

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIONES

**INVESTIGACIÓN PREVIA A LA OBTENCION DEL TÍTULO
DE MASTER EN REDES DE COMUNICACIONES**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO INALÁMBRICO-FIBRA
PARA TRANSMISIÓN DE DATOS DE MEDIDORES
INTELIGENTES DE ENERGÍA EN REDES SMART GRID.”**

MILTON GONZALO RUIZ MALDONADO

QUITO, MAYO 2016

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la vida y darme la oportunidad de culminar esta nueva meta.

A la Universidad Politécnica Salesiana por ser la institución que me ha auspiciado en los estudios de maestría.

Al Ing. Germán Arévalo por sus consejos y su tiempo dedicado a la tutela y culminación de este proyecto.

Un agradecimiento especial a Msc. Viviana Montalvo por el apoyo y la confianza depositada en mí.

A la Pontificia Universidad Católica y sus docentes por todo el conocimiento impartido.

DEDICATORIA

A mi esposa compañera de triunfos y luchas por el apoyo y el amor que dedica día a día a nuestra familia.

A mis hijos Martín y Mía por ser el pilar y fortaleza de mi vida.

A mi madre Leonor por su abnegación y apoyo incondicional.

A mis familiares Esperanza, Gustavo, Deysi, Ramiro, Nelson, Martha, Vero y a todas las personas que han permitido culminar este proyecto.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1 REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Antecedentes	5
1.4 Objetivo General:	9
1.5 Objetivos Específicos:	9
2 MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Modelo de la red eléctrica inteligente	10
2.1.1 NIST	10
2.2 Infraestructura de comunicación en redes eléctricas inteligentes.....	14
2.2.1 Red de área domestica (Home Area Network)	16
2.2.2 Red de área de vecindario (Neighbourhood Area Network).....	17
2.2.3 Red de área amplia (Wide Area Network).....	18
2.2.4 Empresarial	19
2.2.5 Externo	20
2.3 Gestión de la demanda en redes eléctricas inteligentes.....	20
2.4 Comunicaciones inalámbricas	22
2.4.1 ZigBee	23
2.4.2 WiMAX	24

2.4.3	Sistema Celular	25
2.5	Comunicaciones ópticas	31
2.5.1	Comunicaciones por fibra óptica	31
2.5.2	Componentes de una red óptica	33
2.5.3	Propiedades de propagación de la luz	34
2.5.4	Reflexión total interna.....	35
2.5.5	Componentes que afectan la transmisión por fibra óptica	36
2.5.6	Fibra óptica.....	40
2.5.7	Redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks).....	43
2.5.8	Multiplexación por división de longitud de onda	45
2.5.9	SONET/SDH.....	47
3	DIMENSIONAMIENTO DE RED.....	51
3.1	Situación Actual de la medición inteligente en Ecuador.....	51
3.2	Selección de tecnología inalámbrica	54
3.3	Definición del Área de cobertura	57
3.3.1	NAN	57
3.3.2	WAN	61
3.4	Cálculos	64
3.4.1	Cálculo y dimensionamiento de los enlaces inalámbricos.....	64
3.4.2	Cálculo y dimensionamiento de los enlaces de fibra óptica.	84
4	DISEÑO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO.....	93
4.1	Diseño de la red	93
4.2	Simulación de telecomunicaciones.....	98
4.2.1	Simulación	99
4.3	Análisis económico	121
4.3.1	Cálculo de inversión del proyecto.....	125

4.4	Análisis legal	133
4.4.1	Consideraciones de seguridad y privacidad	133
4.4.2	Mayor potencial de robo o violación de datos	133
4.4.3	Garantías constitucionales.....	134
5	CONCLUSIONES	136
6	RECOMENDACIONES	139
7	BIBLIOGRAFÍA	140
8	ANEXOS	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tecnologías de comunicación inalámbrica para medición inteligente.	23
Tabla 2.2 Jerarquía SONET/SDH	50
Tabla 3.1 Requisitos para medición inteligente	55
Tabla 3.2 Comparación de tecnologías inalámbricas.....	56
Tabla 3.3 Cantidad de radio bases CNT E.P a julio 2015.....	59
Tabla 3.4 Características GSM evolución a GPRS	64
Tabla 3.5 Caracteres up-stream medición inteligentes	66
Tabla 3.6 Caracteres down-stream medición inteligente	67
Tabla 3.7 Lectura anual por provincia	68
Tabla 3.8 Cálculo tráfico up-stream.....	69
Tabla 3.9 Cálculo tráfico down-stream.....	70
Tabla 3.10 Cálculo de tráfico por provincia.....	72
Tabla 3.11 Cálculo de capacidad GSM CONECEL.SA	73
Tabla 3.12 Cálculo de canales dependiendo del grado de servicio.....	75
Tabla 3.13 Grado de uso de infraestructura celular para medición inteligente.....	77
Tabla 3.14 Capacidad de almacenamiento anual por provincia.....	79
Tabla 3.15 Duración en horas para medición inteligente.....	81
Tabla 3.16 Velocidad en kbps requerida por provincia para medición remota	83
Tabla 3.17 Distancia entre las empresas de distribución y CENACE	85
Tabla 3.18 Parámetros Red de transporte óptico corta distancia a 10 Gbps.....	86
Tabla 3.19 Parámetros Red de transporte óptico larga distancia a 10 Gbps.....	88
Tabla 3.20 Distancia de transmisión máxima con fibra óptica sin amplificación	90
Tabla 3.21 Ancho de banda calculado en MHz.	91
Tabla 3.22 Capacidad del canal en Mbps.....	92
Tabla 4.1 Frecuencias de transmisión DWDM.....	100
Tabla 4.2 Potencia de salida y recepción dependiente de la distancia.....	101
Tabla 4.3 Regulación de ganancia-compensación vs distancia	102
Tabla 4.4 Tráfico generado a nivel nacional	116
Tabla 4.5 Proyección de abonados al sector eléctrico residencial	121
Tabla 4.6 Costo estimado anual por lecturas en sitio de medidores	122

Tabla 4.7 Costo estimado anual por cortes y reconexiones	123
Tabla 4.8 Costo anual estimado por pérdidas comerciales	124
Tabla 4.9 Inflación estimada hasta el año 2035	125
Tabla 4.10 Costo por minuto a celular	126
Tabla 4.11 Costo por Mbps.....	126
Tabla 4.12 Ingresos por medición inteligente	127
Tabla 4.13 Egresos por medición inteligente	129
Tabla 4.14 Flujo efectivo	130
Tabla 4.15 Ingresos y egresos actualizados.	131
Tabla 4.16 Indicadores de factibilidad financiera	132
Tabla 8.1 Configuración carrier 1	144
Tabla 8.2 Mpls R1	145
Tabla 8.3 Vecinos ospf R1	145
Tabla 8.4 Mpls R6.....	145
Tabla 8.5 Vecinos ospf R6.....	146
Tabla 8.6 Mpls R11	146
Tabla 8.7 Vecinos ospf R11	147
Tabla 8.8 Configuración carrier 2.	147
Tabla 8.8.9 Mpls R2.....	148
Tabla 8.10 Vecinos ospf R2.....	148
Tabla 8.11 Mpls R7.....	149
Tabla 8.12 Vecinos ospf R7.....	149
Tabla 8.13 Mpls R12.....	150
Tabla 8.14 Vecinos ospf R7.....	150
Tabla 8.15 HSRP en router R3.....	150
Tabla 8.16 GLBP en router R3	151
Tabla 8.17 Vecinos EIGRP proceso 100 en R3	151
Tabla 8.18 Vecinos EIGRP proceso 200 en R3.	152
Tabla 8.19 HSRP en router R4.....	152
Tabla 8.20 GLBP en router R4	152
Tabla 8.21 Vecinos EIGRP proceso 100 en R4.....	153
Tabla 8.22 Vecinos EIGRP proceso 200 en R4	153

Tabla 8.23 Establecimiento de seguridades ipsec	153
Tabla 8.24 HSRP en router R8.....	154
Tabla 8.25 GLBP en router R8	154
Tabla 8.26 Vecinos EIGRP proceso 100 en R8	155
Tabla 8.27 Vecinos EIGRP proceso 200 en R8	155
Tabla 8.28 HSRP en router R9.....	155
Tabla 8.29 GLBP en router R9	156
Tabla 8.30 Vecinos EIGRP proceso 100 en R9	156
Tabla 8.31 Vecinos EIGRP proceso 200 en R9	156
Tabla 8.32 HSRP en router R13.....	157
Tabla 8.33 GLBP en router R13	157
Tabla 8.34 Vecinos EIGRP proceso 100 en R13	158
Tabla 8.35 Vecinos EIGRP proceso 200 en R13	158
Tabla 8.36 HSRP en router R14.....	158
Tabla 8.37 GLBP en router R14	159
Tabla 8.38 Vecinos EIGRP proceso 100 en R14	159
Tabla 8.39 Vecinos EIGRP proceso 200 en R14	160

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 Evolución de la medición inteligente.....	6
Gráfico 1.2 Visión mundial de la medición inteligente	8
Gráfico 2.1 NIST modelo conceptual de la red eléctrica inteligente	11
Gráfico 2.2 Infraestructura de comunicación de la red eléctrica inteligente.....	15
Gráfico 2.3 Comunicaciones para medición inteligente	17
Gráfico 2.4 Tecnologías y protocolos de comunicación para redes NAN.....	18
Gráfico 2.5 Tecnologías y protocolos de comunicación para redes WAN	19
Gráfico 2.6 Tiempo de ida y vuelta en transmisión de pequeños paquetes de datos.	27
Gráfico 2.7 Handover sistema celular	28
Gráfico 2.8 Canales de voz y control comunicaciones celulares	29
Gráfico 2.9 Componentes red óptica.....	33
Gráfico 2.10 Reflexión y refracción.....	35
Gráfico 2.11 Ángulo crítico para reflexión total interna.....	36
Gráfico 2.12 Dispersión modal.	37
Gráfico 2.13 Dispersión cromática.	38
Gráfico 2.14 Dispersión por modo de polarización	38
Gráfico 2.15 Atenuación de la fibra óptica en función de la longitud de onda.....	39
Gráfico 2.16 Cable OPGW	42
Gráfico 2.17 Cable ADSS	43
Gráfico 2.18 Redes PON con FTTx.....	44
Gráfico 3.1 Topología de red para medición inteligente.....	53
Gráfico 3.2 Cobertura celular por operadora	61
Gráfico 3.3 Red nacional de fibra óptica CELEC E.P	62
Gráfico 3.4 Red backbone CELEC EP-TRANSELECTRIC.....	63
Gráfico 4.1 Arquitectura de comunicación en redes inteligentes.	94
Gráfico 4.2 Diseño de red medición inteligente.....	95
Gráfico 4.3 Medición inteligente usando la red celular	95
Gráfico 4.4 Red WAN con DMVPN	96
Gráfico 4.5 Red LAN MDMS.....	97
Gráfico 4.6 Diseño de red óptica.....	100

Gráfico 4.7 Potencia de salida vs potencia de recepción	101
Gráfico 4.8 Ganancia vs Distancia.....	103
Gráfico 4.9 Compensación vs Dispersión.....	103
Gráfico 4.10 Distribución jerárquica de redes	105
Gráfico 4.11 Topología física de red.....	106
Gráfico 4.12 Dirección ip y adaptadores de red zona 2	107
Gráfico 4.13 Dirección ip y adaptadores de red zona 1	108
Gráfico 4.14 Dirección ip y adaptadores de red zona 3	109
Gráfico 4.15 Configuración DMVPN del router R3.....	110
Gráfico 4.16 Respuesta del comando ping desde la zona 1 hacia la zona 2	110
Gráfico 4.17 Respuesta del comando tracert desde la zona 1 hacia la zona 2	111
Gráfico 4.18 Configuración DMVPN del router R14.....	111
Gráfico 4.19 Respuesta del comando ping desde la zona 3 hacia la zona 2	112
Gráfico 4.20 Respuesta del comando tracert desde la zona 3 hacia la zona 2	112
Gráfico 4.21 Túnel 100 apagado.....	113
Gráfico 4.22 Pérdida y restablecimiento de conexión	113
Gráfico 4.23 Ruta con túnel 200	114
Gráfico 4.24 Conexión con túnel 200	114
Gráfico 4.25 Ruta con túnel 200	114
Gráfico 4.26 Tráfico generado en la zona 1	115
Gráfico 4.27 Tráfico generado en la zona 2.....	115
Gráfico 4.28 Tráfico generado en la zona 3.....	116
Gráfico 4.29 Panel de control medición avanzada.....	118
Gráfico 4.30 Programación Labview medición avanzada	118
Gráfico 4.31 Panel de control nacional.....	119
Gráfico 4.32 Programación Labview CENACE	119
Gráfico 4.33 Aplicación cliente	120
Gráfico 8.1 Espectro eléctrico recepción a 100 km	161
Gráfico 8.2 Espectro eléctrico recepción a 200 km	161
Gráfico 8.3 Espectro eléctrico recepción a 300 km	162
Gráfico 8.4 Espectro eléctrico recepción a 400 km	162
Gráfico 8.5 Espectro eléctrico recepción a 500 km	163

Gráfico 8.6 Diagrama del ojo recepción 100 km	163
Gráfico 8.7 Diagrama del ojo recepción 200 km	164
Gráfico 8.8 Diagrama del ojo recepción 300 km	164
Gráfico 8.9 Diagrama del ojo recepción 400 km	165
Gráfico 8.10 Diagrama del ojo recepción 500 km	165
Gráfico 8.11 Espectro óptico en transmisión	166
Gráfico 8.12 Espectro óptico en recepción a 100 km	166
Gráfico 8.13 Espectro óptico en transmisión	167
Gráfico 8.14 Espectro óptico en recepción a 200 km	167
Gráfico 8.15 Espectro óptico en transmisión	168
Gráfico 8.16 Espectro óptico en recepción a 300 km	168
Gráfico 8.17 Espectro óptico en transmisión	169
Gráfico 8.18 Espectro óptico en recepción a 400 km	169
Gráfico 8.19 Espectro óptico en transmisión	170
Gráfico 8.20 Espectro óptico en recepción a 500 km	170

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Número de canales duplex disponibles	30
Ecuación 2.2 Capacidad del sistema	30
Ecuación 2.3 Vecino co-canal.....	31
Ecuación 2.4 Ley de reflexión de la luz.....	34
Ecuación 2.5 Ley de Snell.....	34
Ecuación 2.6 Coeficientes de reflexión.....	35
Ecuación 2.7 Ángulo crítico para reflexión total interna	36
Ecuación 2.8 Ecuación no lineal de Schrödinger.....	37
Ecuación 3.1 Presupuesto de potencias.....	88
Ecuación 3.2 Presupuesto de potencias simplificado.....	89
Ecuación 3.3 Ancho de banda.....	90
Ecuación 3.4 Capacidad del canal.....	91
Ecuación 4.1 Costo anual por lecturas	122
Ecuación 4.2 Costo anual por cortes y reconexión nacional.....	123
Ecuación 4.3 Costo anual por pérdidas comerciales.....	124
Ecuación 4.4 Tasa de actualización	130

RESUMEN

El presente proyecto plantea el diseño de la red de telecomunicaciones para medición avanzada en redes eléctricas inteligentes.

El primer capítulo presenta el estado del arte de las tecnologías y medios de comunicación empleados en medición avanzada de energía eléctrica.

El segundo capítulo presenta el dimensionamiento y cálculos de la red de telecomunicaciones, tomando en consideración tecnologías y parámetros como cobertura, latencia, costos de implementación, arriendo de infraestructura y mantenimiento.

El tercer capítulo muestra el diseño de la red de telecomunicaciones y simulaciones de los diferentes componentes de la red eléctrica inteligente.

El cuarto capítulo presenta los análisis financieros y legales concernientes a la viabilidad del proyecto.

ABSTRACT

This project show the design of telecommunications network for advanced metering in smart grids.

The first chapter presents the state of the art about the technologies and media used in advanced power measurement.

The second chapter presents the dimensioning and calculations of the telecommunications network, taking into account technologies and parameters such as coverage, latency, implementation costs, rental and maintenance of infrastructure.

The third chapter presents the design of the telecommunications network and simulations of the different components of the smart grid.

The fourth chapter presents the financial and legal analysis concerning the feasibility of the project.

1 REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

1.1 Introducción

Alrededor del mundo los sistemas eléctricos se encuentran en constante evolución debido a la relevancia en el desarrollo económico y social de los países. Una parte fundamental de la red eléctrica inteligente es la medición avanzada en la que se incorpora el uso de telecomunicaciones. Los beneficios obtenidos se reflejan en altos niveles de disponibilidad, confiabilidad, seguridad, eficiencia, calidad de energía en la generación, transmisión, distribución y sobre todo ambientalmente sostenible permitiendo el desarrollo productivo y mejorando la calidad de vida de la población.

Existen diferentes tipos de infraestructuras para medición inteligente dependiendo de los tipos de redes de datos, tecnologías que se involucran en las comunicaciones y medios de transmisión, tomando en consideración protocolos y normativas que permiten el envío de información entre medidores eléctricos inteligentes y concentradores.

Ecuador a través de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, ha creado el Plan Nacional Para El Buen Vivir, en el cual consta el cambio de la matriz energética. Como principal componente de la nueva matriz energética es el incremento de la participación de energías renovables ejecutando obras hidroeléctricas de gran envergadura como Coca-Codo-Sinclair, Sopladora, Minas-San Francisco, Delsintanisagua, Manduriacu, Mazar-Dudas, Toachi-Pilatón y Quijos. Para el año 2016 se espera que se encuentren en operación los ocho proyectos

hidroeléctricos, suministrando más del 90% de energía hidro-eléctrica.(El mercurio, 2014)

La presente investigación propone un proceso que permita optimizar el uso de los nuevos recursos energéticos ya que son bienes costosos y escasos. Lo que se busca con la presente investigación es dar un paso hacia la infraestructura de medición avanzada conocida como AMI (Advanced Metering Infrastructure), la cual vincula tecnologías de comunicación con los dispositivos de medición de energía eléctrica, permitiendo el intercambio bidireccional de información entre el medidor del abonado y la empresa de comercialización y distribución, brindando nuevos servicios a los usuarios, reduciendo tiempo en la toma lecturas y en cortes-reconexiones, lo que se traduce en un ahorro de recursos económicos tanto para los usuarios como para las empresas eléctricas.

1.2 Justificación

El presente proyecto plantea diseñar la red de interconexión entre las empresas distribuidoras de energía y el CENACE, demostrando las ventajas de la transmisión de datos desde los medidores de energía eléctrica hacia el concentrador. La información almacenada en el concentrador es enviada por medio de fibra óptica al centro de monitoreo y control de energía.

Las nuevas políticas implementadas en Ecuador, como el Plan Nacional de Desarrollo, que es el instrumento al que se sujetan los proyectos públicos, establece que: “Los planes y programas para el uso eficiente de la energía deben centrarse fundamentalmente en los sectores industrial y residencial.”(Senplades, 2009: 115). *“Fortalecer la soberanía energética con un cambio de la matriz energética hacia tecnologías limpias y más eficientes.”*(Senplades, 2009: 118).

Los primeros resultados de las nuevas políticas de estado se refleja en el “Programa de Redes Inteligentes Ecuador” denominado REDIE, marcando las fases de desarrollo, las áreas de enfoque, las etapas del proyecto y los criterios a tomar en cuenta como la medición de energía con el objetivo de formar un sistema eléctrico inteligente en Ecuador.

La red de energía eléctrica del futuro combina diversas tecnologías entre la producción, transmisión, distribución, comercialización y el consumidor. Los contadores inteligentes de energía eléctrica brindan el primer paso hacia la nueva etapa en el sistema eléctrico de potencia conocida como smart grid, permitiendo realizar planes de generación adaptables a la demanda real.

El estudio de la transmisión de datos de los medidores inteligentes de energía eléctrica residencial, determinará los protocolos de comunicación más eficientes tomando en cuenta parámetros técnicos y económicos, mejorando el servicio, la eficiencia y la confiabilidad proporcionando información a los centros de control, optimizando la producción y la distribución de electricidad, transformando al sistema de energía eléctrica, permitiendo la participación activa tanto de las empresas de generación, transmisión y distribución, como los consumidores finales de energía eléctrica, por medio de una red eléctrica inteligente.

La infraestructura de medición avanzada por sus siglas en inglés AMI, incorpora al usuario final en la cadena de gestión de información. Esta nueva tecnología permite interactuar con el cliente, personalizando el consumo, con nuevas alternativas para acceder al servicio en condiciones de calidad, economía y a la medida del cliente.

Los principales aspectos a destacar en un sistema de medición inteligente de energía eléctrica es la medición prepago, transmisión de datos, propiedad del canal de comunicación, costo de comunicación, mantenimiento, equipos de comunicación, automatización de la gestión comercial de los clientes (corte y reconexión), control del vínculo cliente/red, control de pérdidas (detección de fraude, alarmas, análisis automático de tendencias, balances), integración con otros sistemas de información (técnico, comercial, calidad, gestión de daños), soporte, infraestructura adicional para mantenimiento, comunicación bidireccional entre el medidor y la empresa. Es por ello que es un aspecto fundamental el considerar la interoperabilidad entre las tecnologías propietarias y compatibilidad mínima entre fabricantes.

1.3 Antecedentes

El cambio en la medición de energía eléctrica se realiza desde el año de 1970 con la incorporación de envío de datos, la comunicación en los años 70 fue unidireccional, es decir, desde el usuario hasta la empresa distribuidora. La primera etapa de comunicación en la medición de energía eléctrica fue AMR (Automatic Meter Reading) y duró alrededor de 30 años dando paso a la evolución, llamada medición inteligente o smart metering. La medición inteligente requiere de infraestructura de telecomunicaciones robusta, permitiendo la comunicación de los dispositivos de medición con la empresa de comercialización y distribución. Como meta para el año 2020 es la incorporación de toda la red eléctrica.

La red eléctrica está compuesta por generación, transporte, distribución, comercialización, almacenamiento y consumo. Todos los actores son controlados por medio de telecomunicaciones, obteniendo mayores beneficios y rentabilidad en el mercado eléctrico.

A partir del año 2000, a nivel mundial han evolucionado los desarrollos en medición de energía eléctrica. El despliegue de infraestructura de telecomunicaciones en la red de energía eléctrica se lo ve como un rompecabezas, cada pieza de la red inteligente se expande a diferente velocidad, la prioridad y el primer paso a nivel mundial es la implementación de medidores inteligentes.

El gráfico 1.1 muestra la evolución en la medición, desde los ineficientes medidores electro-mecánicos en la década de los años 70's, pasando por AMR que brinda

comunicación en una vía en los 80's y como meta la medición avanzada para el 2020.

