* multiplexor en parte inferior y equipo teleprotección en parte superior.



*Nota:* instalación de amplificador óptico.

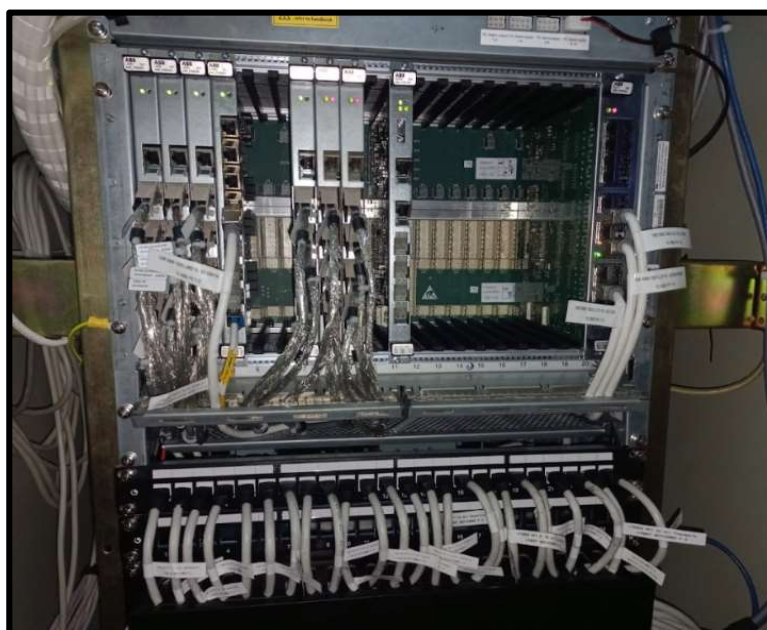


*Nota:* conexión de cable serial al equipo de teleprotección.





*Nota:* conexión de fibra multimodo conector ST en el lado del relé.



*Nota:* instalación de multiplexor en el Centro de Control 1.