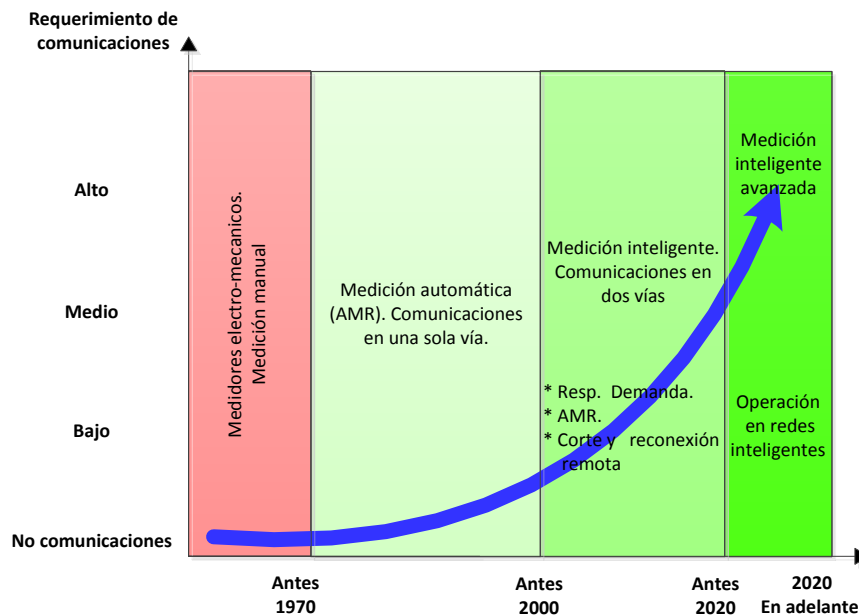


Gráfico 1.1 Evolución de la medición inteligente

(Ekanayake & Liyanage, 2012: 84)

El continente que lidera la innovación tecnológica en medición de energía eléctrica es Europa. Las políticas sobre redes eléctricas inteligentes en la unión Europea deben alinearse de acuerdo a la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de abril de 2009, la misma que fomenta y promueve el uso de energías procedentes de fuentes renovables y tiene como meta para el año 2020 instalar medidores inteligentes al 80% de los consumidores de electricidad. (Parlamento Europeo, 2009: 30-32)

En Italia a partir del año 2001, la empresa eléctrica Enel inició el proyecto de cambio de medidores electromecánicos a medidores inteligentes. Enel es la primera empresa

a nivel mundial en sustituir los viejos contadores electro-mecánicos con medidores electrónicos con telecomunicaciones conocidos como medidores inteligentes, instalando en cinco años alrededor de 32 millones de medidores eléctricos convirtiéndose en la infraestructura de administración remota más grande y más extensa del mundo.(Enel, 2015)

En España, la empresa Endesa, lidera la implementación de medición inteligente y ha reemplazado 13 millones de contadores alineándose con las políticas europeas. La meta fijada para el año 2020, es el reemplazo del 80% de medidores electromecánicos, esto es alrededor de 50 millones de medidores. (Enerzuul, 2011)

En USA la implementación a gran escala comenzó en el estado de California por la compañía Pacific Gas & Electric, instalando alrededor de 9 millones de medidores eléctricos inteligentes hasta el año 2006. Se estima una inversión de US\$ 2.2 billones hasta el año 2012. (Weranga, Kumarawadu, & Chandima, 2014: 11)

En América del Sur países como Brasil, Argentina y Colombia poseen estudios de implementación y están empezando a desplegar la instalación de medidores inteligentes. (García, Garcés, & Atiaja, 2012: 31-41)

En China la corporación State Grid encargada de la investigación de la red eléctrica inteligente ha implementado 17.4 millones de medidores eléctricos inteligentes hasta el año 2011. (Weranga et al., 2014: 13)

En Japón el desarrollo en medición avanzada ha permitido la expansión de redes eléctricas inteligentes a través de su territorio, instalando a su vez 10 millones de medidores a sus abonados del servicio eléctrico(Weranga et al., 2014: 13).

La medición avanzada presenta gran expansión en Europa, América del Norte, Asia y Australia. Cabe destacar a Italia como el país a nivel mundial que lidera la implementación de medidores inteligentes. Países en vías de desarrollo muestran baja o nula penetración de medición avanzada, por ejemplo en Ecuador solo se realiza medición avanzada en la ciudad de Guayaquil.

El gráfico 1.2 muestra los países con despliegue de medición avanzada a nivel mundial.

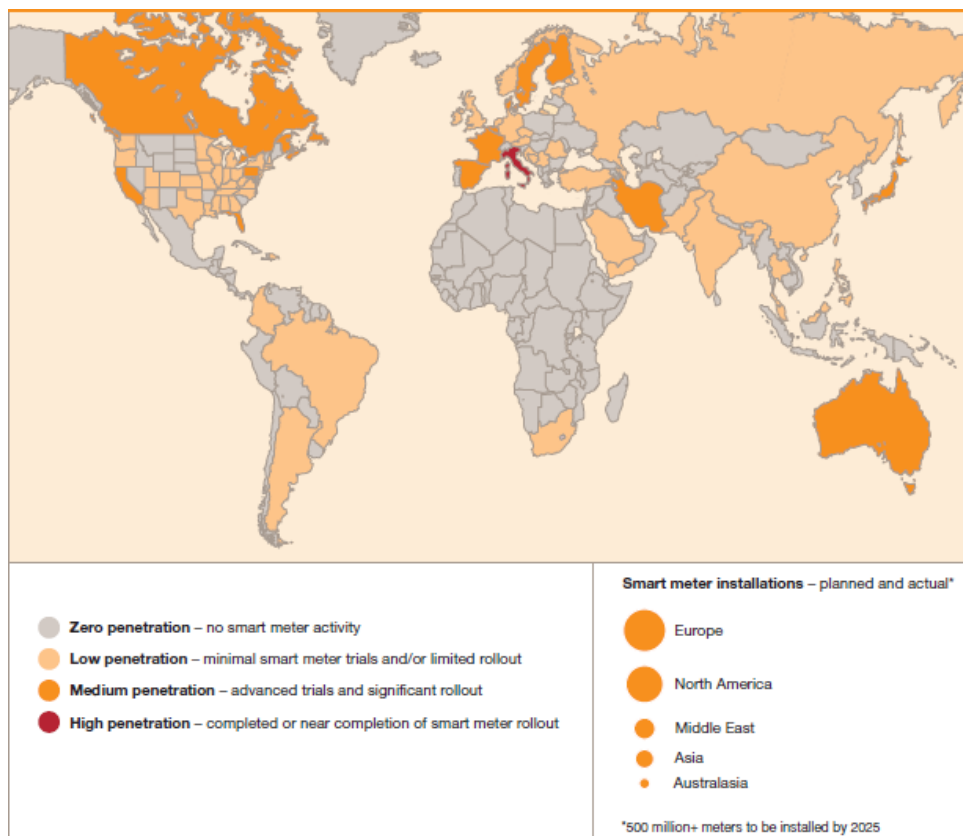


Gráfico 1.2 Visión mundial de la medición inteligente

(Meadows, 2010: 5)

1.4 Objetivo General:

Diseñar un sistema híbrido inalámbrico-fibra para transmisión de datos de medidores inteligentes de energía en redes de medición avanzada.

1.5 Objetivos Específicos:

Investigar los protocolos de comunicación entre medidores inteligentes de energía eléctrica apropiados para el sistema de medición avanzada a ser diseñado.

Determinar parámetros técnicos necesarios para implementar un sistema de medición avanzada.

Diseñar un prototipo de red de comunicaciones para medidores inteligentes de energía eléctrica.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Modelo de la red eléctrica inteligente

En las últimas décadas los sistemas eléctricos de potencia se han desarrollado muy lentamente, sin embargo a partir del nuevo milenio los sistemas eléctricos han evolucionado dando respuesta a los nuevos requerimientos convirtiéndose en redes eléctricas inteligentes. Debido a la conciencia ecológica que ha despertado en todos los órdenes sociales, las nuevas redes eléctricas inteligentes integran energías renovables a gran escala maximizando la eficiencia desde la generación hasta el consumo con la colaboración de sistemas de cómputo, monitoreo, control, infraestructura de comunicación, sensores y actuadores.

La red eléctrica inteligente es considerada como la agrupación de numerosos sistemas y subsistemas interconectados con la finalidad de brindar seguridad, confiabilidad, vida útil, interoperabilidad, rentabilidad, consumo mínimo de energía, bajos costos de instalación y mantenimiento para suministrar energía eléctrica respondiendo al crecimiento de la demanda.

2.1.1 NIST

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST) de los Estados Unidos de América concentra estándares como los del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI), Comisión de Investigación Europea (ECR), Comisión Internacional de Electrotécnia (IEC) y representa a la red eléctrica inteligente mediante siete

dominios que son Generación, Transmisión, Distribución, Abonados, Mercado, Operador y Proveedor de servicios(Hossain, Han, & Poor, 2012: 5).

El modelo conceptual desarrollado por NIST permite identificar las posibles vías de comunicación entre los actores de la red eléctrica inteligente. Cada actor está comprendido dentro de un dominio por un grupo de aplicaciones permitiendo la toma de decisiones y el intercambio de información entre procesos a través de una variedad de medios y tecnologías de comunicación.

La figura 2.1 muestra la red eléctrica inteligente definida por NIST y representada por siete dominios, cada uno con interfaces de comunicación e interfaces eléctricas.

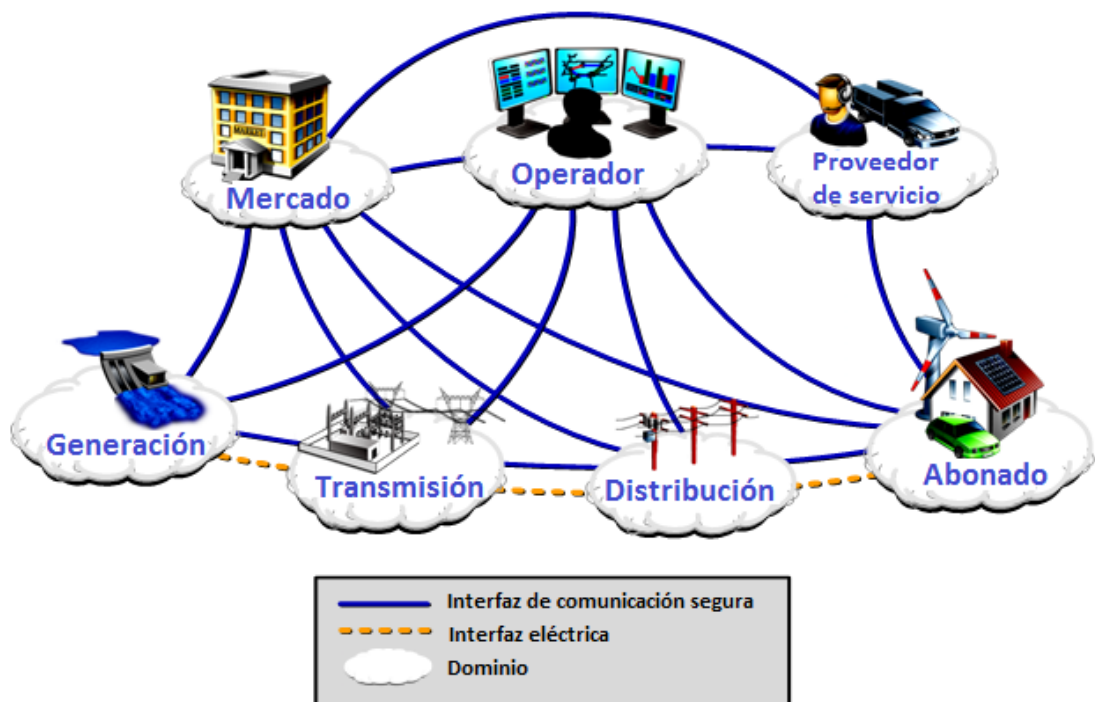


Gráfico 2.1 NIST modelo conceptual de la red eléctrica inteligente

(Sgic, 2013)

A continuación se describe la función de cada dominio en la red eléctrica inteligente.

Generación.- la generación es el primer proceso en el suministro de electricidad a los clientes. Se encarga de producir grandes cantidades de electricidad a partir de otras fuentes de energía, con la instalación de centrales eléctricas en lugares estratégicos. El dominio de la generación está conectado eléctricamente a los dominios de transmisión, distribución y al abonado. El principal beneficio que brinda la red eléctrica inteligente es la capacidad de redirigir automáticamente el flujo de energía de otras partes de la red cuando los generadores fallen.

Sistemas de transmisión.- los sistemas de transmisión se encargan de la transferencia masiva de energía eléctrica producida por las unidades de generación a través de largas distancias hasta llegar a los grandes consumidores y estaciones de sub-transmisión. El dominio de transmisión está conectado eléctricamente a los dominios de generación y distribución. Una eficiente transmisión de energía eléctrica involucra sistemas de monitoreo, control, estabilización y optimización permitiendo al operador mantener la estabilidad de la red eléctrica mediante el equilibrio entre la generación y la demanda.

Red de distribución.- la red de distribución conecta eléctricamente al dominio de transmisión y al dominio de los abonados a través de transformadores reductores de tensión. Consta de subestaciones automatizadas con dispositivos de vigilancia y control de los recursos energéticos. Los actores en el dominio de distribución pueden incluir dispositivos de almacenamiento, seccionadores, relés de protección y generación distribuida.

Abonados.- el dominio del cliente se conecta eléctricamente al dominio de distribución y presenta enlaces de comunicación con los dominios de distribución, operación, mercado y proveedor de servicios. La integración al sistema eléctrico inteligente crea un nuevo concepto que es la respuesta a la demanda permitiendo el manejo del consumo de energía eléctrica bajo ciertas condiciones como son horarios de producción y la integración de generación distribuida proveniente del incremento de fuentes renovables. Para brindar la respuesta a la demanda es necesaria la implementación de infraestructura de medición avanzada por sus siglas en inglés AMI. El elemento principal de AMI es el medidor eléctrico inteligente con capacidad para enviar, recibir y actuar de acuerdo a la información que viaja bidireccional entre los medidores de los abonados y la empresa distribuidora. Dentro del dominio existen tres tipos de clientes: residencial consumo menor a 20 kW, comercial entre 20-200kW e industrial superior a 200 kW(Sgic, 2013).

Mercado eléctrico.- el mercado eléctrico está comprendido por dominios de generación, transmisión, distribución, operación, proveedor de servicios y abonados. La comunicación en tiempo real es crítica ya que todos los dominios se involucran en la fijación de precios y el comercio de electricidad.

Operación.- los actores en el dominio de operación realizan la función de gestión del flujo de electricidad alcanzando el buen funcionamiento del sistema de energía. Consta con aplicaciones de monitoreo, control, análisis, gestión de fallos, estadísticas operativas.

Proveedor de servicios.- el proveedor de servicios organiza y ejecuta el soporte del servicio eléctrico, proporcionando servicios a los clientes como: instalación,

mantenimiento, facturación, gestión de energía respondiendo a las necesidades y requisitos de la evolución del mercado. El dominio proveedor de servicios está conectado eléctricamente con el dominio del cliente y posee comunicación con los dominios de mercado, operación y abonados. Las comunicaciones con el dominio de operación son fundamentales para el control del sistema. Las comunicaciones con el dominio de mercado y abonado permiten el crecimiento económico a través del desarrollo de nuevos servicios.

2.2 Infraestructura de comunicación en redes eléctricas inteligentes

La formación de redes eléctricas inteligentes se logra a través de la integración de telecomunicaciones a la infraestructura del sistema eléctrico. La arquitectura de comunicación está diseñada como un sistema abierto y cuenta con plataformas de integración permitiendo la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas.

El intercambio de datos entre dispositivos es posible a través de la infraestructura de medición avanzada AMI, permitiendo el flujo de información entre la generación y la demanda. AMI provee medición en tiempo real de medidores inteligentes, además se incluye detección de fallas y la participación del usuario. AMI está comprendido por unidades de agregación de datos por sus siglas en inglés DAU, los mismos que colectan y transmiten la información de los medidores eléctricos inteligentes a los sistemas de gestión de datos de medidores por sus siglas en inglés MDMS. Los sistemas de gestión de datos proveen almacenamiento, manejo y procesamiento de la información proporcionada por los medidores. Esta información es utilizada por los

sistemas eléctricos de potencia permitiendo una óptima generación, transmisión, distribución y comercialización.

El gráfico 2.2 muestra una visión general de la infraestructura de comunicación mediante un modelo jerárquico mostrando los miembros y tecnologías de cada zona.

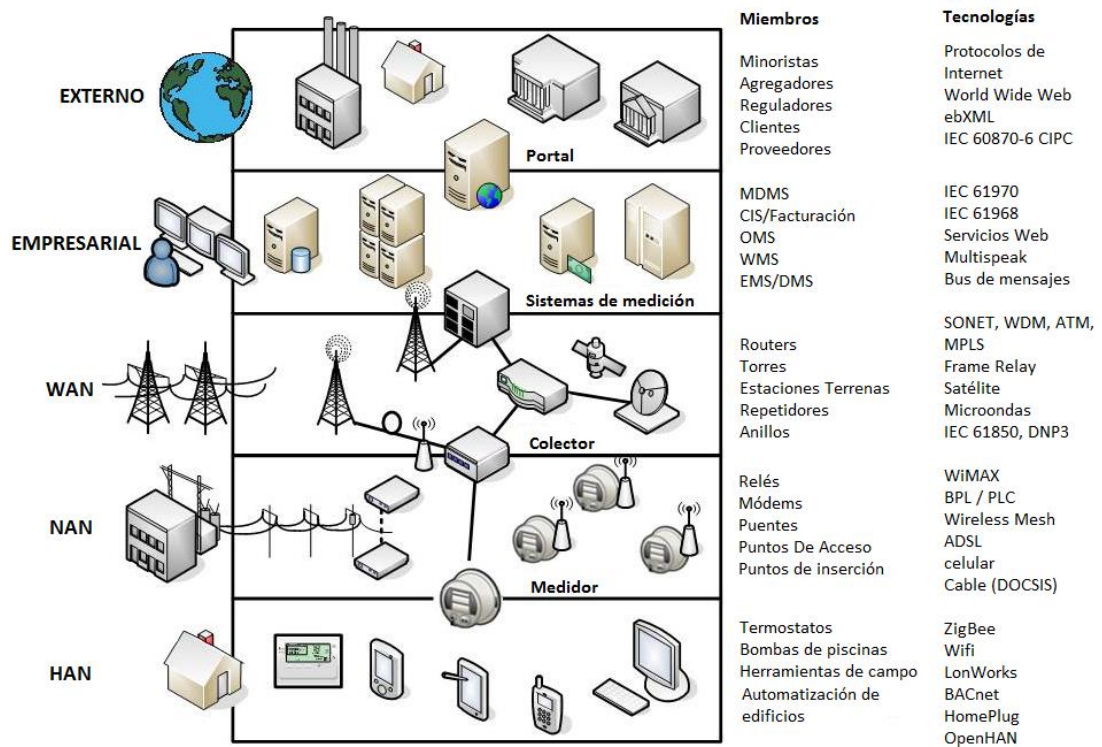


Gráfico 2.2 Infraestructura de comunicación de la red eléctrica inteligente

(Hossain et al., 2012: 7)

Las redes eléctricas inteligentes poseen cinco dominios de comunicación cada uno con su respectiva infraestructura. Los dominios son:

- Red de área domestica (HAN)
- Red de área de vecindario (NAN)

- Red de área extendida (WAN)
- Empresarial
- Externo

2.2.1 Red de área doméstica (Home Area Network)

La red de área doméstica por sus siglas en inglés HAN, es el subsistema más pequeño en la jerarquía de las comunicaciones de las redes eléctricas inteligentes. En la red de área doméstica se realiza la gestión de la demanda por sus siglas en inglés DSM, la cual maneja la eficiencia energética y la respuesta a la demanda. Las comunicaciones entre los usuarios y el generador de energía eléctrica es proactiva ya que permite producción en tiempo real. HAN está compuesta por dispositivos inteligentes que contienen sensores y actuadores por ejemplo los electrodomésticos, medidores inteligentes, tomas de energía eléctrica. Las comunicaciones permiten la creación de sistemas de gestión de energía eléctrica en el hogar por sus siglas en inglés HEMS, los sistemas ayudan a los usuarios a gestionar micro-generación y programar tareas de uso de la energía eléctrica en horarios donde la demanda es menor.

El medio de las comunicaciones en la red de área doméstica puede ser alámbrico como las comunicaciones por medio de la red eléctrica por sus siglas en inglés PLC. El medio inalámbrico utiliza tecnologías como Wi-Fi o ZigBee. La comunicación entre la red de área doméstica y las redes externas como la red de área de vecindario es por medio de dispositivos denominados gateways.

El gráfico 2.3 muestra las tres áreas y sus dispositivos que intervienen en la medición remota.

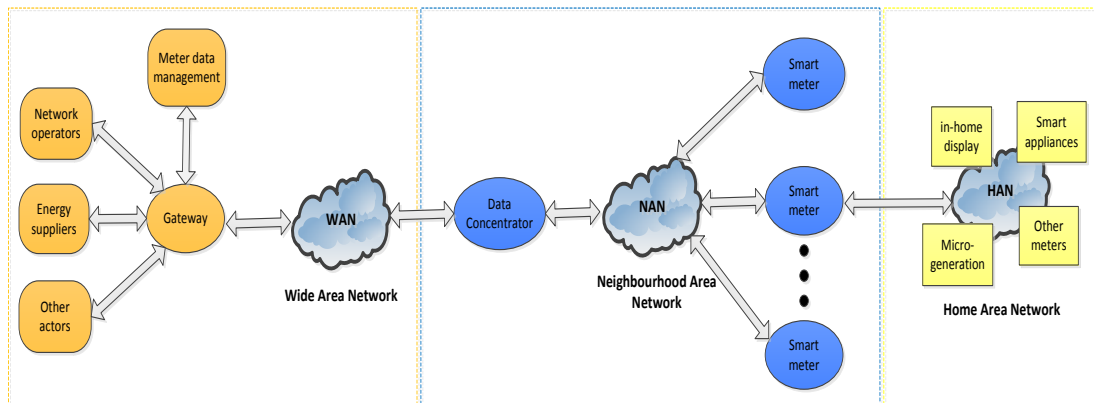


Gráfico 2.3 Comunicaciones para medición inteligente

(Ekanayake & Liyanage, 2012: 96)

2.2.2 Red de área de vecindario (*Neighbourhood Area Network*)

La red de área de vecindario por sus siglas en inglés NAN, abarca grandes distancias suministrando enlaces de comunicación a los medidores eléctricos inteligentes. El principal elemento que lo constituye es el concentrador, el cual detecta y gestiona los medidores inteligentes de forma automática, realizando lecturas de consumos y transfiriendo la información de los diagnósticos, actualizaciones de firmware y supervisión de las condiciones de los medidores a los centro de control.

La red NAN provee servicios de medición remota, monitoreo, control y detección de uso de energía sin autorización. Para conectar una red NAN con una red WAN es necesario una red de backhaul, donde los datos de todas las redes NAN son enviadas a la red WAN.

La gráfica 2.4 presenta los tipos de tecnologías de transmisión alámbrico o inalámbrico y los protocolos utilizados para medición avanzada.

Aplicación	Wireless					Wired			
Transporte									
Red	IPv4 IPv6	IPv4/IPv6 6LoWPAN/ ROLL	ZigBee	Z-Wave	IPv4 IPv6	IPv4 IPv6			
Enlace de Datos									
Física	IEEE 802.11 WiFi	IEEE802.15.4			3G/LTE	IEEE 802.16	IEEE 1901	DOCSIS	Ethernet

Gráfico 2.4 Tecnologías y protocolos de comunicación para redes NAN

(Berger & Iniewski, 2012: 132)

Los requerimientos de ancho de banda de las redes de vecindario dependen del área de cobertura donde se despliegue la medición inteligente. Entre las principales tecnologías de comunicación se tiene WiMAX y comunicaciones celulares como 3G o LTE.

2.2.3 Red de área amplia (Wide Area Network)

La red de área amplia por sus siglas en inglés WAN, está comprendida por la red de backbone, la red de área metropolitana y la red de backhaul.

La red de backbone conocida también como red de núcleo, proporciona alta capacidad de comunicación y baja latencia. Esta red conecta a las subestaciones generalmente utilizando fibra óptica.

La red de área metropolitana conecta las redes de backhaul en grandes ciudades o regiones metropolitanas.

La red de backhaul es el enlace entre la red WAN y NAN. Proporciona conectividad de banda ancha a la red NAN.

El principal servicio que presta la red WAN es el transporte de datos fiables por toda la red eléctrica inteligente permitiendo la operación de todos los sistemas. La privacidad, fiabilidad y seguridad de la información son los principales aspectos que se evalúan en la red WAN.

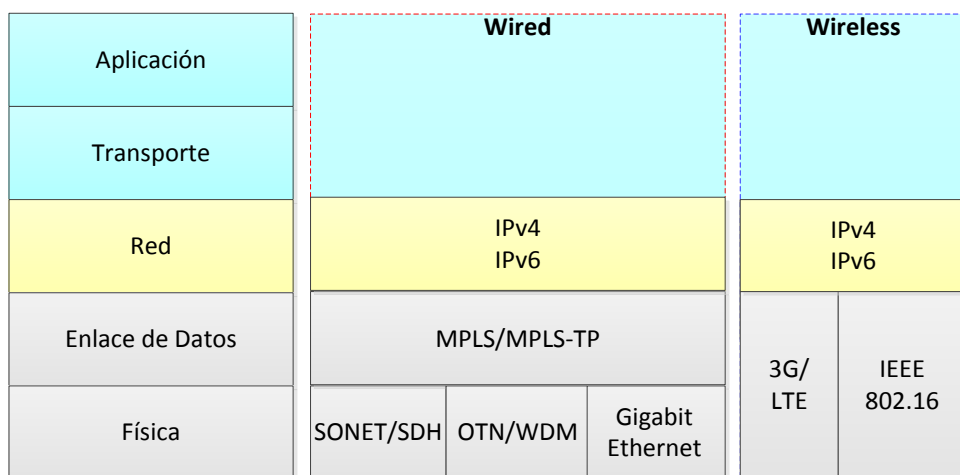


Gráfico 2.5 Tecnologías y protocolos de comunicación para redes WAN

(Berger & Iniewski, 2012: 136)

2.2.4 Empresarial

La entidad empresarial es responsable del procesamiento y análisis de todos los datos adquiridos en los diferentes dominios de la red eléctrica inteligente. Está constituido de sistemas de adquisición, supervisión y control de datos por sus siglas en ingles

SCADA y por sistemas de medición de área amplia por sus siglas en inglés WAMS permitiendo el monitoreo y control de toda la red eléctrica inteligente. En el dominio empresarial se ejecutan aplicaciones como los sistemas de gestión de datos de los medidores por sus siglas en inglés MDMS, sistemas de gestión de energía por sus siglas en inglés EMS, sistemas de gestión en la distribución por sus siglas en inglés DMS, sistemas de información al usuario por sus siglas en inglés CIS.

2.2.5 Externo

El dominio externo está comprendido por los proveedores y reguladores relacionados con la fijación de precios de la energía eléctrica en el mercado. Provee servicios innovadores con productos que satisfacen nuevas necesidades creadas por las redes eléctricas inteligentes.

Las comunicaciones desde el mercado externo y los proveedores de servicios deben ser fiables para que exista coherencia entre la producción de energía eléctrica y el consumo.

2.3 Gestión de la demanda en redes eléctricas inteligentes

Con la finalidad de brindar energía eléctrica limpia, accesible, confiable y que pueda evolucionar económica y social, nace la medición inteligente, la misma que mitiga las pérdidas en los sistemas que componen la red eléctrica inteligente mejorando la calidad del servicio gracias al entorno de telecomunicaciones.

Los contadores de energía electromecánicos y digitales presentan severas limitaciones debido a la restricción para calcular el costo de la energía, ya que los KWH consumidos son solo la suma en el transcurso del tiempo sin tener en cuenta el momento en que la energía fue suministrada y el costo de producción. Ésta es una de las razones por la que las empresas eléctricas están reemplazando los contadores de energía eléctrica residencial, comercial e industrial por medidores inteligentes, los mismos que permiten diferenciar los periodos de producción de energía eléctrica creando una facturación con precios en tiempo real.

La instalación de medidores con comunicaciones bidireccional entre el proveedor y el usuario permite el manejo eficiente de la energía ya que existe interacción entre el consumidor y el sistema eléctrico de potencia, posibilitando realizar el control de la carga, generación local y almacenamiento de energía.

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica reducen los costos en las lecturas del consumo ya que la medición es más precisa y se realiza remotamente permitiendo una mejor planificación de la generación y mantenimiento. Las pérdidas comerciales disminuyen debido a que la detección de fraude y robo es más sencilla.

Los consumidores ahorran energía como consecuencia del manejo de la información permitiendo realizar calendarios de consumo, la facturación es más frecuente y exacta. Facilita la adopción de la automatización en el hogar reduciendo el gasto energético.

Los beneficios globales se reflejan en un mejor servicio al cliente, se pueden generar esquemas de precios variables, facilita la integración de generación distribuida, el

suministro de energía brinda seguridad y confiabilidad y el uso de tecnologías de la información brinda confianza en todo el sistema eléctrico.

2.4 Comunicaciones inalámbricas

Las redes eléctricas inteligentes están formadas por tecnologías inalámbricas y son utilizadas por las redes de área amplia, las redes de área de vecindario y las redes del hogar ya que son de rápida implementación y reducen costos al ser más flexibles que tecnologías cableadas. Las comunicaciones inalámbricas utilizan radiofrecuencia (RF) dentro de un rango de frecuencias reguladas del espectro electromagnético lo que posibilita la movilidad y cobertura de grandes distancias.

Para el diseño de una red inalámbrica es necesario tomar en cuenta requerimientos como cobertura, capacidad, latencia y seguridad con la finalidad de obtener una red de comunicación inalámbrica eficiente.

La tabla 2.1 describe los tipos de tecnologías inalámbricas usadas en medición inteligente así como características y detalles técnicos.

Tecnología	Espectro	Tasa	Cobertura	Aplicaciones
ZigBee	868-915 MHz, 2.4 GHz	20-250 Kbps	10-100 m	HAN, AMI.
GSM	900-1800 MHz	Hasta 14.4 Kbps	1-10 Km	AMI, HAN.
GPRS	900-1800 MHz	Hasta 170 Kbps	1 - 10 km	AMI, HAN.

3G	1.92–1.98 GHz 2.11–2.17 GHz	384 Kbps 2 Mbps	1-10 km	AMI, HAN.
WiMAX	2.5 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz.	Hasta 75 Mbps	10-50 Km (LOS) 1-5 Km (NLOS)	AMI, HAN.

Tabla 2.1 Tecnologías de comunicación inalámbrica para medición inteligente.

(Gungor et al., 2011: 531)

Las bandas de frecuencia bajas son las más utilizadas debido que se propagan sin línea de vista por sus siglas en inglés NLOS y permiten la penetración de obstáculos con mayor facilidad que las frecuencias altas, es por esta razón que las bandas de frecuencias bajas son las menos disponibles para el uso. Las frecuencias inferiores a 11 GHz licenciadas o no licenciadas son utilizadas para aplicaciones NLOS.

Las bandas de frecuencias más altas implican mayor atenuación en la propagación de las señales de radio, las bandas de frecuencia altas están restringidas a las comunicaciones con línea de vista por sus siglas en inglés (LOS). Las bandas de frecuencias utilizadas para aplicaciones LOS están comprendidas entre 10 GHz y 66 GHz con anchos de banda típicos de los canales de 25 MHz o 28 MHz.

2.4.1 ZigBee

ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance, bajo consumo de energía, baja velocidad de datos y costos reducidos de implementación. Fue desarrollado por ZigBee Alliance para la automatización y domótica, es ideal

para el control de iluminación, monitoreo, control de energía y lectura automática de medidores inteligentes.

Opera en las bandas de radio no licenciadas ISM, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz ofreciendo 16 canales cada uno con un ancho de banda de 5 MHz. Presenta interferencia de numerosos dispositivos inalámbricos que operan en las mismas frecuencias. Posee seguridad de encriptación de datos AES de 128 bits, permitiendo la autenticación de las comunicaciones.

2.4.2 WiMAX

WiMAX es una tecnología de comunicaciones de banda ancha diseñada para dar cobertura inalámbrica a redes metropolitanas basada en el estándar IEEE 802.16. La cobertura es de alrededor de 5 km con una gran capacidad para conexiones inalámbricas y una baja latencia entre 10-50 ms. La capa física está especificada por la norma IEEE 802.16e alcanzando velocidades superiores a 40 Mbit/s. La capa de enlace de datos es orientada a conexión y contiene CSMA/CA para la contención en los enlaces de comunicación. WiMAX ha adoptado un gran número de avances tecnológicos como multiplexación por división de frecuencias ortogonales por sus siglas en inglés OFDM, múltiple entrada múltiple salida por sus siglas en inglés MIMO permitiendo la reutilización de frecuencias, eficiencia del ancho de banda y gran cobertura. El espectro de frecuencias licenciadas en las que WiMAX trabaja es 2.3 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz.(Hossain et al., 2012: 133-134)

2.4.3 Sistema Celular

La primera generación de estándares de comunicaciones móviles 1G fue conocida como servicio telefónico móvil avanzado por sus siglas en inglés AMPS y fue desplegada a partir de los años 80's. La red celular de primera generación provee canales de tráfico análogos con dos bandas de 25 MHz cada una.

La segunda generación de estándares de comunicaciones móviles conocida como 2G fue GSM año 1990, el método de acceso fue TDMA, IS-95 año 1993, el método de acceso CDMA y D-AMPS desarrollados para proporcionar señales de calidad con mayores velocidades de datos para el soporte de servicios digitales y mayor capacidad. Las mejoras que presento la segunda generación fue la creación de canales de tráfico digitales, encriptación, detección y corrección de errores. Como desventaja de las comunicaciones celulares de segunda generación fue la limitada velocidad para el uso de datos, aplicaciones multimedia y video.

La tercera generación de estándares de comunicaciones móviles es conocida como 3G y fue desplegada a partir del año 2000. 3G fue definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones por sus siglas en inglés ITU en el año 2000 en el comité IMT-2000. Fue creada con la finalidad de proporcionar comunicaciones inalámbricas de alta velocidad para aplicaciones multimedia, datos, video y voz. Entre las principales características se estableció 144 kbps de velocidad de datos para usuarios que se movilizan a altas velocidades, 384 kbps de velocidad de datos para usuarios a baja movilidad y 2 Mbps para uso de oficina.

La cuarta generación de estándares de comunicaciones móviles es conocida como 4G o LTE-Advanced y fue desarrollada por el mismo organismo que estandarizo GSM y

UMTS conocido como 3GPP. Un sistema 4G ofrece acceso móvil a internet de banda ancha para teléfonos inteligentes y otros dispositivos móviles. La tecnología 4G se refiere a las IMT-Avanzadas (Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas), definida por el ITU-R. Un sistema celular IMT-Advanced debe tener velocidades de datos pico de hasta aproximadamente 100Mbps para alta movilidad y aproximadamente 1Gbps para baja movilidad, traspasos suaves a través de redes heterogéneas y la capacidad para ofrecer alta calidad de servicio para el soporte multimedia de última generación.

Las redes celulares cubren grandes extensiones geográficas con gran eficiencia en el uso del espectro electromagnético reutilizando los canales de radio y reasignándolos a varias celdas ubicadas en diferentes áreas de cobertura conocidas como celdas co-canal. La interferencia entre celdas es amortiguada por la separación co-canal en las celdas. Cada celda está controlada por un transductor llamado estación base por sus siglas BS.

Los requisitos de red NAN son cubiertos con comunicaciones celulares, reduciendo costos en infraestructura de telecomunicaciones y costos de mantenimiento por parte de las empresas eléctricas de distribución. La cobertura es excelente ya que se encuentra extendida en la mayor parte del territorio nacional.

El gráfico 2.6 muestra el tiempo de retardo en la transmisión y recepción de pequeños paquetes de datos utilizando diferentes tecnologías de comunicación celular.

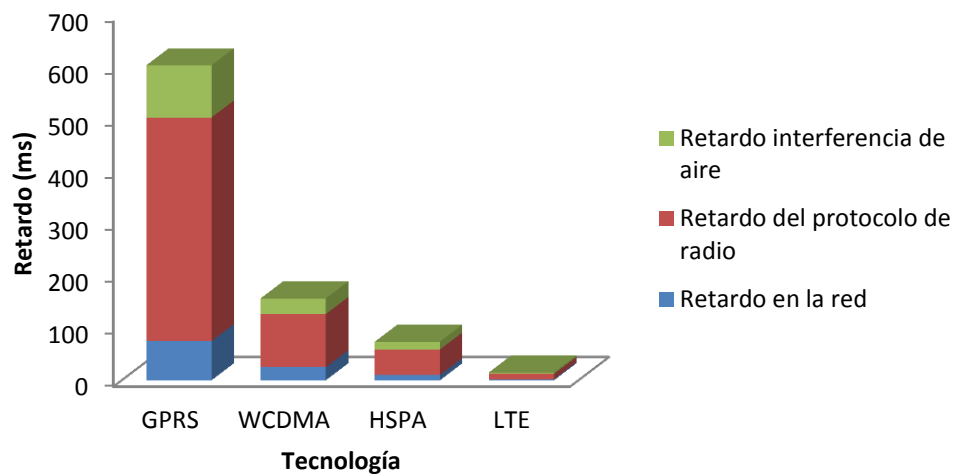


Gráfico 2.6 Tiempo de ida y vuelta en transmisión de pequeños paquetes de datos.

(Berger & Iniewski, 2012: 170)

GPRS presenta un retardo de 604 (ms), WCDMA presenta retardos de 157(ms), HSPA presenta retardos de 74 (ms), LTE presenta retardos de 15 (ms).

Los sistemas celulares pueden atender a un número limitado de dispositivos móviles simultáneamente. Esto se logra limitando la cobertura de las estaciones base a una pequeña área geográfica denominada celda, de esta manera se optimiza el uso del espectro electromagnético. Con este mecanismo se pueden reutilizar los canales de radio cada cierta distancia.

2.4.3.1 Componentes sistema celular

Los principales componentes involucrados en las comunicaciones celulares son los dispositivos celulares, las estaciones base y el centro de conmutación móvil.

Dispositivos celulares.- los dispositivos celulares pueden ser fijos o móviles, se comunican mediante radio frecuencia con una estación base. Los dispositivos celulares contienen circuitería de control, antena y transceiver.

Estación base.- generalmente la estación base se encuentra sobre torres de comunicación que contiene varias antenas de transmisión y recepción permitiendo comunicaciones full duplex. Su principal objetivo es conectar a los dispositivos celulares de la celda al centro de conmutación móvil.

Centro de conmutación móvil.- conocido por sus siglas en inglés como MSC, se encarga de coordinar todas las actividades de las estaciones base y permite la comunicación a la PSTN. Un MSC típico puede manejar 100.000 abonados y 5.000 conversaciones simultáneas. EL MSC interviene en el proceso de handover permitiendo que una llamada continúe cuando el usuario está en movimiento. Handover es una técnica de conmutación sofisticada que no alerta al usuario sobre el traspaso de estación base.

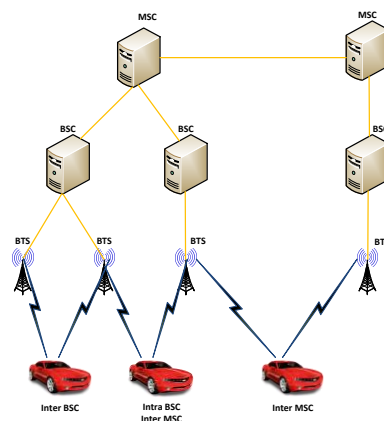


Gráfico 2.7 Handover sistema celular

Realizado por: Milton Ruiz

2.4.3.2 Interfaz de aire

La interfaz de aire se denomina en comunicaciones celulares como CAI (common air interface). Se especifican cuatro tipos de canales que son:

Canal de voz hacia adelante.- por sus siglas en ingles FVC (Forward Voice Channels), este canal permite la transmisión de voz desde la estación base hacia los dispositivos celulares son conocidos como canales de downlink.

Canal de voz hacia atrás.- por sus siglas en ingles RVC (Reverse Voice Channels), este canal permite la transmisión de voz desde los dispositivos celulares hacia la estación base son conocidos como canales de uplink.

Canal de control.- conocidos como FCC (Forward Control Channels) y RCC (Reverse Control Channels), permiten iniciar y establecer las llamadas. Los canales de control permiten monitorear continuamente en tráfico de todos los dispositivos en el sistema.

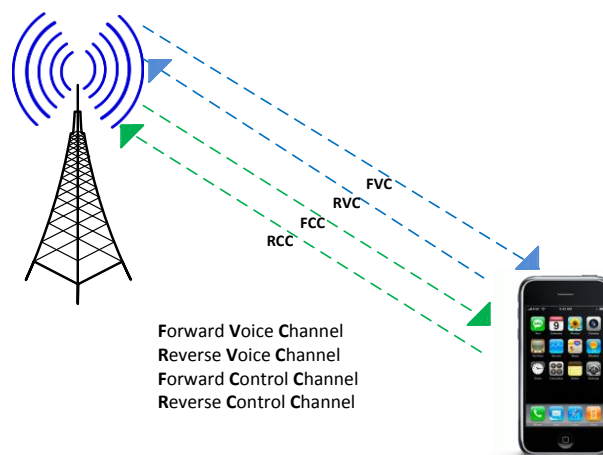


Gráfico 2.8 Canales de voz y control comunicaciones celulares

Realizado por: Milton Ruiz

2.4.3.3 Reutilización de frecuencias

La reutilización de frecuencias permite aumentar la capacidad del sistema celular utilizando de manera eficiente el espectro radioeléctrico licenciado.

La ecuación 2.1 permite calcular el número de canales duplex disponibles. Se debe tener en cuenta que al dividir los canales disponibles se forman grupos de canales únicos y disjuntos y cada grupo posee el mismo número de canales.

$$S = k \times N$$

Ecuación 2.1 Número de canales duplex disponibles

Donde:

S = total de canales duplex.

k = número de canales por grupo asignados a cada celda ($k < S$).

N = número de celdas entre las cuales se dividen los S canales.

La ecuación 2.2 permite calcular la capacidad del sistema celular tomando en cuenta que la capacidad es directamente proporcional al número de veces que un cluster se replica en un área de servicio fija.

$$C = M \times S$$

Ecuación 2.2 Capacidad del sistema

Donde:

C = capacidad del sistema.

M = número de veces que se replica un cluster.

El tamaño del cluster es denominado con la letra N y sus valores típicos son 4, 7 y 12. El valor del cluster es una función de cuanta interferencia una estación base o un móvil puede tolerar manteniendo calidad en las comunicaciones.

Para calcular el tamaño del cluster y el arreglo de las celdas se considera la geometría hexagonal, es decir cada celda tiene exactamente seis vecinos equidistantes y las líneas que unen los centros de cada celda están separadas sesenta grados.

La ecuación 2.3 permite encontrar el co-canal vecino más cercano de una celda en particular.

$$N = i^2 + ij + j^2$$

Ecuación 2.3 Vecino co-canal

Donde:

i = número entero positivo.

j = número entero positivo.

2.5 Comunicaciones ópticas

2.5.1 Comunicaciones por fibra óptica

Los sistemas de comunicación por fibra óptica permiten el transporte de información a través de largas distancias con altas velocidades para aplicaciones de alta demanda.

Los factores a tomar en cuenta para aplicaciones que utilizan redes de comunicación con fibra óptica son los siguientes:

Capacidad.- la fibra óptica posee alta capacidad gracias a la adición de canales con diferentes longitudes de onda. Los sistemas de comunicación actuales por medio de fibra óptica permiten tasas de datos superiores a 10 Gbps transmitiendo en una sola frecuencia o longitud de onda única, se pueden llegar a velocidades que superan los 40 Gbps, incluso hasta velocidades en el orden de los Tera bits por segundo, usando multiplexación por división de longitud de onda por sus siglas en ingles WDM. Los retardos en la transmisión de datos por fibra óptica son mínimos debido a la gran cantidad de canales dando como resultado grandes tasas de transmisión.

Atenuación.- para mitigar la pérdida de potencia que experimentan las señales transmitidas es necesaria en los sistemas de comunicación por fibra óptica la instalación de repetidores o regeneradores de señal cada 100-1000 km, logrando retransmitir señales demasiado distorsionadas o con poca potencia.

Interferencia Electromagnética.- por sus siglas en ingles EMI, la fibra óptica es inmune a la interferencia electromagnética y a la diafonía de las fibras ópticas vecinas. Enlaces de fibra óptica son instalados en lugares con alto grado de EMI como las redes de transmisión eléctrica de alto voltaje.

Seguridad.- los enlaces ópticos al no emitir radiación electromagnética presenta protección de los datos que se transmiten ya que impide el acceso físico no autorizado por cortes de señal por lo tanto la fibra óptica es el medio de comunicación para aplicaciones que requieren alto grado de seguridad.

Costo.- a pesar de las ventajas de comunicación por fibra óptica los costos del cable de fibra, instalación y de los transductores encarecen las redes ópticas.

2.5.2 Componentes de una red óptica

A continuación se describen los componentes básicos de una red óptica:

Transmisor.- es la fuente productora de luz, generalmente un diodo laser (LD) o un diodo emisor de luz (LED). Adicionalmente cuenta con circuitos electrónicos generadores de las señales a transmitir.

Canal óptico.- es el medio por la señal óptica recorre la trayectoria entre el transmisor y el receptor, el medio óptico es un dieléctrico comúnmente fabricado por SiO₂.

Receptor.- es el elemento más complejo del sistema de comunicaciones ópticas, consta de un detector optoelectrónico PIN o APD y circuitos de recuperación de señal como amplificadores, filtros, comparadores, etc.

Repetidores.- los repetidores reciben la señal degradada y la amplifican o regeneran, se pueden usar etapas electrónicas o etapas de amplificadores ópticos.

La gráfica 2.9 presenta las partes de un enlace activo simple de fibra óptica.

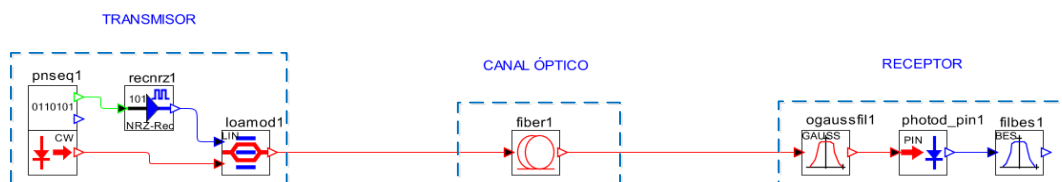


Gráfico 2.9 Componentes red óptica

Realizado por: Milton Ruiz

2.5.3 Propiedades de propagación de la luz

Las propiedades de propagación de la luz son analizadas por las leyes de la óptica geométrica. Un haz de luz que al transmitirse por dos medios con diferente índice de refracción y dependiendo del ángulo de incidencia presenta dos propiedades físicas denominadas como reflexión y refracción, a continuación se presenta un breve análisis.

Ley de reflexión.- es una modificación que se produce en la dirección de una onda. Dicho cambio tiene lugar en el espacio que separa dos medios, lo que hace que la onda vuelva a su medio original. La ley de reflexión se cumple cuando el ángulo de incidencia θ_1 es igual al ángulo reflejado θ_1' . La ecuación 2.4 describe la ley de reflexión de la luz.

$$\theta_1 = \theta_1'$$

Ecuación 2.4 Ley de reflexión de la luz.

Ley de refracción.- es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y atraviesa al segundo medio con un ángulo de θ_2 .

La ecuación 2.5 describe la relación de refracción e incidente mediante la ley de Snell.

$$n_1 \text{ sen}(\theta_1) = n_2 \text{ sen}(\theta_2)$$

Ecuación 2.5 Ley de Snell

Donde:

θ_1 = ángulo formado entre el rayo de luz incidente y la normal a la superficie.

θ_2 = ángulo entre el rayo de luz refractado y la normal a la superficie.

n_1 = índice de refracción del medio 1.

n_2 = índice de refracción del medio 2.

El gráfico 2.10 muestra el fenómeno físico de reflexión y refracción que experimenta un haz de luz.

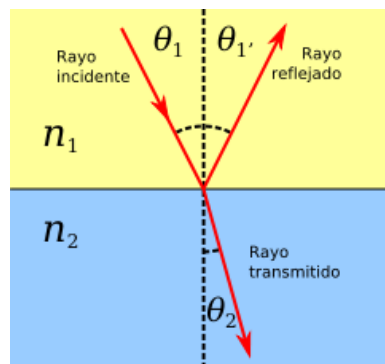


Gráfico 2.10 Reflexión y refracción.

(ITTAY, 2008)

2.5.4 Reflexión total interna

La reflexión total interna dentro de la fibra óptica se logra cuando los coeficientes de reflexión se tornan complejos, para lo cual es necesario que el ángulo de incidencia sea mayor al seno inverso de la razón de n_2/n_1 .

$$n_2^2 - n_1^2 \text{sen}^2(\theta_i) < 0$$

Ecuación 2.6 Coeficientes de reflexión

$$\theta_i > \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Ecuación 2.7 Ángulo crítico para reflexión total interna

El gráfico 2.11 muestra los efectos físicos que puede experimentar un haz de luz al llegar al límite entre un medio y otro, ambos medios deben tener diferente índice de refracción.

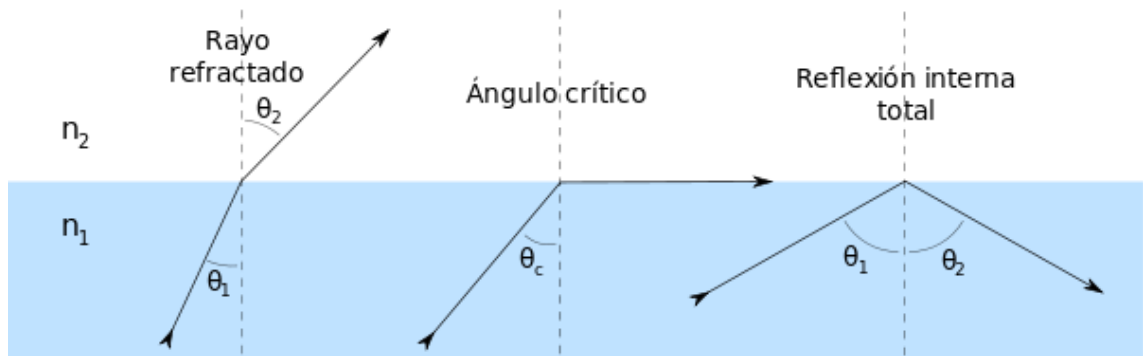


Gráfico 2.11 Ángulo crítico para reflexión total interna.

(Wikipedia, 2016)

Para lograr la reflexión total interna es necesario que el índice de refracción del núcleo siempre sea mayor que el índice de refracción del manto.

2.5.5 Componentes que afectan la transmisión por fibra óptica

Las señales ópticas presentan un fenómeno físico de degradación, la ecuación no lineal de Schrödinger describe los componentes que afectan la transmisión por fibra óptica.

$$\frac{\partial E(z, t)}{\partial z} = j \frac{B_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(z, t) + \frac{B_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} E(z, t) - \alpha E(z, t) - j\gamma |E(z, t)|^2 E(z, t)$$

Ecuación 2.8 Ecuación no lineal de Schrödinger

La ecuación no lineal de Schrödinger describe los fenómenos de dispersión, atenuación (pérdidas) y no linealidades (efecto Kerr).

2.5.5.1 Dispersión

Los fenómenos de dispersión se dan a medida que la señal se propaga por la fibra óptica. A continuación se detallan los tipos de dispersión.

Dispersión modal.- los distintos modos componentes de un haz de luz al propagarse dentro de una fibra óptica presentan distintas velocidades de grupo.

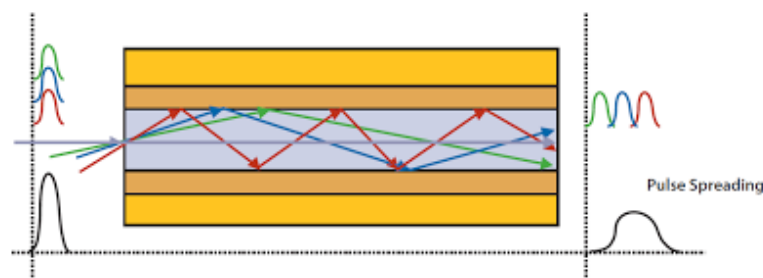


Gráfico 2.12 Dispersión modal.

(Abdelnaby, 2012b)

Dispersión cromática.- los componentes de un haz de luz presentan distintas frecuencias y viajan a diferente velocidad.

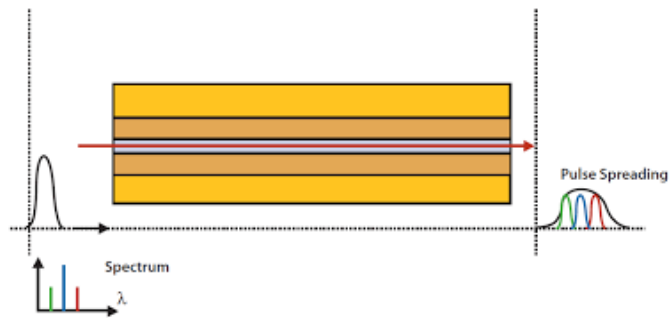


Gráfico 2.13 Dispersión cromática.

(Abdelnaby, 2012a)

Dispersión por modo de polarización.- también conocida como PMD y es el resultado de la diferencia de velocidades de grupo de los modos de polarización. Este efecto produce una combinación aleatoria de diferentes modos de polarización en la fibra óptica.



Gráfico 2.14 Dispersión por modo de polarización

(Abdelnaby, 2012c)

2.5.5.2 Atenuación

La atenuación depende del tipo de fibra y la longitud de onda en la cual se realiza la transmisión óptica. Los principales componentes que producen pérdidas en la transmisión por medio de fibra óptica son la absorción y la dispersión.

Absorción de luz.- la luz al pasar a través de la fibra óptica es absorbida y convertida en calor, debido a la resonancia molecular.

Dispersión de Rayleigh: la energía del haz de luz, bajo condiciones de alta potencia, al pasar a través de la fibra óptica es dispersada en todas las direcciones. La dispersión de luz frontal se la conoce como dispersión de Raman y la dispersión de luz hacia atrás se la conoce como dispersión Brillouin.

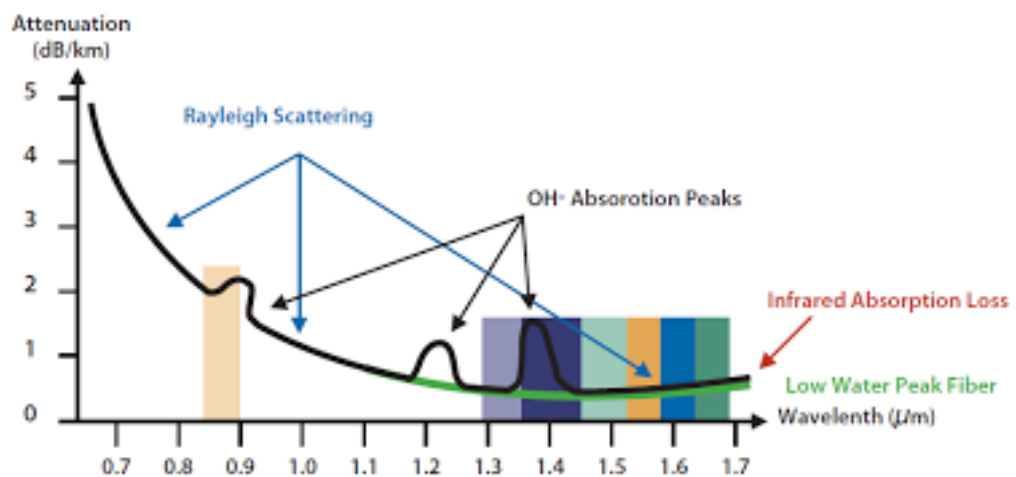


Gráfico 2.15 Atenuación de la fibra óptica en función de la longitud de onda.

(Abdelnaby, 2012d)

2.5.5.3 No linealidades

Las no linealidades se producen cuando las ondas que se transmiten a través de la fibra óptica interactúan unas con otras y con el material de la fibra óptica ocasionando la distorsión de las señales. El impacto de los efectos no lineales obedece al cuadrado de la intensidad óptica, es decir que los efectos no lineales se

intensifican con el aumento de la potencia de la señal y se tornan críticos con el aumento de la distancia que tiene que recorrer las ondas a través de la fibra óptica.

Las no linealidades de acuerdo a sus características se dividen en dos categorías.

Efectos Kerr.- las no linealidades dependen del índice de refracción de la fibra óptica y la potencia de transmisión.

Efectos Scattering.- las no linealidades se producen por la interacción de las ondas del haz de luz con las moléculas cristalinas vibratorias del SiO_2 también conocidas como fonones.

2.5.6 Fibra óptica

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica utilizada como medio de comunicación para la transmisión de datos en forma de señales luminosas. Las principales ventajas respecto a las comunicaciones eléctricas son la inmunidad electromagnética, muy baja atenuación en el orden de dB/km, muy alto ancho de banda en el orden de THz, eficiencia de costos a gran escala, diámetro pequeño y poco peso. Las principales desventajas presentadas son un coste inicial alto, la delicadeza de los conectores y cables, la instalación y manejo requiere de personal capacitado, elevado costo de los equipos y herramientas necesarios para la implementación.

La fibra óptica está constituida por un núcleo que puede ser de vidrio o plástico de alto índice de refracción sobre el que se monta una cubierta con menor índice de refracción y finalmente se coloca una chaqueta de protección.

Las fibras ópticas se clasifican en base a la forma en que los rayos de luz viajan a través de la misma. El tipo de fibra está relacionada directamente con el diámetro del núcleo. A continuación se presentan los tipos de fibras ópticas según los modos de propagación.

Fibra multimodo.- el diámetro del núcleo varía entre 50-100 μm , por lo general su valor es de 50 μm o 62,5 μm , el diámetro del manto es de 125 μm . Debido al gran diámetro del núcleo el haz de luz puede tomar varios caminos o modos. El número de modos puede ser superior a mil. Es utilizada para comunicar cortas distancias de hasta 2 km.

Fibras monomodo.- el diámetro del núcleo varía entre 5-10 μm , el diámetro del manto es de 125 μm . El núcleo por su tamaño solo permite la propagación de un rayo de luz es decir solo admite un modo de propagación dando como resultado la eliminación de la dispersión modal. Es posible conseguir velocidades en el orden de decenas de Gbps inclusive alcanzar velocidades de varios Tbps con el uso de DWDM.

2.5.6.1 Tipos de cables para fibra óptica

Los cables ópticos permiten agrupar hilos de fibra óptica con la finalidad de brindar robustez mecánica, seguridad, aislamiento a las condiciones de operación, aislamiento eléctrico. Dependiendo de las aplicaciones se tienen cables de distribución, cables tipo subgrupo, cables dúplex, cables tipo cinta, cables aéreos, cables blindados, cables ADSS, cables OPGW entre otros.

Cables OPGW.- son cables de guarda fabricado especialmente para sistemas de transmisión en alta tensión. Soportan corrientes de cortocircuito sin afectar a los hilos de fibra óptica instalados en su interior. Los hilos de fibra óptica se agrupan dentro de un tubo de protección [1] que posee un compuesto tixotrópico reduciendo la abrasión de las fibras y protegiéndolas de la humedad. La protección mecánica la otorga un tubo de aluminio extruído [2]. Cuenta con alambres de acero recubiertos de aluminio [3] conocidos como ACS. Posee alambres de aleación de aluminio [4] conocidos como AA.

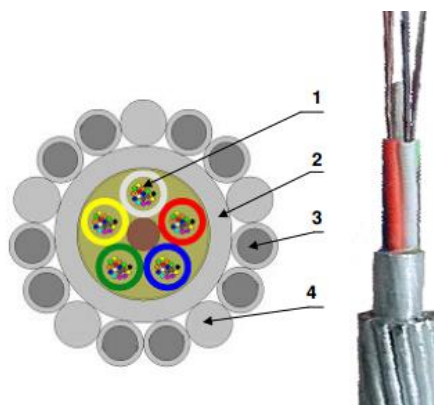


Gráfico 2.16 Cable OPGW

(Comteq, 2015)

Cables ADSS.- El núcleo óptico está compuesto por fibras ópticas [1] recubiertas por gel aislante que protege del agua y las bajas temperaturas. Las fibras ópticas se encuentran acomodadas dentro de un tubo de protección [2]. Posee un soporte central [3]. Protección seca que evita la propagación longitudinal del agua [4]. Cubierta interior de polietileno que protege al núcleo de penetración transversal del agua y compresión [5]. Refuerzo resistente a la tracción compuesto por fibras de aramida

[6]. Cubierta exterior de polietileno brinda protección ultravioleta, mecánica y soporta diferencias de potencial máximas de 25 kV [7].

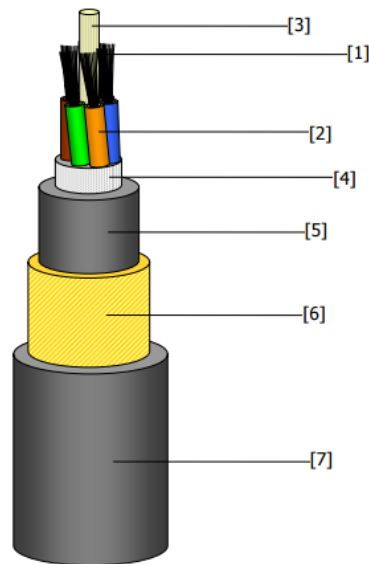


Gráfico 2.17 Cable ADSS

(PRYSMIAN, 2007)

2.5.7 Redes ópticas pasivas (*Passive Optical Networks*)

La red de fibra óptica pasiva por sus siglas en inglés PON permite eliminar todos los componentes activos existentes entre el terminal de línea óptica por sus siglas en inglés OLT y las unidades de redes ópticas por sus siglas en inglés ONU.

Las redes ópticas pasivas pueden ser acopladas directamente hasta el nodo del operador de telecomunicaciones que presta el servicio, conocida por sus siglas en inglés FTTN. Llegar hasta la cabina o armario de telecomunicaciones normalmente a menos de 300 metros del usuario, conocida por sus siglas en inglés FTTC. Llegar hasta la acometida del edificio, conocida por sus siglas en inglés FTTB. Llegar hasta

el hogar, conocida por sus siglas en ingles FTTH. La tecnología PON utiliza divisores ópticos permitiendo que una sola fibra óptica sirva a múltiples instalaciones compartiendo el ancho de banda disponible con todos los usuarios.

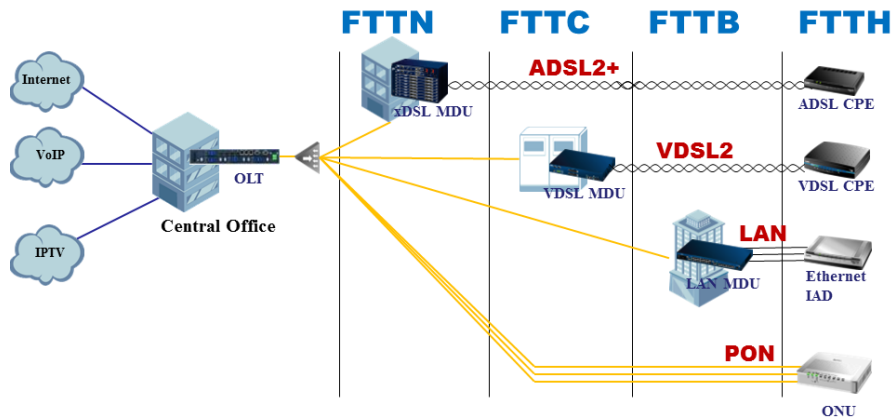


Gráfico 2.18 Redes PON con FTTx

(Moreton, 2011)

Las redes PON no requieren de circuitos electrónicos intermedios entre el head-end o HE y el dispositivo del abonado y por consecuencia la operación es más sencilla y económica comparada con otras arquitecturas que requieren láser de potencia. Como principal desventaja es la presencia de un solo punto de falla en la red, afectando a gran cantidad de usuarios. El ancho de banda es directamente proporcional al número de usuarios que se presta el servicio, mientras más usuarios se adhieren el ancho de banda disponible decrece.

La distancia típica entre el OLT y el splitter óptico es de 20km, el tráfico se divide a través de un splitter óptico y es entregado a los usuarios a través de la interfaz PON de última milla. La velocidad típica de descarga en redes PON de nueva generación

es de 10 Gbit/s. La velocidad de subida típica es de 2,25 Gbit/s. Las redes PON permiten acoplarse a otras redes alámbricas o inalámbricas.

Las redes PON pueden utilizar protocolos como TDM-PON, enviando datos en determinados intervalos de tiempo, multiplexando cada despliegue de bits desde la OLT hacia el splitter y posteriormente a cada ONU. WDM-PON y arquitecturas híbridas como WDM/TDM-PON optimizando el uso de la red óptica dando respuesta a nuevos requerimientos de servicios con mayores capacidades.

2.5.8 Multiplexación por división de longitud de onda

Multiplexación por división de longitud de onda por sus siglas en inglés WDM (Wavelength Division Multiplexing), es una tecnología que acopla múltiples fuentes emisoras de luz a diferentes longitudes de onda o frecuencia sobre la fibra óptica mono-modo. La capacidad de multiplexar las longitudes de onda es de importancia crítica para obtener gran ancho de banda para el transporte de datos. En un sistema WDM las señales ópticas de diferentes frecuencias se agrupan a las entradas de un multiplexor de longitud de onda conocido como MUX. A la salida del multiplexor todas las longitudes de onda se combinan y se acoplan en una sola fibra óptica mono-modo. Al final de la transmisión los canales ópticos se separan de nuevo por medio de un demultiplexor de longitud de onda conocido como DE-MUX y por lo tanto llegan a las diferentes salidas.

Las normas de WDM han sido establecidas por la unión internacional de telecomunicaciones ITU y selecciona como referencia a la línea de criptón en 193.10THz para la separación de canales vecinos entre dos líneas WDM.

ITU ha especificado seis bandas para la transmisión por fibra óptica:

- (banda original) 1260 a 1310 [nm]
- E (banda extendida) 1360 a 1460 [nm]
- S (banda corta) 1460 a 1530 [nm]
- C (banda convencional) 1530 a 1565 [nm]
- L (banda larga) 1565 a 1625 [nm]
- U (ultra banda) 1625 a 1675 [nm]

Dependiendo del número de longitudes de onda enviadas por una sola fibra, la técnica WDM puede clasificarse como Dense WDM (DWDM) y Coarse WDM (CWDM).

DWDM soporta mayores capacidades por canal y mayores distancias de transmisión. Los equipos son costosos debido a la precisión en la construcción, la separación entre las longitudes de onda deben ser muy precisas y estables brindando gran capacidad y escalabilidad. DWDM se clasifica para sistemas de ultra larga distancia con espaciamiento de frecuencias de 50-100 GHz (0,4 - 0,8 nm), sistemas metropolitanos con espaciamiento de frecuencias 100-200 GHz (0,8 - 1,6 nm). El número de longitudes de onda pueden llegar hasta 160 para sistemas de larga distancia o 40 para sistemas metropolitanos. Los sistemas de larga y ultra larga distancia soportan canales con velocidad de hasta 40 Gbps mientras que sistemas metropolitanos soportan hasta 10 Gbps. Los sistemas de ultra larga distancia pueden cubrir distancias de hasta 4.000 km sin regeneración electroóptica, sistemas de larga distancia hasta 800 km y sistemas metropolitanos hasta 300 km.

CWDM son equipos más baratos y sencillos en comparación con DWDM, no requieren de circuitos de refrigeración para corregir desviaciones de la longitud de onda, se utilizan láseres con un mayor ancho de banda espectral no estabilizados. El espaciamiento de frecuencias es de 2.500 GHz (20 nm) estandarizados por la ITU-T G.694.2. Puede trabajar en el rango de 1.270 nm a 1.610 nm soportando hasta 18 longitudes de onda sobre una única fibra óptica monomodo. La velocidad de transmisión de los canales tiene un límite de 2,5 Gbps. La distancia cubierta por sistemas CWDM puede llegar hasta 80 km. Se utilizan amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio o EDFA para transmitir a distancias superiores de 80 km. Para aplicaciones de redes eléctricas inteligentes CWDM es suficiente.(Millan, 2007)

2.5.9 SONET/SDH

SONET y SDH son tecnologías que definen un conjunto de estándares para la transmisión y el transporte de datos en redes ópticas. Nacen en los años 80's para subsanar las desventajas que presentaba el estándar PDH y normalizar las velocidades de transmisión superiores a 140Mbps.

Las señales digitales pueden estar sincronizadas bajo los modos síncrono, asíncrono, y plesiócrono.

En el modo síncrono, las transiciones de las señales digitales ocurren exactamente a la misma velocidad. Puede haber, sin embargo, una diferencia de fase entre las transiciones de las dos señales. Estas diferencias de fase pueden ser debido a retardos de tiempo de propagación o de fluctuación de fase introducidos en la red de

transmisión. En una red síncrona, todos los relojes son sincronizados a un reloj de estrato 1 conocido como Primary Reference Clock (PRC).

En el modo plesiócrono, las transiciones de las señales digitales se producen casi a la misma velocidad. Por ejemplo, si dos redes necesitan transmitir información, sus relojes se pueden derivar a partir de dos diferentes PRC. Aunque estos relojes son extremadamente precisos, hay una diferencia entre un reloj y el otro. Esto se conoce como una diferencia plesiócrona.

En el modo asíncrono, las transiciones de las señales no necesariamente se producen a la misma velocidad nominal. Asíncrono, en este caso, significa que la diferencia entre dos relojes es mucho mayor que la diferencia plesiócrona. Por ejemplo, si dos relojes se derivan de osciladores de cuarzo de funcionamiento libre podrían ser descritos como asíncronos.

La red óptica síncrona por sus siglas en inglés SONET es un estándar para el transporte de telecomunicaciones ópticas formulada por las normas ANSI.

SONET transporta varias señales a través de una jerarquía óptica sincrónica por medio de un esquema de multiplexado en el dominio del tiempo por sus siglas en inglés TDM. Al ser un estándar de red, proporciona un conjunto de especificaciones para determinar formatos de trama, tasas de bits y condiciones ópticas con el fin de garantizar la interoperabilidad de múltiples proveedores. También ofrece programas de restauración rápida, lo que significa que en el caso de un corte de fibra o algún otro fallo en la red que tiene la capacidad de restaurar el servicio.

Las redes SONET pueden combinar la tecnología de multiplexación por división de longitud para ampliar la capacidad del ancho de banda en la transmisión proporcionando redes ópticas más eficientes en comparación con TDM.

SONET especifica una tecnología para transportar diferentes señales por medio de un esquema de multiplexado por interpolación de bytes. La interpolación de bytes simplifica la multiplexación y ofrece una administración de la red extremo a extremo.

En SONET la señal básica se denomina señal de nivel 1 o también STS-1 (Synchronous Transport Signal level 1). Está formada por un conjunto de 810 bytes distribuidos en 9 filas de 90 bytes. Este conjunto es transmitido cada 125 microsegundos, correspondientes a la velocidad del canal telefónico básico de 64 kbit/s, por lo que la velocidad binaria de la señal STS-1 es 51,84 Mbit/s. El primer paso en el proceso de multiplexado SONET implica la generación de la señal de nivel 0 de la base más bajo. Una señal STS-N se compone de N señales STS-1 byte-intercaladas.

SDH está basado en la superposición de una señal multiplexada síncrona sobre un haz de luz y transmitido mediante un cable de fibra óptica. Es necesario la sincronización bajo un reloj común para multiplexar señales.

La jerarquía digital síncrona está basada en las recomendaciones de la ITU-T G.707, velocidad de bits SDH, G708, interfaz de nodos en la red para SDH y G.709, estructura de multiplexación sincrónica.

La trama en SDH se denomina Módulo de Transporte Síncrono por sus siglas en inglés STM-1, cuya velocidad de transmisión es de 155,52 Mbps, con un tiempo de

duración de 125 micro segundos. Si bien un SDH STM-1 tiene la misma velocidad de bits que SONET STS-3, las señales contienen estructuras de tramas diferentes. La tabla 2.2 muestra la comparación entre SDH y SONET.

SONET Signal	Bit Rate	SDH Signal	SONET Capacity	SDH Capacity
STS-1, OC-1	51.840 Mb/s	STM-0	28 DS1s or 1 DS3	21 E1s
STS-3, OC-3	155.520 Mb/s	STM-1	84 DS1s or 3 DS3s	63 E1s or 1 E4
STS-12, OC-12	622.080 Mb/s	STM-4	336 DS1s or 12 DS3s	252 E1s or 4 E4s
STS-48, OC-48	2488.320 Mb/s	STM-16	1344 DS1s or 48 DS3s	1008 E1s or 16 E4s
STS-192, OC-192	9953.280 Mb/s	STM-64	5376 DS1s or 192 DS3s	4032 E1s or 64 E4s
STS-768, OC-768	39813.12 Mb/s	STM-256	21504 DS1s or 768 DS3s	16128 E1s or 256 E4s

Tabla 2.2 Jerarquía SONET/SDH

(Tektronix, 2001)

Donde:

STM = Synchronous Transport Module (UIT-T)

STS = Synchronous Transfer Signal (ANSI)

OC = Optical Carrier (ANSI)

3 DIMENSIONAMIENTO DE RED

3.1 Situación Actual de la medición inteligente en Ecuador

En la actualidad el flujo de energía eléctrica en Ecuador es unidireccional desde las centrales de generación hasta el consumidor. El suministro de electricidad es considerado un servicio público, que presenta características específicas como las que se muestran a continuación:

- La energía eléctrica no es almacenable en grandes cantidades.
- La energía eléctrica debe producirse y transportarse en el mismo instante en que es consumida.
- Debe existir un equilibrio permanente entre la generación y la demanda en todo momento.
- No es posible elegir el recorrido de la energía ya que es transportada generalmente a través de redes malladas.

A nivel mundial la industria eléctrica se encuentra en constante evolución por esta razón se ha añadido a la arquitectura eléctrica convencional tecnología informática y de telecomunicaciones formando redes eléctricas inteligentes, las mismas que son representadas en tres capas.

- La primera capa es denominada como física y está constituida por los sistemas de producción, transporte, distribución y centros de consumo.

- La segunda capa es denominada de transporte y control de información, la cual consta de sistemas de comunicación y control.
- Finalmente la tercera capa denominada como aplicación y está formada por servicios y aplicaciones.

La constitución de redes eléctricas inteligentes permite proveer de confiabilidad, eficiencia, seguridad y calidad de energía en todas las áreas del sistema eléctrico minimizando el impacto ambiental gracias al uso de tecnologías de comunicación bidireccional que permite el transporte de información en tiempo real entre los consumidores y la red eléctrica permitiendo tomar acciones encaminadas a racionalizar el consumo de energía eléctrica con el uso de sistemas de gestión de la demanda por sus siglas en inglés DMS trasladando al usuario el costo económico y medioambiental de cubrir su consumo.

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) y las empresas eléctricas distribuidoras, suscriben en el año 2009 el “CONVENIO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL PARA EL FORTALECIMIENTO DEL SECTOR DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA”. El convenio presenta como principal objetivo incrementar la eficiencia y eficacia de las empresas eléctricas a través de la creación de procesos, procedimientos, estructuras, sistemas y tecnología con un modelo común de información (CIM). Amparado en el convenio se da inicio a la ejecución del proyecto: “Sistema Integrado para la Gestión de la Distribución Eléctrica” (SIGDE). El mismo que contribuye al cumplimiento de los objetivos propuestos.

En el año 2013 se crea el Mapa de Ruta del Programa de Redes Inteligentes de Ecuador-REDIE. El mismo que constituye el marco único de referencia para la gestión y ejecución de proyectos de generación, transmisión, distribución eléctrica en el país.

El gráfico 3.1 muestra las redes de telecomunicaciones usadas para medición eléctrica inteligente tomando en cuenta los componentes y las funciones que realizan.

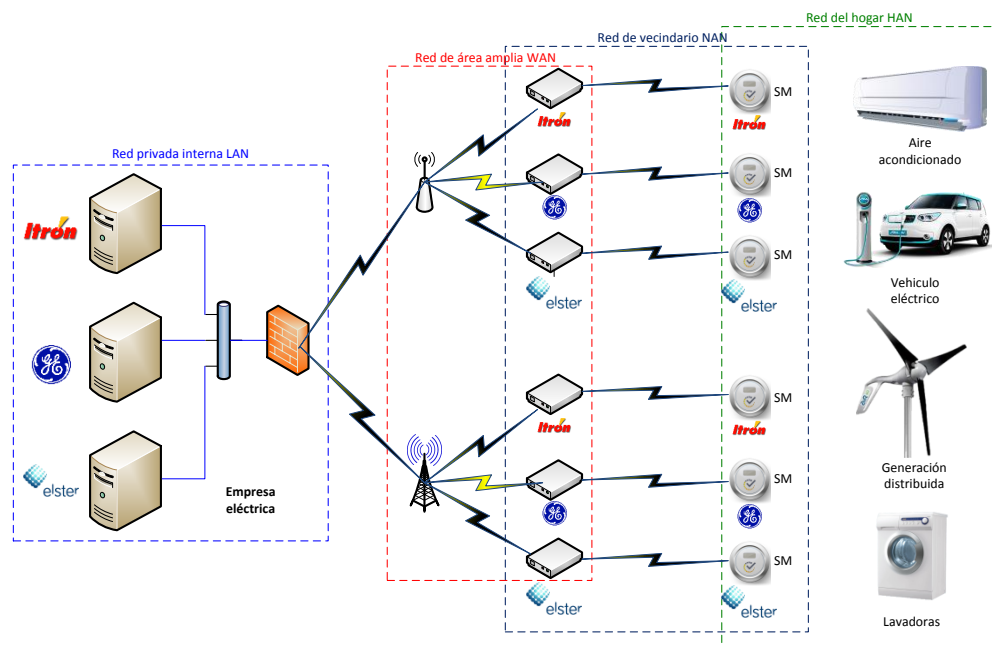


Gráfico 3.1 Topología de red para medición inteligente

(MEER, 2014)

La primera incursión de medición inteligente en Ecuador se ejecuta en la ciudad de Guayaquil en el año 2011 con la instalación de 32.000 medidores inteligentes a los abonados de la Empresa Eléctrica de Guayaquil. El funcionamiento de AMR contó con problemas de interoperabilidad debido a los protocolos propietarios de los tres tipos de marcas instaladas. Los problemas se solventaron en el año 2013.

Las marcas de los medidores adquiridos por la empresa eléctrica de Guayaquil son Itrón, General Electric y Elster. La comunicación es vía radio frecuencia, la distancia máxima que puede transmitir un medidor es de 12 metros por lo que es necesario de repetidores y concentradores. El principal inconveniente es la propiedad que presenta cada fabricante para enviar, recibir, almacenar y gestionar los datos de los medidores ya que cada fabricante maneja su propio identificador de radio o RFID. La comunicación de la red de vecindario NAN es a través de radio frecuencia, la comunicación WAN se realiza utilizando los sistemas de telefonía celular ya implementados o instalando comunicación WiMAX para transmitir los datos hacia la red privada de la empresa eléctrica.

3.2 Selección de tecnología inalámbrica

Para la selección de la tecnología inalámbrica se debe tomar en cuenta que las comunicaciones deben ser fiables, rentables con gran cobertura y capacidad. Por estas razones las redes inteligentes están diseñadas en base a redes híbridas tanto en medios de comunicación como en tecnologías.

La selección de redes privadas con infraestructura dedicada para AMI implica grandes costos y son difíciles de financiar, implementar, mantener y ejecutar. Mientras que la selección de redes públicas requiere menor inversión de capital en comparación con una red dedicada, dando como resultado un menor impacto económico. Se debe tomar en cuenta que en la red privada, el proveedor de servicios es responsable de garantizar el rendimiento, la seguridad y la actualización de la

infraestructura. Por otra parte, la participación de múltiples proveedores públicos y privados puede mejorar la tolerancia a fallos o extender la cobertura.

La tabla 3.1 presenta los requerimientos mínimos que deben cumplir las tecnologías de comunicación para medición inteligente tomando en cuenta que debe ser capaz de gestionar la información de cientos de miles de medidores inteligentes.

Requerimiento	Rango
Ancho de Banda	10-100 kbps/nodo
Latencia	2-15 seg
Confiabilidad	99-99.99%
Seguridad	Alta
Respaldo de Energía	No es necesario

Tabla 3.1 Requisitos para medición inteligente

(Reid & Stevens, 2012: 130)

En base a los requisitos para la medición inteligente se analizan las ventajas y desventajas de las tecnologías inalámbricas ZigBee, Celular y WiMAX que se presenta en la tabla 3.2.

Tecnología	Ventajas	Limitaciones
ZigBee	<p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Equipo más económico.</p> <p>Gran movilidad.</p> <p>Bajo costo de implementación</p> <p>Utiliza el espectro sin licencia.</p> <p>Bajo requerimiento de ancho de banda.</p>	<p>Rango de cobertura corto.</p> <p>Baja tasa de datos.</p> <p>No escala a redes de gran tamaño.</p> <p>Capacidades bajas de procesamiento.</p> <p>Sujeto a la interferencia con otros aparatos</p>
Redes celulares	<p>Infraestructura ya instalada.</p> <p>Gran rango de cobertura.</p> <p>Alta flexibilidad.</p> <p>Soportar millones de dispositivos.</p> <p>El uso de espectro con licencia reduce la interferencia.</p> <p>Fuertes controles de seguridad.</p> <p>Menores costes de mantenimiento.</p>	<p>Costosa tarifa de espectro.</p> <p>Servicios de redes celulares son compartidos por mercado de clientes y esto puede dar lugar a congestión de la red o la disminución de rendimiento de la red.</p>
WiMAX	<p>Miles de usuarios simultáneos.</p> <p>Largas distancias de cobertura.</p> <p>Control orientado a la conexión.</p> <p>Sofisticados mecanismos de QoS.</p>	<p>No es común.</p> <p>Compleja gestión de la red.</p> <p>Costos elevados de los equipos.</p> <p>Uso del espectro con licencia.</p>

Tabla 3.2 Comparación de tecnologías inalámbricas

Realizado por: Milton Ruiz

Una vez analizadas las ventajas y desventajas de las tecnologías inalámbricas, se ha seleccionado las redes celulares como la mejor opción para la comunicación entre los

medidores inteligentes y los nodos lejanos debido a que la infraestructura de comunicación celular ya se encuentra instalada reduciendo gastos relacionados con el mantenimiento y operación de la red de telecomunicaciones otorgando beneficios como capacidad, cobertura y baja interferencia.

Fabricantes de medidores eléctricos inteligentes como Itron y Echelon han incorporado en sus medidores módulos de radio frecuencia con tecnología celular GSM y GPRS permitiendo la comunicación entre los contadores inteligentes y la red de vecindario.

3.3 Definición del Área de cobertura

Una vez definida la tecnología inalámbrica en la que se desarrollará el diseño se especifica el área de cobertura de acuerdo a la infraestructura actualmente instalada y que se encuentra en funcionamiento. A continuación se describe la cobertura de las redes celulares por proveedor y el anillo de fibra óptica desplegado en el territorio nacional destinado para la comunicación entre las centrales, subestaciones y centros de control.

3.3.1 NAN

Para la comunicación en la red de vecindario (NAN) se ha seleccionado la red celular ya que ofrece la mayor cobertura inalámbrica de acceso público a nivel nacional prestando servicios en el país desde 1993. La red celular conocida como Sistema Móvil Avanzado (SMA) brinda cobertura en las 24 provincias del Ecuador, las

señales deben cumplir con los mínimos niveles establecidos en la Resolución No. TEL-042-01-CONATEL-2014. Las tecnologías desplegadas en el territorio nacional que se encuentran en funcionamiento son UMTS, GSM, LTE.

GSM con toda su cadena de evolución GSM/GPRS/EDGE es el servicio de telecomunicaciones que mayor expansión ha experimentado en el Ecuador. UMTS desde el 2008 se encuentra en una fase de estabilidad de crecimiento en su red. Mientras que, desde febrero del 2014, la tecnología LTE hizo su ingreso en el Ecuador.

La tabla 3.3 presenta el número de radio bases por provincia y tecnología implementadas a nivel nacional por las operadora CNT E.P, OTECEL S.A y CONECEL S.A.

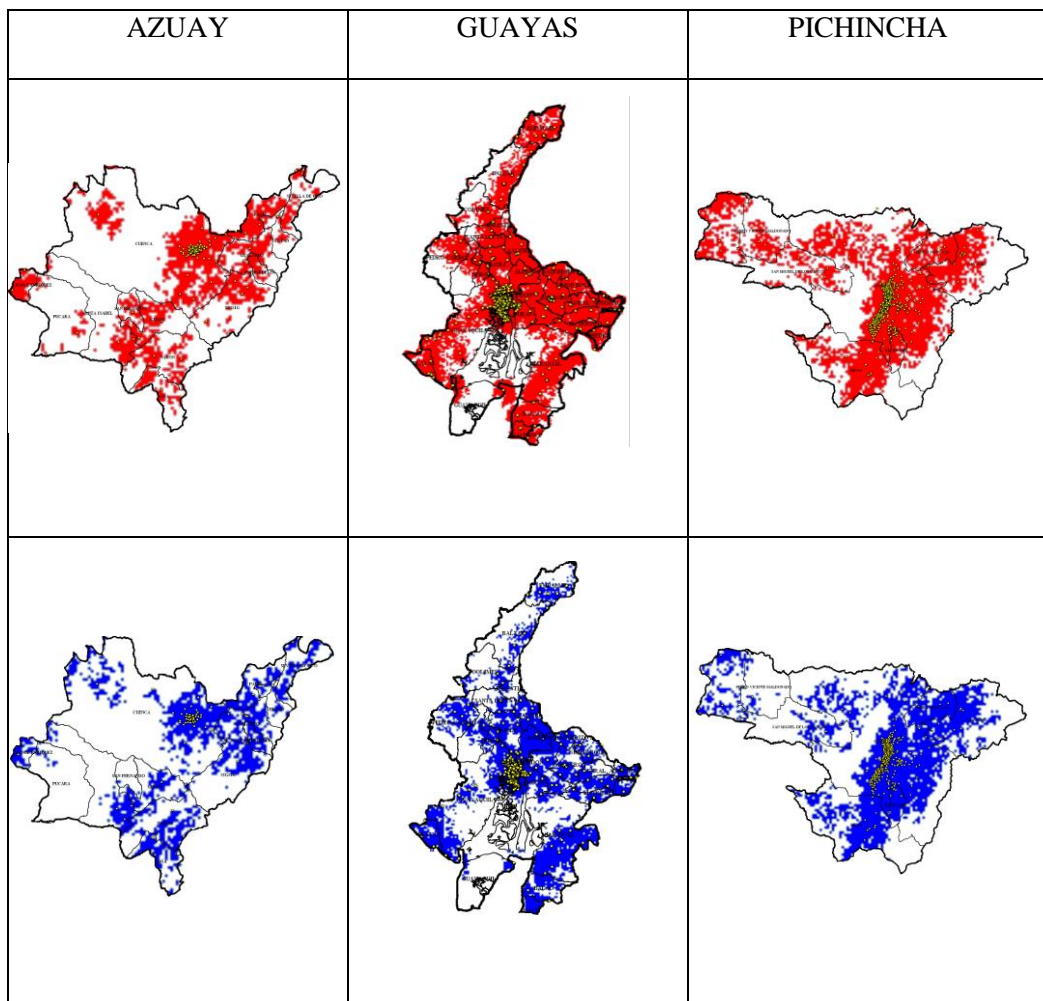
Radio bases	CNT E.P			MOVISTAR					CLARO			
	UMTS	LTE AWS	LTE 700	GSM 850	GSM 1900	UMTS 850	UMTS 1900	LTE 190 0	GSM 850	GSM 1900	UMTS 850	UMTS 1900
Azuay	43	6	0	88	50	79	27	0	83	40	51	0
Bolívar	9	0	0	12	1	8	0	0	21	9	9	0
Cañar	8	0	0	26	7	21	2	0	19	4	11	0
Carchi	13	0	0	17	0	10	0	0	26	12	10	0
Chimborazo	41	0	0	47	19	38	0	0	51	23	24	0
Cotopaxi	36	0	3	44	23	29	12	0	36	10	19	0
El Oro	32	0	2	48	13	32	7	0	81	56	51	0

Esmeraldas	36	0	0	37	1	29	11	0	74	49	41	6
Galápagos	6	0	0	6	5	0	0	0	9	5	3	3
Guayas	241	55	0	256	31	261	129	0	606	477	587	161
Imbabura	45	0	0	22	5	27	3	0	51	36	42	3
Loja	25	0	0	29	5	26	8	0	67	35	35	0
Los Ríos	25	0	0	41	0	33	3	0	100	58	61	0
Manabí	81	0	1	113	12	99	43	0	189	123	141	5
Morona S.	5	0	0	13	0	4	1	0	14	4	4	0
Napo	12	0	0	19	2	12	4	0	17	3	6	0
Orellana	11	0	0	24	0	11	3	0	25	13	19	1
Pastaza	7	0	0	14	5	8	1	0	9	2	4	0
Pichincha	379	58	0	414	368	511	44	84	486	313	496	239
Santa E.	29	0	0	21	1	24	18	0	54	37	54	16
Santo D.	36	0	0	32	5	18	0	0	69	52	49	1
Sucumbíos	23	0	0	17	0	13	0	0	31	18	20	1
Tungurahua	61	0	0	60	35	56	25	0	50	27	37	1
Zamora Ch	10	0	0	10	0	3	0	0	13	3	3	0
Total	1214	119	6	1410	588	1352	341	84	2181	1409	1777	437

Tabla 3.3 Cantidad de radio bases CNT E.P a julio 2015

(Arcotel, 2015)

El gráfico 3.2 presenta una comparación de cobertura por las tres operadoras del país Claro, Movistar y CNT respectivamente. Se debe tomar en cuenta que las gráficas corresponden a coberturas teóricas realizadas en base a parámetros de altura y ganancia de las antenas, así como también de la potencia del equipo, no se consideran otros parámetros como tilts mecánicos, tilts eléctricos, entre otros.



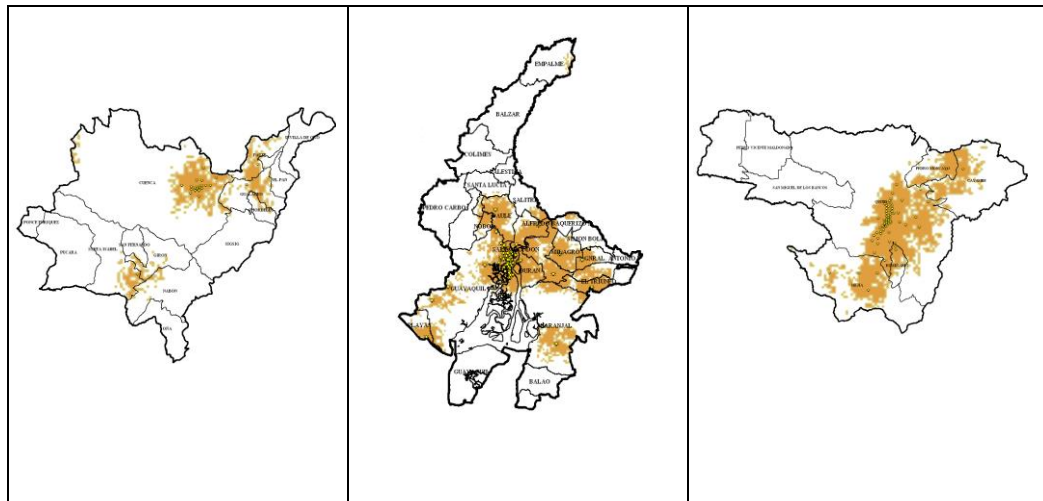


Gráfico 3.2 Cobertura celular por operadora

(Arcotel, 2015)

3.3.2 WAN

La corporación eléctrica del Ecuador por sus siglas CELEC EP-TRANSELECTRIC cuenta con una infraestructura de backbone desplegada sobre las torres de transmisión de la red de transporte de alta tensión. La infraestructura de backbone se encuentra integrada por nodos distribuidos a nivel nacional comunicados por fibra óptica tipo G652, G.652b y G.655. El cable implementado es ADSS y el cable de guarda es de tipo OPWG. La disponibilidad ofrecida es del 99.8%.

El gráfico 3.3 presenta el despliegue nacional de la red de fibra óptica instalada por la corporación eléctrica del Ecuador.



Gráfico 3.3 Red nacional de fibra óptica CELEC E.P

(Celec-EP, 2012)

El gráfico 3.4 presenta el despliegue de la red de fibra óptica a nivel nacional con sus respectivos nodos, distancias y los tipos de fibras ópticas implementadas.

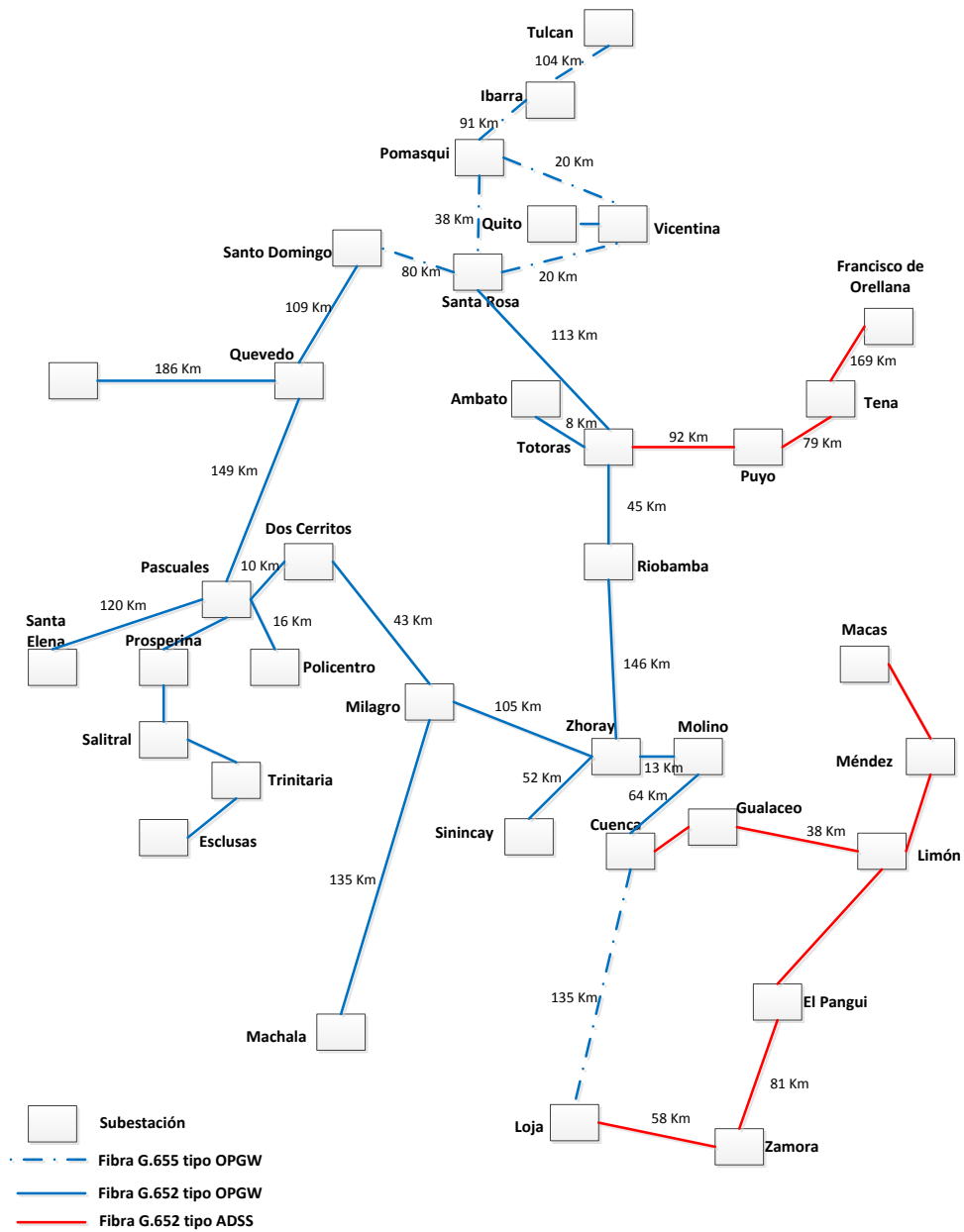


Gráfico 3.4 Red backbone CELEC EP-TRANSELECTRIC

(Celec-EP, 2012)

El portafolio de servicios de telecomunicaciones ofrece capacidades para clientes transportadores de E1/DS3/STM1/STM4/STM16/STM64. Para clientes del sector eléctrico para transporte de señales de voz y datos con capacidades de $n \times 64$ kbps.

3.4 Cálculos

3.4.1 Cálculo y dimensionamiento de los enlaces inalámbricos

Para los cálculos de tráfico se ha tomado en cuenta la tecnología celular GSM instalada por la operadora CONECEL.SA, debido a que es la operadora con mayor infraestructura celular desplegada a nivel nacional.

La tabla 3.4 muestra las principales características de la tecnología GSM.

Descripción	GSM
Método de acceso	TDM/TDMA
Canales full-duplex	125
Modulación	GMSK
Usuarios por canal	8
Tasa de bits por ranura	22,8 kbps
Tasa de bits total	270,8 kbps

Tabla 3.4 Características GSM evolución a GPRS

(Stallings, 2002: 286)

Para calcular el tráfico generado por la medición inteligente es necesario tomar en cuenta el número de abonados registrados al servicio eléctrico a nivel nacional. Los abonados al servicio eléctrico a nivel nacional son 3'359.400. Se debe tomar en cuenta que el tiempo máximo entre mediciones es de 15 minutos por cada medidor y

los datos generados pueden ser transmitidos en mensajes cortos de texto o llamada celular.

Al utilizar SMS en el envío de información entre el MDMS y los medidores es necesario conocer que todos los mensajes cortos de texto ingresan a la infraestructura celular y son procesados por el centro de servicios de mensajes cortos por sus siglas en ingles SMSC, el mismo que se encarga de almacenar y transmitir los mensajes hasta los destinatarios. A los SMS se debe incluir una carga o payload con información de la fecha de envío, la validez del mensaje, el SMSC que origino el mensaje y el número de identificación del remitente y destinatario. Al ser mensajes cortos de texto no es necesario la asignación de canales de radio por lo que se los puede enviar en los canales de señalización incluso se pueden enviar y recibir mientras existe una llamada en curso.

El servicio de mensajes cortos por sus siglas en ingles SMS permite el envío de máximo 160 caracteres por mensaje, cada carácter es codificado a 7 bits. Adicional a cada mensaje se añaden bits con información de parámetros como fecha de envío, validez del mensaje, número de teléfono del remitente y destinatario por ejemplo:

```
+CMT: "+59398#####",",", "15/01/23,15:26:13-20"
```

La tabla 3.5 describe el número de caracteres por lectura que es enviado desde el medidor al centro de gestión de la demanda tomando en cuenta los bits de delimitador y de medida.

Descripción	Caracteres delimitador	Caracteres medida	Total caracteres
Voltaje rms	4	5	9
Corriente rms	4	5	9
Potencia activa	4	8	12
Potencia reactiva	4	8	12
Potencia aparente	4	8	12
Energía activa	4	10	14
Energía reactiva	4	10	14
Energía aparente	4	10	14
Frecuencia	4	4	8
Factor de potencia	4	3	7
Información	4	21	25
Alertas	4	20	24
Total	48	112	160

Tabla 3.5 Caracteres up-stream medición inteligentes

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.6 muestra el número de caracteres enviado desde el control a los medidores.

Descripción	Caracteres delimitador	Caracteres medida	Total caracteres
Corte	4	5	9
Reconexión	4	5	9
Prepago	4	9	13
Consultas	4	9	13
Total	16	28	44

Tabla 3.6 Caracteres down-stream medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.7 muestra el número de lecturas por provincia generados anualmente.

Provincia	Lecturas 15 minutos	Lecturas 5 minutos	Lecturas 1 minuto
Azuay	661.952	1'985.856	9'929.280
Bolívar	170.704	5'12.112	2'560.560
Cañar	209.320	627.960	3'139.800
Carchi	152.932	458.796	2'293.980
Chimborazo	426.272	1'278.816	6'394.080
Cotopaxi	380.376	1'141.128	5'705.640
El Oro	558.340	1'675.020	8'375.100
Esmeraldas	456.564	1'369.692	6'848.460

Galápagos	23.352	70.056	350.280
Guayas	3'388.640	1'0165.920	50'829.600
Imbabura	370.184	1'110.552	5'552.760
Loja	421.980	1'265.940	6'329.700
Los Ríos	723.292	2'169.876	10'849.380
Manabí	1'273.272	3'819.816	19'099.080
Morona Santiago	137.516	412.548	2'062.740
Napo	96.392	289.176	1'445.880
Orellana	126.788	380.364	1'901.820
Pastaza	78.020	234.060	1'170.300
Pichincha	2'394.772	7'184.316	35'921.580
Santa Elena	286.944	860.832	4'304.160
Santo Domingo	381.984	1'145.952	5'729.760
Sucumbíos	164.040	492.120	2'460.600
Tungurahua	469.032	1'407.096	7'035.480
Zamora Chinchipe	84.940	254.820	1'274.100
Total	13'437.608	40'312.824	201'564.120

Tabla 3.7 Lectura anual por provincia

Realizado por: Milton Ruiz

La cantidad de información anual que envía un medidor inteligente es de 39´244.800 bits con un total de 35.040 lecturas. Si restamos los caracteres delimitadores de cada palabra tenemos que la información útil es de 27´471.360 bits.

Para realizar el análisis del tráfico que inserta la medición inteligente es necesario tomar en cuenta las características de GSM y el número de lecturas por hora.

La tabla 3.8 muestra el resultado de los cálculos de tráfico por medidor a nivel nacional.

Descripción	Cálculo	Total	Unidad
Caracteres de lectura		160	Caracteres
Codificación GSM 3.38		7	bits/caracter
Total bits cada 15 min	$\text{caracter} \cdot \text{bits/caracter}$ $= 160 \cdot 7$	1.120	bits
Tasa GSM por canal		22.800	bits/s
Intensidad		4	SMS/hora
Tiempo de uso del canal	bits/tasa GSM $= 1.120/22.800$	0,0491	segundos
Tráfico por medidor	$(\text{SMS/hora}) \cdot \text{tiempo uso canal} =$ $4 \cdot 0,0491$	0,196	Erlang/seg
Abonados		3359400	
Tráfico total	$\text{Tráfico medidor} \cdot \text{abonados}$ $= (0,196 \cdot 3359400) / 60$	11.002	Erlang/min

Tabla 3.8 Cálculo tráfico up-stream

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.9 describe el cálculo de tráfico generado en el down-stream.

Descripción	Cálculo	Valor	Unidad
Medición		44	Caracteres
bits codificación		7	bits/caracter
Total bits cada 15 min	$\text{caracter} * \text{bits/caracter}$ $= 44 * 7$	308	bits
Tasa GSM por canal		22.800	Bits/s
Intensidad SMS/hora		1	SMS/hora
Tiempo medio	Bits/tasa GSM $= 308/22.800$	0,0135	segundos
Trafico por medidor	$(\text{SMS/hora}) * \text{tiempo uso canal}$ $= 1 * 0,0135$	0,0135	Erlang/seg
Abonados		3359400	
Tráfico total	$\text{Tráfico medidor} * \text{abonados}$ $= (0,0135 * 3359400) / 60$	756	Erlang/min

Tabla 3.9 Cálculo tráfico down-stream

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.10 presenta el tráfico por provincia generado por medición avanzada.

Provincia	Número de medidores	Tráfico por medidor [E/min]	Tráfico por provincia [E/min]
Azuay	165.488	0,00327	542
Bolívar	42.676	0,00327	140
Cañar	52.330	0,00327	171
Carchi	38.233	0,00327	125
Chimborazo	106.568	0,00327	349
Cotopaxi	95.094	0,00327	311
El Oro	139.585	0,00327	457
Esmeraldas	114.141	0,00327	374
Galápagos	5.838	0,00327	19
Guayas	847.160	0,00327	2.774
Imbabura	92.546	0,00327	303
Loja	105.495	0,00327	345
Los Ríos	180.823	0,00327	592
Manabí	318.318	0,00327	1.042
Morona Santiago	34.379	0,00327	113
Napo	24.098	0,00327	79
Orellana	31.697	0,00327	104
Pastaza	19.505	0,00327	64

Pichincha	598.693	0,00327	1.961
Santa Elena	71.736	0,00327	235
Santo Domingo	95.496	0,00327	313
Sucumbíos	41.010	0,00327	134
Tungurahua	117.258	0,00327	384
Zamora Chinchipe	21.235	0,00327	70
Total	3'359.400		11.002

Tabla 3.10 Cálculo de tráfico por provincia

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.11 presenta la capacidad estimada con tecnología GSM desplegada por CONECEL.SA. Al reutilizar las frecuencias como método para generar mayor capacidad de usuarios tomando en cuenta que GSM cuenta con 125 canales full dúplex y tamaño de clúster 7, se procede a calcular la capacidad del sistema GSM.

Provincia	Radio base	N	k	C
Azuay	123	7	125	17.571
Bolívar	30	7	125	4.286
Cañar	23	7	125	3.286
Carchi	38	7	125	5.429
Chimborazo	74	7	125	10.571

Cotopaxi	46	7	125	6.571
El Oro	137	7	125	19.571
Esmeraldas	123	7	125	17.571
Galápagos	14	7	125	2.000
Guayas	1.083	7	125	154.714
Imbabura	87	7	125	12.429
Loja	102	7	125	14.571
Los Ríos	158	7	125	22.571
Manabí	312	7	125	44.571
Morona Santiago	18	7	125	2.571
Napo	20	7	125	2.857
Orellana	38	7	125	5.429
Pastaza	11	7	125	1.571
Pichincha	799	7	125	114.143
Santa Elena	91	7	125	13.000
Santo Domingo	121	7	125	17.286
Sucumbíos	49	7	125	7.000
Tungurahua	77	7	125	11.000
Zamora Chinchipe	16	7	125	2.286
Total	3.590			512.857

Tabla 3.11 Cálculo de capacidad GSM CONECEL.SA

La capacidad del sistema GSM desplegado por CONECEL.SA es de 512.857 canales, los mismos que son utilizados para señalización y datos.

La tabla 3.12 presenta el cálculo del número de canales necesarios para ofrecer el 99% y 99.9% grado de servicio establecido como requerimiento para medición inteligente.

Provincia	Erlang/min	Canales necesarios 99%	Canales necesarios 99,9%
Azuay	542	582	621
Bolívar	140	159	173
Cañar	171	191	206
Carchi	125	144	156
Chimborazo	349	384	412
Cotopaxi	311	341	366
El Oro	457	502	537
Esmeraldas	374	411	440
Galápagos	19	29	34
Guayas	2.774	2.981	3.172
Imbabura	303	336	361
Loja	345	379	406
Los Ríos	592	641	685

Manabí	1.042	1.123	1.197
Morona Santiago	113	131	143
Napo	79	95	105
Orellana	104	122	133
Pastaza	64	79	88
Pichincha	1.961	2.108	2.245
Santa Elena	235	261	281
Santo Domingo	313	347	372
Sucumbíos	134	153	166
Tungurahua	384	422	452
Zamora Chinchipe	70	85	95
Total	11.002	12.006	12.845

Tabla 3.12 Cálculo de canales dependiendo del grado de servicio

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.13 presenta el porcentaje de utilización de los canales respecto al total de la infraestructura implementada:

Provincia	% utilización con GoS 99	% utilización con GoS 99.9
Azuay	3,3	3,5
Bolívar	3,7	4,0
Cañar	5,8	6,3
Carchi	2,7	2,9
Chimborazo	3,6	3,9
Cotopaxi	5,2	5,6
El Oro	2,6	2,7
Esmeraldas	2,3	2,5
Galápagos	1,5	1,7
Guayas	1,9	2,1
Imbabura	2,7	2,9
Loja	2,6	2,8
Los Ríos	2,8	3,0
Manabí	2,5	2,7

Morona Santiago	5,1	5,6
Napo	3,3	3,7
Orellana	2,2	2,5
Pastaza	5,0	5,6
Pichincha	1,8	2,0
Santa Elena	2,0	2,2
Santo Domingo	2,0	2,2
Sucumbíos	2,2	2,4
Tungurahua	3,8	4,1
Zamora Chinchipe	3,7	4,2
Total	2,3	2,5

Tabla 3.13 Grado de uso de infraestructura celular para medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.14 presenta el cálculo de la capacidad de almacenamiento anual requerido por provincia en Tera bits:

Provincia	Lecturas cada	Lecturas cada	Lecturas cada
	15 minutos	5 minutos	1 minuto
Azuay	4,55	13,64	68,19
Bolívar	1,17	3,52	17,59
Cañar	1,44	4,31	21,56
Carchi	1,05	3,15	15,75
Chimborazo	2,93	8,78	43,91
Cotopaxi	2,61	7,84	39,19
El Oro	3,83	11,50	57,52
Esmeraldas	3,14	9,41	47,03
Galápagos	0,16	0,48	2,41
Guayas	23,27	69,82	349,09
Imbabura	2,54	7,63	38,14
Loja	2,90	8,69	43,47
Los Ríos	4,97	14,90	74,51

Manabí	8,74	26,23	131,17
Morona Santiago	0,94	2,83	14,17
Napo	0,66	1,99	9,93
Orellana	0,87	2,61	13,06
Pastaza	0,54	1,61	8,04
Pichincha	16,45	49,34	246,70
Santa Elena	1,97	5,91	29,56
Santo Domingo de los Tsachilas	2,62	7,87	39,35
Sucumbíos	1,13	3,38	16,90
Tungurahua	3,22	9,66	48,32
Zamora Chinchipe	0,58	1,75	8,75
Total	92,29	276,86	1.384,31

Tabla 3.14 Capacidad de almacenamiento anual por provincia

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.15 presenta el tiempo en horas necesario para realizar las lecturas de medidores por provincia.

Provincia	Lecturas cada 15 minutos	Lecturas cada 5 minutos	Lecturas cada 1 minuto
Azuay	9,0	27,0	135,1
Bolívar	2,3	7,0	34,9
Cañar	2,8	8,5	42,7
Carchi	2,1	6,2	31,2
Chimborazo	5,8	17,4	87,0
Cotopaxi	5,2	15,5	77,7
El Oro	7,6	22,8	114,0
Esmeraldas	6,2	18,6	93,2
Galápagos	0,3	1,0	4,8
Guayas	46,1	138,4	691,8
Imbabura	5,0	15,1	75,6
Loja	5,7	17,2	86,2

Los Ríos	9,8	29,5	147,7
Manabí	17,3	52,0	260,0
Morona Santiago	1,9	5,6	28,1
Napo	1,3	3,9	19,7
Orellana	1,7	5,2	25,9
Pastaza	1,1	3,2	15,9
Pichincha	32,6	97,8	488,9
Santa Elena	3,9	11,7	58,6
Santo Domingo	5,2	15,6	78,0
Sucumbíos	2,2	6,7	33,5
Tungurahua	6,4	19,2	95,8
Zamora Chinchipe	1,2	3,5	17,3
Total	182,9	548,7	2.743,5

Tabla 3.15 Duración en horas para medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

3.4.1.1 Tráfico celular estimado

Es necesario tomar en cuenta que los datos transmitidos entre el medidor y la empresa eléctrica son generados por la lectura remota, corte y reconexión remota del suministro eléctrico, notificaciones de falla, detección de fraude y tarifas horarias. La tabla 3.16 presenta la velocidad en kbps por provincia necesaria para medición inteligente con lecturas cada 15 minutos, 5 minutos y cada minuto.

Descripción	4 lecturas por hora [kbps]	12 lecturas por hora [kbps]	60 lecturas por hora [kbps]
Cuenca	206	618	3.089
Guaranda	53	159	797
Azogues	65	195	977
Tulcán	48	143	714
Riobamba	133	398	1.989
Latacunga	118	355	1.775
Machala	174	521	2.606
Esmeraldas	142	426	2.131
Galápagos	7	22	109
Guayaquil	1.054	3.163	15.814
Ibarra	115	346	1.728
Loja	131	394	1.969

Babahoyo	225	675	3.375
Portoviejo	396	1.188	5.942
Macas	43	128	642
Tena	30	90	450
Francisco de Orellana	39	118	592
Puyo	24	73	364
Quito	745	2.235	11.176
Santa Elena	89	268	1.339
Santo Domingo	119	357	1.783
Nueva Loja	51	153	766
Ambato	146	438	2.189
Zamora	26	79	396
TOTAL	4.181	12.542	62.709

Tabla 3.16 Velocidad en kbps requerida por provincia para medición remota

Realizado por: Milton Ruiz

Para calcular el tiempo de uso del canal con tecnología GSM se divide 1120 bits equivalentes a una lectura del medidor para la capacidad del canal de 22800 bps. El tiempo de uso del canal es de 0,049 segundos.

El tráfico generado por medición avanzada ha sido calculado en base a un prototipo de medidor inteligente con comunicaciones celulares. Actualmente medidores

eléctricos inteligentes con comunicaciones celulares no se comercializan en el mercado ecuatoriano y la compra mínima a las empresas fabricantes es de 10.000 equipos.

3.4.2 Cálculo y dimensionamiento de los enlaces de fibra óptica.

Para el cálculo, dimensionamiento y simulación de los enlaces de fibra óptica es necesario tomar en cuenta el tipo de fibra óptica instalada y las distancias entre las empresas eléctricas de cada provincia y el centro nacional de control de energía.

La tabla 3.17 presenta las distancias entre las empresas eléctricas y el CENACE.

Descripción	Distancia [km]
Cuenca - CENACE	382
Guaranda - CENACE	206
Azogues - CENACE	338
Tulcán - CENACE	233
Riobamba - CENACE	158
Latacunga - CENACE	70
Machala - CENACE	526
Esmeraldas - CENACE	210
Guayaquil - CENACE	354
Ibarra - CENACE	129
Loja - CENACE	517
Babahoyo - CENACE	348

Portoviejo - CENACE	236
Macas - CENACE	599
Tena - CENACE	284
Francisco de Orellana - CENACE	453
Puyo - CENACE	205
Quito -CENACE	24
Santa Elena - CENACE	458
Santo Domingo - CENACE	80
Nueva Loja - CENACE	533
Ambato - CENACE	121
Zamora - CENACE	574
TOTAL	7.038

Tabla 3.17 Distancia entre las empresas de distribución y CENACE

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 3.18 presenta los parámetros que debe cumplir la red de transporte óptico bajo el estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de corta distancia con señal NRZ 10G para fibras tipo G.652 y G.655.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES
INFORMACIÓN GENERAL		
Máximo número de canales	--	16
Velocidad binaria/codificación de línea	--	NRZ 10G

Máxima tasa de errores bits	--	10^{-12}
Tipo de fibra	--	G.652 – G.655
INTERFAZ EN EL PUNTO MPI-SM		
Máxima potencia media de salida de canal	dBm	+3
Mínima potencia media de salida canal	dBm	0
Máxima potencia media total de salida	dBm	+15
Frecuencia central	THz	192,1 + 0,2 m m = 0 a 15
Separación de canales	GHz	200
TRAYECTO ÓPTICO DEL PUNTO MPI-SM AL MPI-RM		
Atenuación máxima	dB	11
Atenuación mínima	dB	0
Máxima dispersión cromática	ps/nm	800 G.652 420 G.655
INTERFAZ EN EL PUNTO MPI-RM		
Máxima potencia media de entrada de canal	dBm	+3
Mínima potencia media de entrada de canal	dBm	-11
Máxima potencia media de total de entrada	dBm	+15

Tabla 3.18 Parámetros Red de transporte óptico corta distancia a 10 Gbps.

(ITU-T, 2012: 41)

La tabla 3.19 presenta los parámetros que debe cumplir la red de transporte óptico bajo el estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de larga distancia con señal NRZ 10G para fibras tipo G.652 y G.655.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES
INFORMACIÓN GENERAL		
Máximo número de canales	--	16
Velocidad binaria/codificación de línea	--	NRZ 10G
Máxima tasa de errores	--	10^{-12}
Tipo de fibra	--	G.652 – G.655
INTERFAZ EN EL PUNTO MPI-SM		
Máxima potencia media de salida de canal	dBm	+5
Mínima potencia media de salida de canal	dBm	0
Máxima potencia media total de salida	dBm	+17
Frecuencia central	THz	192,1 + 0,2 m m = 0 a 15
Separación de canales	GHz	200
TRAYECTO ÓPTICO DEL PUNTO MPI-SM AL MPI-RM		
Atenuación máxima	dB	22
Atenuación mínima	dB	11
Máxima dispersión cromática	ps/nm	1600 G.652

		840 G.655
INTERFAZ EN EL PUNTO MPI-RM		
Máxima potencia media de entrada de canal	dBm	-6
Mínima potencia media de entrada de canal	dBm	-22
Máxima potencia media de total de entrada	dBm	+6

Tabla 3.19 Parámetros Red de transporte óptico larga distancia a 10 Gbps.

(ITU-T, 2012: 43)

ITU-T G.959.1 establece que en la práctica a 1550 nm vanos de 40 km presentan una atenuación de 11 dB, vanos de 80 km presentan una atenuación de 22 dB. A 1310 nm vanos de 20 km presentan una atenuación de 11 dB y vanos de 40 km presentan una atenuación de 22 dB.

El cálculo del presupuesto de potencias se realiza aplicando ecuación 3.1:

$$P_T - \alpha_C * N - \alpha * D - \alpha_e * N_e - M_C - M_e \geq P_R$$

Ecuación 3.1 Presupuesto de potencias

Dónde:

P_T = Potencia de transmisión (dBm)

α_C = Atenuación de conector en la interfaz (dB)

N = Número de conectores de extremo a extremo de enlace

α = Atenuación de longitud de fibra óptica (dB/Km)

D = Longitud de la fibra óptica (Km)

α_e = Atenuación de empalmes (dB)

N_e = Número de empalmes

M_C = Margen de seguridad de la fibra óptica (dB)

M_e = Margen de interfaz óptico de transmisión (dB)

P_R = Potencia de recepción mínima (dBm)

La normativa de ITU para fibras ópticas G.652 a 1550nm establece que el coeficiente de dispersión cromático es 17 ps/nm x km y el coeficiente de atenuación es de 0.275 dB/km incluidos los empalmes y margen del cable.

La ecuación 3.2 establece el presupuesto de potencias simplificado:

$$P_T - \alpha * D \geq P_R$$

Ecuación 3.2 Presupuesto de potencias simplificado

La máxima distancia en la que se puede transmitir señales ópticas sin amplificación depende de la potencia de salida y la sensibilidad del receptor. Para el cálculo se toma como referencia la norma ITU-T G.959.1 para larga y corta distancia.

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$0dBm - 0,275dBm * D \geq -11dBm$	$D = 40 km$
Corta distancia	$3dBm - 0,275dBm * D \geq -11dBm$	$D = 90 km$
Larga distancia	$0dBm - 0,275dBm * D \geq -22dBm$	$D = 80 km$
Larga distancia	$5dBm - 0,275dBm * D \geq -22dBm$	$D = 98 km$

Tabla 3.20 Distancia de transmisión máxima con fibra óptica sin amplificación

Realizado por: Milton Ruiz

La ecuación 3.3 permite el cálculo del ancho de banda tomando en cuenta la distancia, coeficiente de dispersión y ancho espectral del láser.

$$AB = \frac{0,5}{D Wc \Delta\lambda}$$

Ecuación 3.3 Ancho de banda

Donde:

D = Distancia máxima permitida para un enlace [km].

Wc = Coeficiente de dispersión cromática de la fibra óptica [ps/km-nm].

$\Delta\lambda$ = Ancho espectral del láser entre 1 a 5 nm.

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$AB = \frac{0,5}{40 \text{ [km]} \times 17 \left[\frac{ps}{km \times nm} \right] \times 1 \text{ [nm]}}$	$AB = 735 \text{ Mhz}$
Larga distancia	$AB = \frac{0,5}{98 \text{ [km]} \times 17 \left[\frac{ps}{km \times nm} \right] \times 1 \text{ [nm]}}$	$AB = 300 \text{ Mhz}$

Tabla 3.21 Ancho de banda calculado en MHz.

Realizado por: Milton Ruiz

La ecuación 3.4 permite determinar la capacidad del canal utilizando el teorema de Nyquist para un canal ideal.

$$C = 2AB \times \log_2 n$$

Ecuación 3.4 Capacidad del canal

Donde

n = el número de niveles posibles de la señal.

AB = el ancho de banda expresado en hertzios (Hz).

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$C = 2 \times 735 \times \log_2 2$	$C = 1470 \text{ Mbps}$
Larga distancia	$C = 2 \times 300 \times \log_2 2$	$C = 600 \text{ Mbps}$

Tabla 3.22 Capacidad del canal en Mbps

Realizado por: Milton Ruiz

4 DISEÑO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1 Diseño de la red

Es necesario diseñar la arquitectura de comunicaciones de forma distribuida y escalable, permitiendo que la infraestructura de medición avanzada se integre a las redes eléctricas inteligentes mediante el uso de redes celulares como tecnología de comunicación entre los medidores y las empresas eléctricas. Fibra óptica como medio de comunicación entre las empresas eléctricas y el centro nacional de control de energía.

El gráfico 4.1 muestra el modelo del sistema de gestión de datos medidos o MDMS totalmente distribuido que representa la red de comunicaciones a nivel nacional. Cada provincia cuenta con un sistema MDMS que reciben los datos de sus abonados. Todos los MDMS a nivel nacional se comunican a un MDMS central que es el CENACE. (Zhou, Qingyang Hu, & Qian, 2012: 1636)

En la arquitectura de comunicación totalmente distribuida en redes inteligentes, existen múltiples MDMS desplegados a nivel nacional, cada MDMS se encarga del procesamiento y almacenamiento de información proporcionada por los medidores inteligentes de cada región. Al implementar arquitecturas distribuidas se optimiza el ancho de banda en las comunicaciones ya que se reduce la transmisión de datos en bruto a una arquitectura centralizada. La información efectiva por cada provincia son los datos depurados que han sido procesados por cada uno de los MDMS, que es significativamente menor a los datos brutos recogidos por el gran número de

medidores inteligentes, ya que sólo una pequeña parte de los datos es necesaria para los servicios de operación y gestión. Por ejemplo, el servicio de gestión de apagones (OMS), sólo necesita obtener datos de calidad de la energía en situaciones anormales. Así que la mayoría de los datos, especialmente los que se han recogido en una alta frecuencia, no son necesarios en la OMS y serán filtrados.

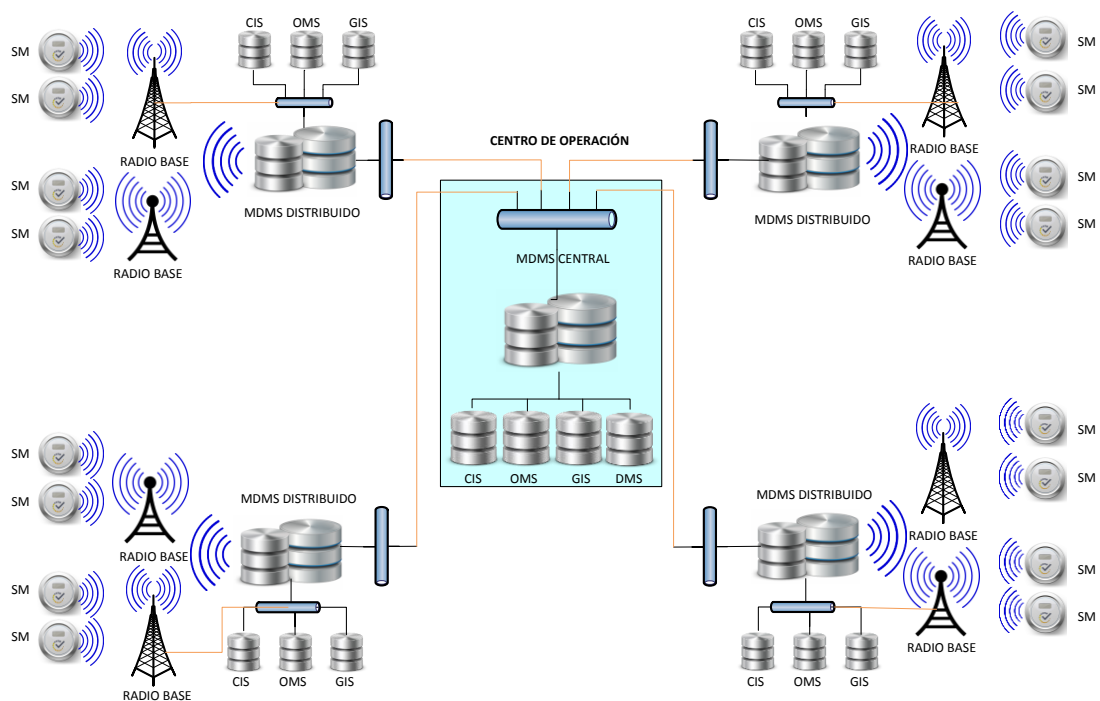


Gráfico 4.1 Arquitectura de comunicación en redes inteligentes.

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.2 representa la arquitectura de comunicación entre los medidores eléctricos inteligentes, pasando por el sistema telefónico móvil avanzado hasta llegar al destino que es la empresa de distribución local.

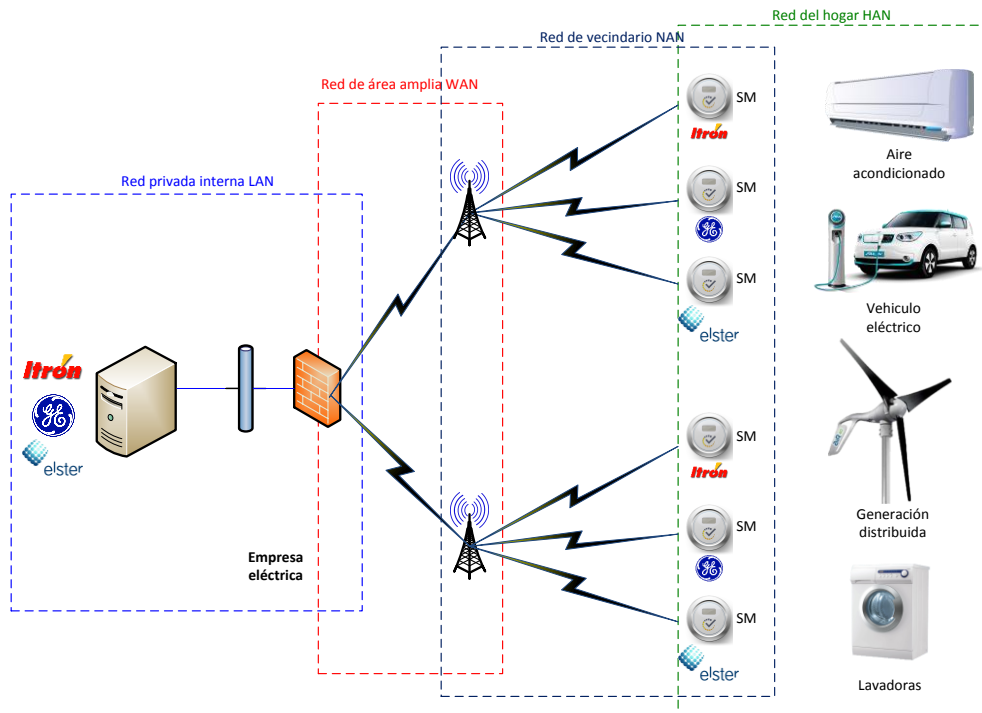


Gráfico 4.2 Diseño de red medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.3 presenta el transporte de información desde los medidores hasta el MDMS distribuido utilizando las comunicaciones celulares.

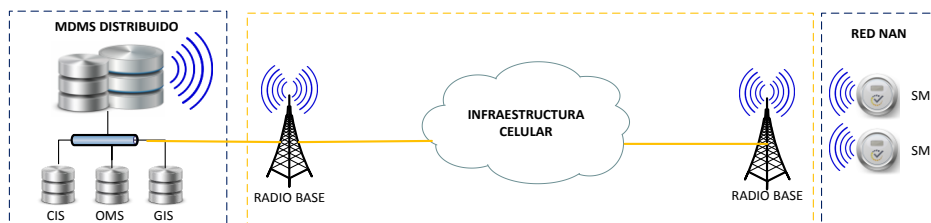


Gráfico 4.3 Medición inteligente usando la red celular

Realizado por: Milton Ruiz

La red de frontera de cada MDMS está constituida por dos routers firewall comunicados mediante GLBP. Los routers deben permitir la configuración de DMVPN permitiendo enviar la información encriptada entre los DMDS distribuidos y el DMDS centralizado.

El gráfico 4.4 muestra el esquema de red WAN utilizando DMVPN.

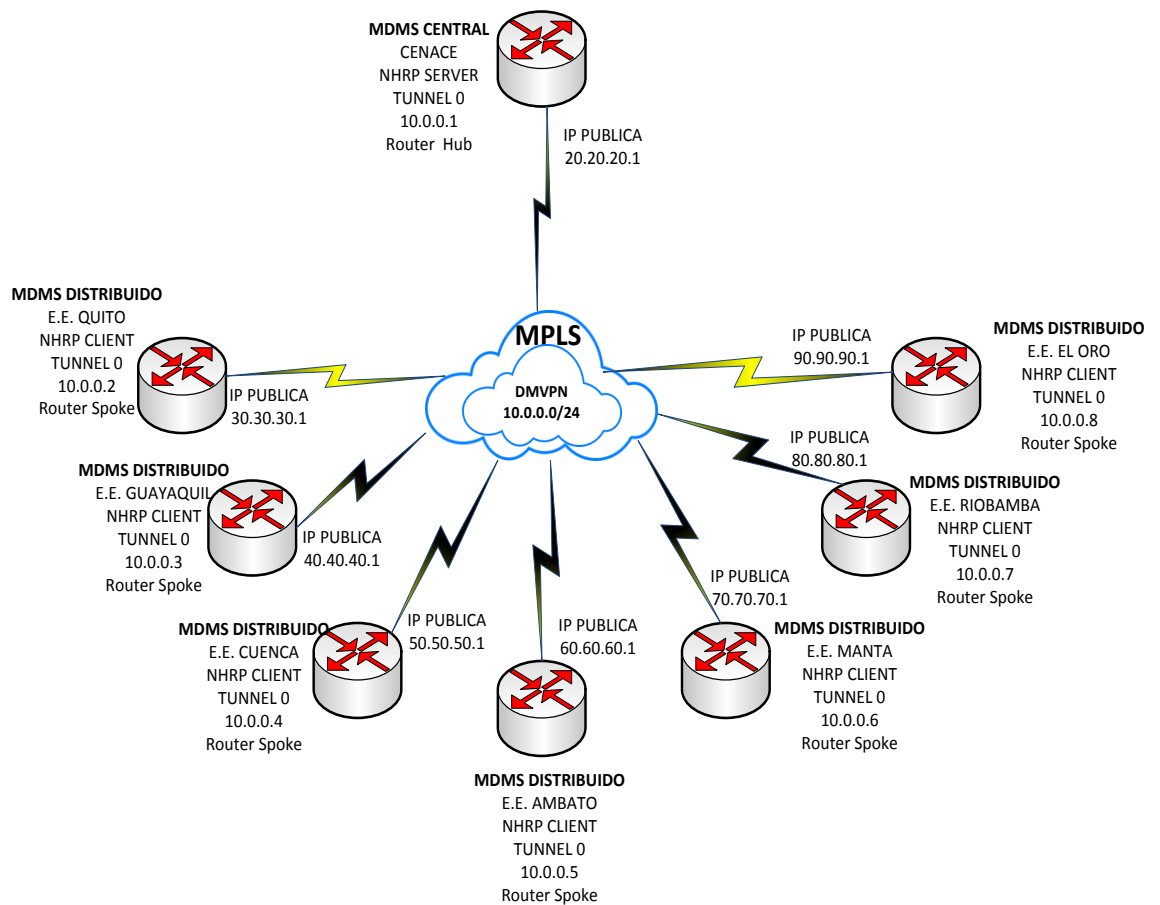


Gráfico 4.4 Red WAN con DMVPN

Realizado por: Milton Ruiz

DMVPN permite la comunicación entre todos los dispositivos de manera segura ya que maneja encriptación y es independiente de los protocolos de enrutamiento usados por los proveedores de servicios. Con la finalidad de conseguir alta confiabilidad se debe contar con otro proveedor de servicios como CNT o TELCONET.

El gráfico 4.5 representa la infraestructura de red interna de cada MDMS.

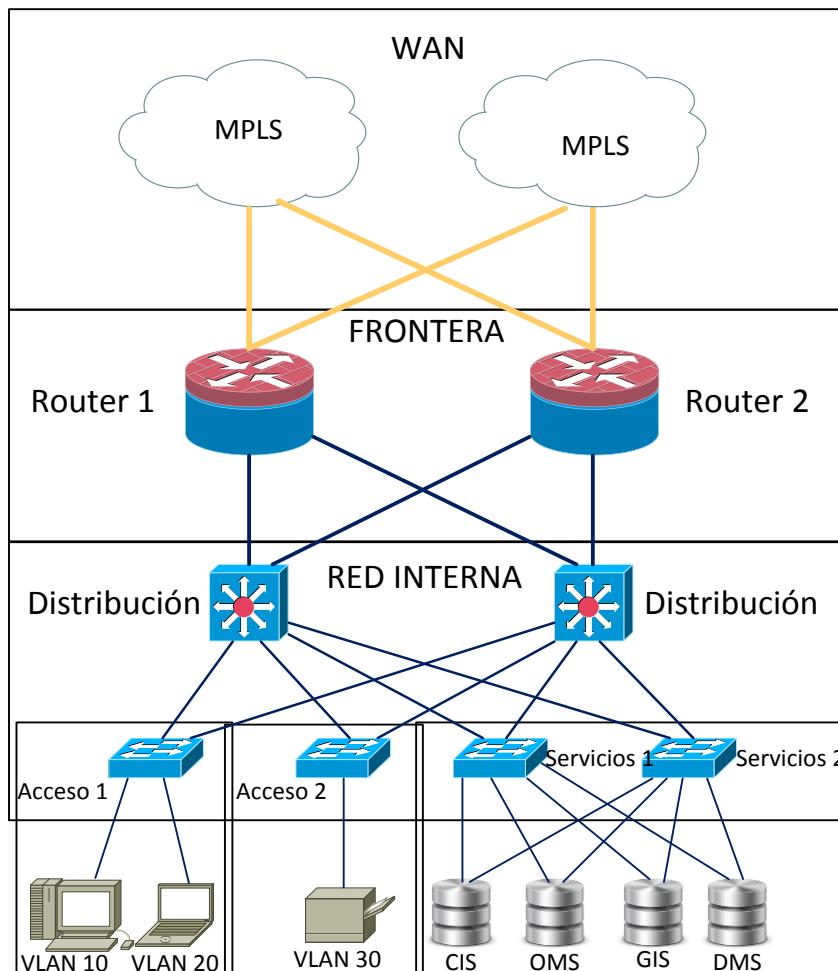


Gráfico 4.5 Red LAN MDMS

Realizado por: Milton Ruiz

Con la finalidad de brindar confiabilidad en la red interna es necesario dos equipos de core conectados mediante VSS gestionando la conmutación de paquetes entre los equipos permitiendo alta disponibilidad y fiabilidad de las comunicaciones entre los servidores internos.

Los dispositivos de acceso deben permitir la creación de redes lógicas o VLANs con la finalidad de seccionar los dominios de difusión y garantizar permisos de acceso a servidores en la red interna dependiendo de permisos con la creación de ACLs.

4.2 Simulación de telecomunicaciones

La red de backhaul que permite la comunicación entre los medidores y las empresas distribuidoras de energía eléctrica se realizan a través del uso de comunicaciones celulares. La medición remota se la puede realizar mediante llamadas o se puede utilizar el servicio complementario de mensajes de texto. Las comunicaciones entre las empresas de distribución y el centro nacional de control de energía CENACE utiliza la red de fibra óptica implementada por TRANSELECTRIC S.A. La simulación del comportamiento de la fibra óptica se realiza con el software OptSim. La simulación del enrutamiento de la red se la realiza con el software GNS3. Finalmente se simula la aplicación de envío y recepción de datos entre las empresas eléctricas y el centro nacional de control con el software LabView.

4.2.1 Simulación

Con la finalidad de determinar el comportamiento de la capa física, capa de acceso a la red, capa de internet, capa de transporte y aplicación se ha usado dos simuladores y un software de control. El comportamiento de la fibra óptica ha sido analizado con el software OptSim. El comportamiento de la capa de enlace de datos y la capa de internet ha sido simulado en el software GNS3. El tercer nivel es la capa de aplicación y se realiza mediante el software de control LabView.

4.2.1.1 Simulación capa física

El presente diseño utiliza modulación externa por lo tanto los dispositivos que intervienen en la transmisión son: generador de datos, driver NRZ, laser y modulador.

El canal óptico está constituido por: fibra óptica, amplificador óptico y compensador de dispersión.

El receptor está constituido por un filtro óptico, transductor óptico-eléctrico y un filtro eléctrico. A la salida se ubican los dispositivos de medición y análisis como el estimador de ruido, osciloscopio eléctrico y analizador de espectro.

La simulación ha sido realizada bajo WDM estableciendo cinco frecuencias en la banda de 193.3 THz y separadas 0.05 THz una de otra. La codificación de los pulsos son NRZ (Non Return to Zero), con modulación externa tipo OOK (On-Off Keying).

El gráfico 4.6 presenta el diseño de la red óptica simulada.

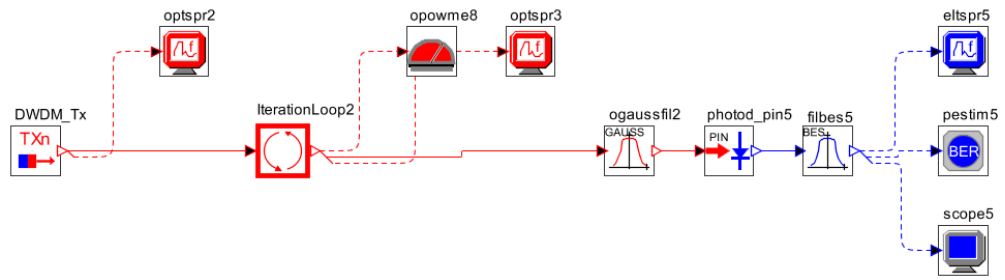


Gráfico 4.6 Diseño de red óptica

Realizado por: Milton Ruiz

La tasa de errores por sus siglas en ingles BER no debe superar valor de 10^{-12} , por lo tanto el BER esperado en los diseños de los sistemas de transmisión ópticos debe cumplir con la norma establecida por la ITU-T G.959.1.

Dependiendo de la distancia de los enlaces de fibra óptica se debe regular la potencia de salida del canal, permitiendo una potencia de recepción adecuada.

La tabla 4.1 presenta las frecuencias de transmisión para cada grupo.

Grupo DWDM	Frecuencia [THz]
1	193.2
2	193.25
3	193.3
4	193.35
5	193.4

Tabla 4.1 Frecuencias de transmisión DWDM

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 4.2 presenta los resultados de la simulación tomando en cuenta la distancia, potencia de salida y potencia de recepción del canal.

Distancia [km]	Power IN [dBm]	Power IN [mW]	Power OUT [dBm]	Power OUT [mW]	BER
100	1.123	0.130E+01	-12.069	0.621E-01	0.30342E-12
200	2.123	0.163E+01	-13.018	0.499E-01	0.11255E-12
300	3.123	0.205E+01	-13.869	0.410E-01	0.28116E-12
400	4.123	0.258E+01	-8.903	0.129E+00	0.21348E-12
500	4.123	0.258E+01	-8.878	0.129E+00	0.12180E-12
600	4.123	0.258E+01	-6.872	0.205E+00	0.83298E-13

Tabla 4.2 Potencia de salida y recepción dependiente de la distancia

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.7 presenta la potencia de salida y la potencia de recepción por canal.

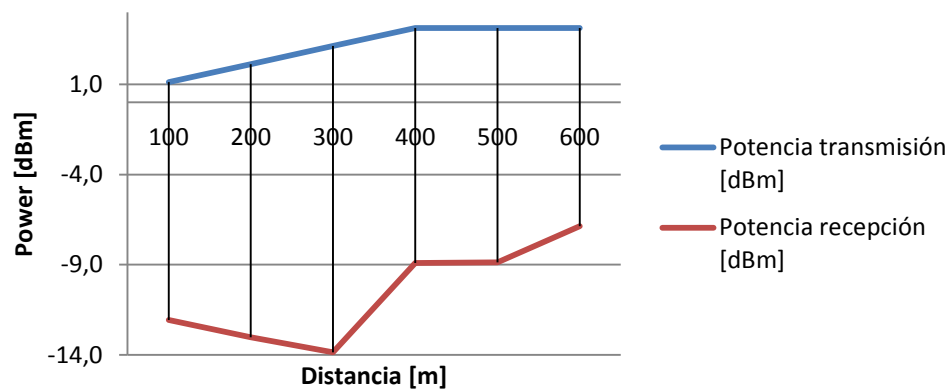


Gráfico 4.7 Potencia de salida vs potencia de recepción

Realizado por: Milton Ruiz

Se deben tomar en cuenta los parámetros de ganancia y compensación, los mismos que son regulados de acuerdo a la distancia. Estos dos parámetros influyen directamente en la relación de la señal respecto al ruido.

La tabla 4.3 presenta los resultados de la simulación tomando como valor típico de 17 [ps/km/nm] a la dispersión.

DISTANCIA	Dispersión [ps/km/nm]	Ganancia [db]	Compensación [ps/nm]
100	17	0	-710
200	17	9	-1250
300	17	12	-1500
400	17	15	-1525
500	17	16	-1600
600	17	17	-1600

Tabla 4.3 Regulación de ganancia-compensación vs distancia

Realizado por: Milton Ruiz

A medida que la distancia aumenta, es necesario modificar la ganancia de los amplificadores ópticos y regular la compensación.

Se debe tomar en cuenta la compensación de dispersión ya que afecta de forma directa a la señal en recepción. Para contrarrestar la dispersión, que en los casos prácticos es de 17 [ps/km/nm], se realiza una compensación tomando en cuenta la distancia del canal óptico. La máxima compensación para la fibra G.652 es de 1600 [ps/nm] establecida en la norma ITU-T G.959.1.

El gráfico 4.8 presenta los resultados del ajuste de la ganancia respecto a la distancia con la finalidad de mantener la potencia dentro de los parámetros de sensibilidad del receptor.

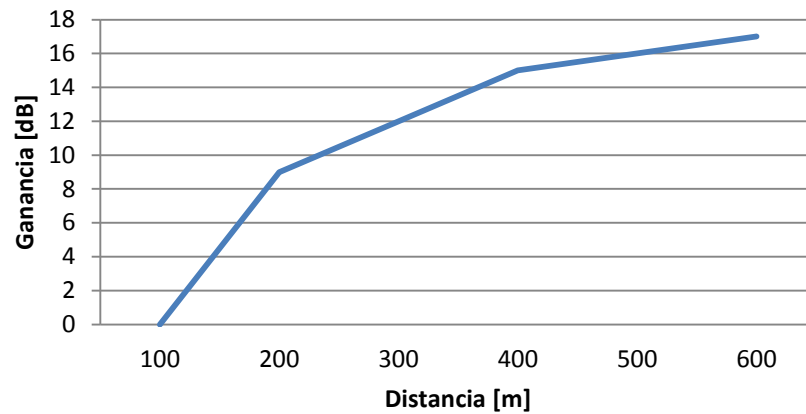


Gráfico 4.8 Ganancia vs Distancia

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.9 presenta los resultados del ajuste de la compensación respecto a la distancia con la finalidad de mantener el BER dentro de los parámetros de la norma.

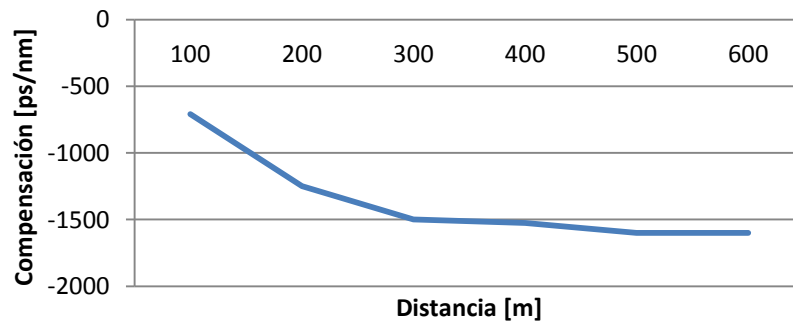


Gráfico 4.9 Compensación vs Distancia

Realizado por: Milton Ruiz

4.2.1.2 Simulación capa de enlace de datos y red

Con la finalidad de garantizar alta disponibilidad, confiabilidad y seguridad de las comunicaciones entre las empresas eléctricas y el centro nacional de control de energía. La red de comunicaciones WAN ha sido diseñada bajo una arquitectura centralizada fácil de implementar y gestionar conocida como Dynamic Multipoint VPN, esta solución crea redes privadas virtuales seguras y escalables.

A continuación se presenta el diseño de red de frontera y red local de las empresas eléctricas. Por la criticidad de los datos se ha diseñado una arquitectura de red de alta disponibilidad, para lo cual es necesario de dos proveedores de servicios de telecomunicaciones, dos routers de frontera configurados con HSRP (Hot Standby Router Protocol) y dos dispositivos de core configurados con VSS (Virtual Switching System) y GLBP (Gateway Load Balancing Protocol) con la finalidad de balacear el tráfico.

DMVPN proporciona una malla completa entre todos los nodos actores de la red permitiendo reconfiguraciones de las rutas dinámicamente en caso de que una ruta no se encuentre activa. DMVPN reemplaza las rutas estáticas por el protocolo de enrutamiento dinámico EIGRP. DMVPN consta de un equipo central denominado HUB que se encarga de levantar VPNs de forma dinámica y posee la información de enrutamiento de los demás equipos de la red denominados SPOKES.

Si el equipo central conocido como HUB pierde comunicación con sus SPOKES las redes privadas virtuales dejan de comunicarse. Para preservar las comunicaciones

activas es necesario un segundo proveedor de servicios, el mismo que brindará redundancia en una segunda infraestructura de comunicaciones basada en DMVPN.

El gráfico 4.10 muestra la topología física de la red al igual que la distribución del direccionamiento ip.

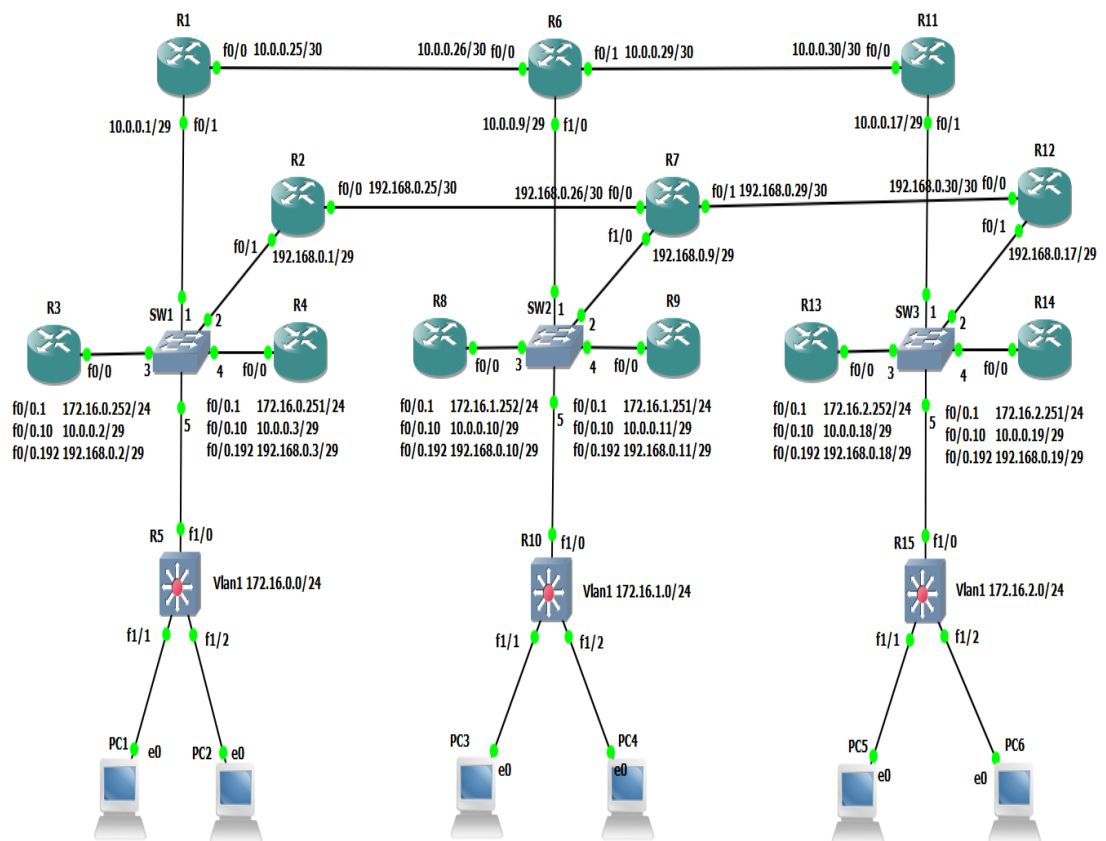


Gráfico 4.10 Distribución jerárquica de redes

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.11 presenta la distribución jerárquica de la red de comunicaciones, en la cual se presentan: en los rectángulos naranjas a los proveedores de servicios, en los

rectángulos azules la frontera de cada empresa y en círculo celeste se muestra a la red local de la empresa.

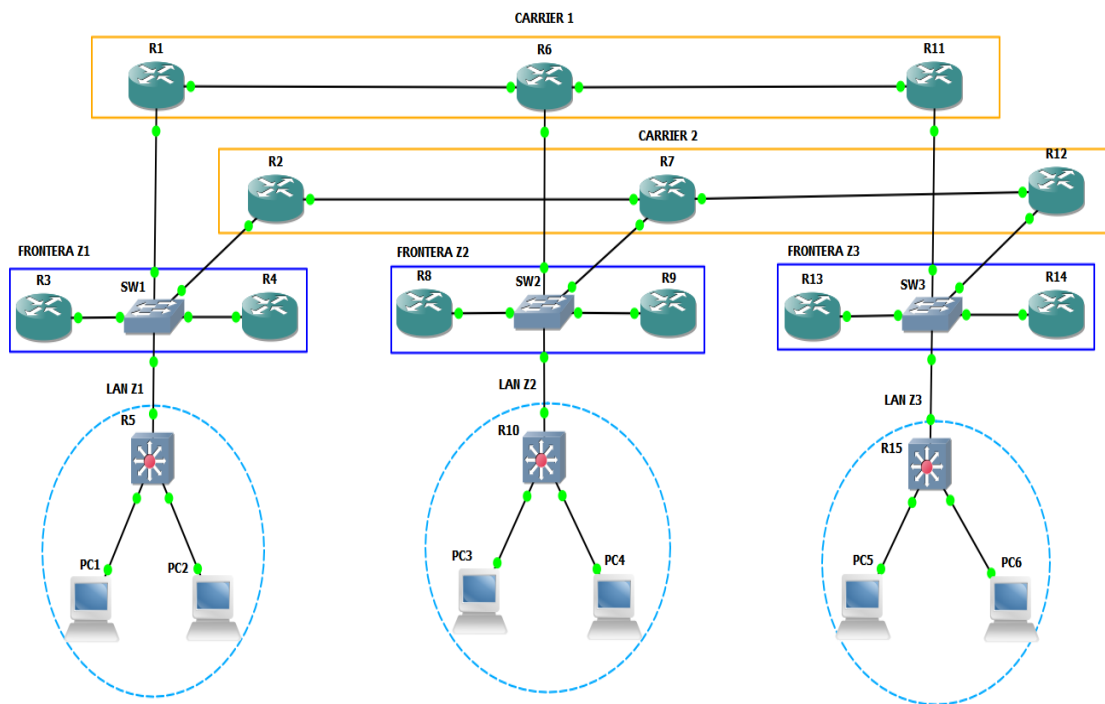


Gráfico 4.11 Topología física de red

Realizado por: Milton Ruiz

OSPF es el protocolo de enrutamiento configurado entre los proveedores de servicios y como red de acceso se ha configurado MPLS simulando una red real que es utilizada en la actualidad por los ISP's.

EIGRP es el protocolo de enrutamiento utilizado entre los routers de frontera de cada empresa.

La pc que ejecuta el programa GNS3 ha sido equipada con cuatro adaptadores de red, los mismos que permiten la comunicación con las diferentes zonas que simulan los centros de distribución de cada provincia.

La dirección ip asignada a la pc que simula el centro nacional de control de energía en la zona 2 es 172.16.1.1 con mascara de red 255.255.255.0 y puerta de enlace 172.16.1.254.

El gráfico 4.12 presenta los cuatro adaptadores de red y la ip asignada al centro nacional de control de energía en la zona 2.

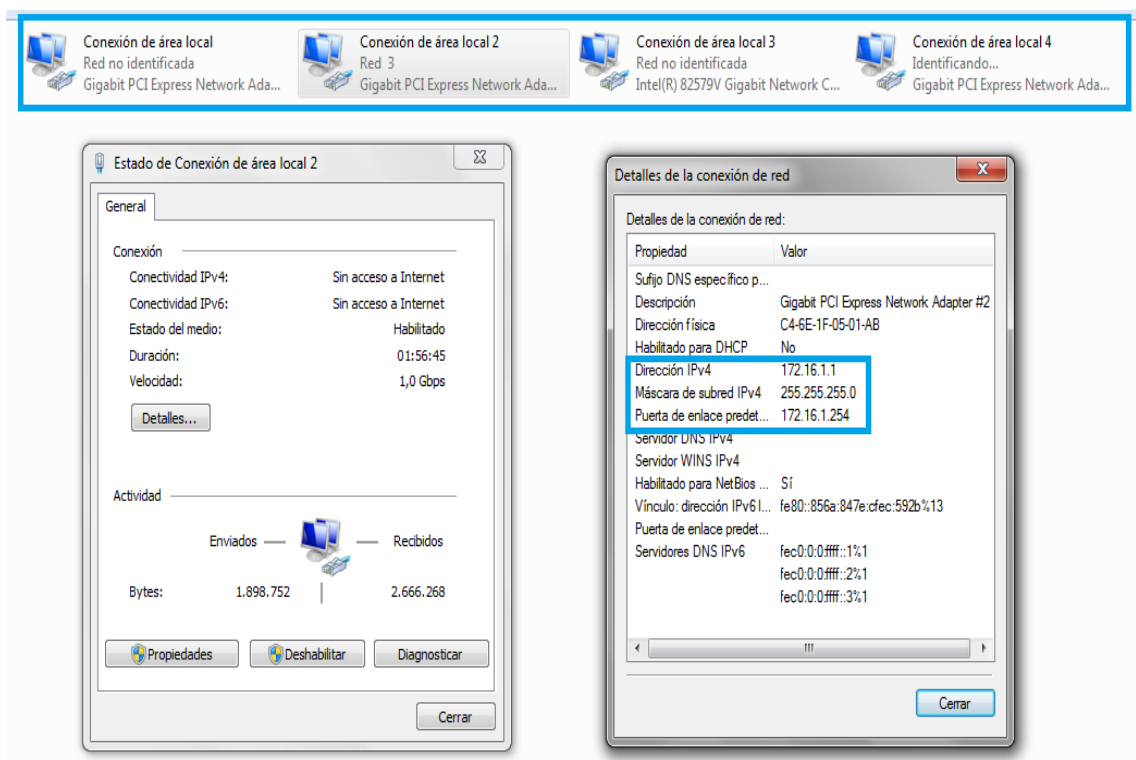


Gráfico 4.12 Dirección ip y adaptadores de red zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

La dirección ip asignada a la pc que simula la empresa eléctrica de distribución en la zona 1 es 172.16.0.1 con mascara de red 255.255.255.0 y puerta de enlace 172.16.0.254.

El gráfico 4.13 presenta el adaptador red y la ip asignada a la empresa de distribución de energía en la zona 1.

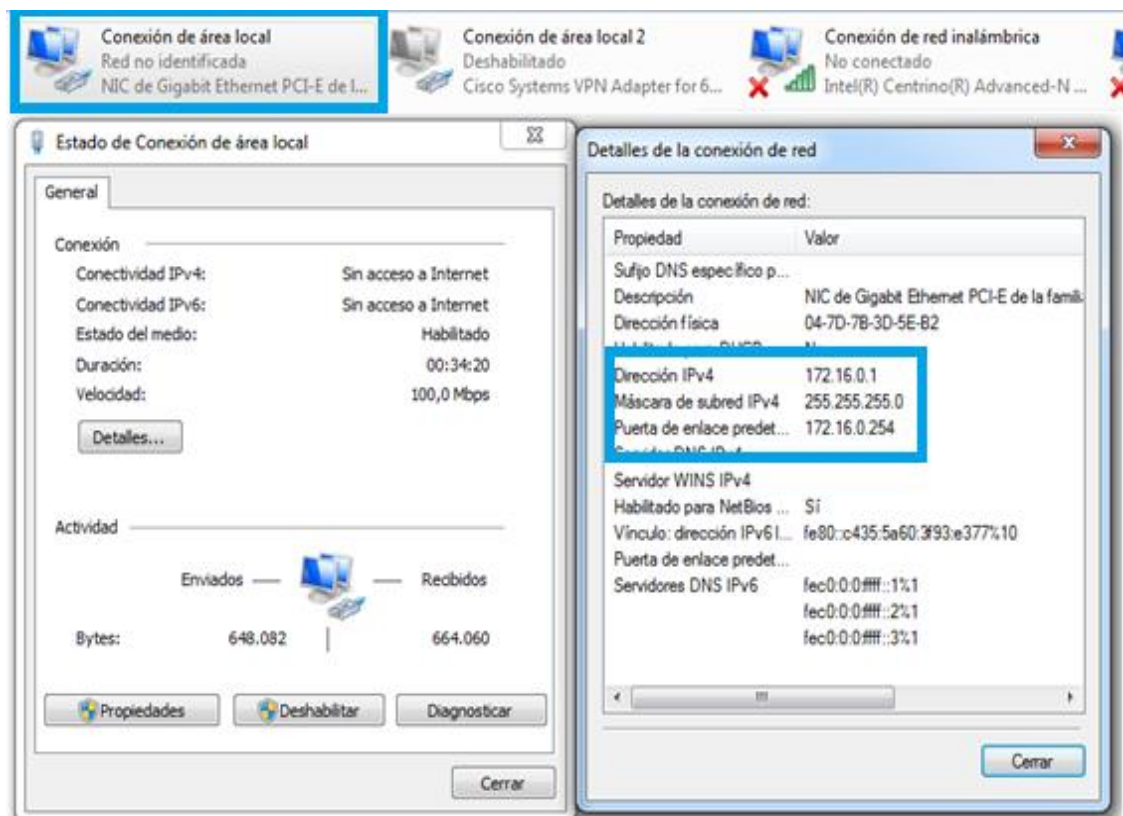


Gráfico 4.13 Dirección ip y adaptadores de red zona 1

Realizado por: Milton Ruiz

La dirección ip asignada mediante dhcp a la pc que simula la empresa eléctrica de distribución en la zona 3 es 172.16.2.2 con mascara de red 255.255.255.0 y puerta de enlace 172.16.2.254.

El gráfico 4.14 presenta el adaptador red y la ip asignada a la empresa de distribución de energía en la zona 3.

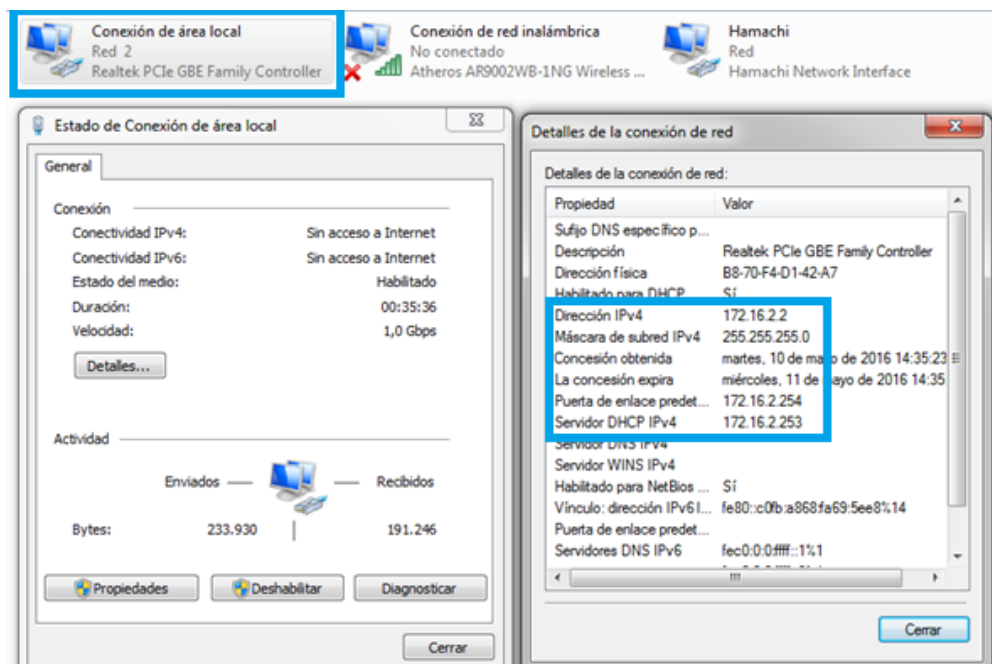


Gráfico 4.14 Dirección ip y adaptadores de red zona 3

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.15 muestra la configuración DMVPN del router R3 en la zona 1 con el túnel 100 y 200 y sus respectivos pares.

```

R3#show dmvpn
Legend: Attrb --> S - Static, D - Dynamic, I - Incompletea
N - NATed, L - Local, X - No Socket
# Ent --> Number of NHRP entries with same NBMA peer

Tunnel100, Type:Hub, NHRP Peers:5,
# Ent Peer NBMA Addr Peer Tunnel Add State UpDn Tm Attrb
-----
1 10.0.0.10 10.1.1.2 UP never D
1 10.0.0.18 10.1.1.3 UP never D
1 10.0.0.19 10.1.1.4 UP never D
1 10.0.0.11 10.1.1.5 UP never D
1 10.0.0.3 10.1.1.6 UP never D

Tunnel200, Type:Spoke, NHRP Peers:1,
# Ent Peer NBMA Addr Peer Tunnel Add State UpDn Tm Attrb
-----
1 192.168.0.19 10.2.2.1 UP 00:49:23 S

```

Gráfico 4.15 Configuración DMVPN del router R3

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.16 muestra la respuesta del comando ping desde la zona 1 con ip de origen 172.16.0.1 hacia la zona 2 con ip destino 172.16.1.1.

```

Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=42ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=51ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=50ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=49ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=48ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=47ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=46ms TTL=126

```

Gráfico 4.16 Respuesta del comando ping desde la zona 1 hacia la zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.17 muestra la traza desde la zona 1 con ip de origen 172.16.0.1 hacia la zona 2 con ip destino 172.16.1.1.

```
C:\Users\Milton>tracert 172.16.1.1

Traza a la dirección UIOGMR-UPS [172.16.1.1]
sobre un máximo de 30 saltos:

  1    10 ms     9 ms     9 ms    172.16.0.252
  2    57 ms    99 ms    58 ms    10.1.1.2
  3    56 ms    49 ms    49 ms    UIOGMR-UPS [172.16.1.1]

Traza completa.
```

Gráfico 4.17 Respuesta del comando tracert desde la zona 1 hacia la zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.18 muestra la configuración DMVPN del router R14 en la zona 3 con el túnel 100 y 200 y sus respectivos pares.

```
R14#show dmvpn
Legend: Attrb --> S - Static, D - Dynamic, I - Incompletea
        N - NATed, L - Local, X - No Socket
        # Ent --> Number of NHRP entries with same NBMA peer

Tunnel100, Type:Spoke, NHRP Peers:1,
# Ent  Peer NBMA Addr Peer Tunnel Add State  UpDn Tm Attrb
-----
      1      10.0.0.2      10.1.1.1    UP 00:39:02 S

Tunnel200, Type:Hub, NHRP Peers:5,
# Ent  Peer NBMA Addr Peer Tunnel Add State  UpDn Tm Attrb
-----
      1  192.168.0.11      10.2.2.2    UP  never D
      1  192.168.0.3      10.2.2.3    UP  never D
      1  192.168.0.2      10.2.2.4    UP  never D
      1  192.168.0.10     10.2.2.5    UP  never D
      1  192.168.0.18     10.2.2.6    UP  never D
```

Gráfico 4.18 Configuración DMVPN del router R14

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.19 muestra la respuesta del comando ping desde la zona 3 con ip de origen 172.16.2.2 hacia la zona 2 con ip destino 172.16.1.1.

```

Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=55ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=64ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=53ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=52ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=72ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=52ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=60ms TTL=126

```

Gráfico 4.19 Respuesta del comando ping desde la zona 3 hacia la zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.20 muestra la traza desde la zona 3 con ip de origen 172.16.2.2 hacia la zona 2 con ip destino 172.16.1.1.

```

C:\Users\Sistemas>tracert 172.16.1.1

Traza a la dirección UIOGMR-UPS [172.16.1.1]
sobre un máximo de 30 saltos:

  1      9 ms      9 ms      29 ms    172.16.2.252
  2     44 ms     49 ms     49 ms    10.1.1.2
  3     57 ms     59 ms     49 ms    UIOGMR-UPS [172.16.1.1]

Traza completa.

```

Gráfico 4.20 Respuesta del comando tracert desde la zona 3 hacia la zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.21 muestra que el túnel 100 ha sido apagado por lo tanto la DMVPN que utiliza este túnel se encuentra inhabilita.

```

R3(config)#interface tunnel 100
R3(config-if)#sh
R3(config-if)#
*Mar 1 00:53:13.419: %DUAL-5-NBRCHANGE: IP-EIGRP(0) 100: Neighbor 10.1.1.3 (Tunnel100) is down: interface down
*Mar 1 00:53:13.423: %DUAL-5-NBRCHANGE: IP-EIGRP(0) 100: Neighbor 10.1.1.5 (Tunnel100) is down: interface down
*Mar 1 00:53:13.423: %DUAL-5-NBRCHANGE: IP-EIGRP(0) 100: Neighbor 10.1.1.2 (Tunnel100) is down: interface down
*Mar 1 00:53:13.423: %DUAL-5-NBRCHANGE: IP-EIGRP(0) 100: Neighbor 10.1.1.4 (Tunnel100) is down: interface down
*Mar 1 00:53:13.423: %DUAL-5-NBRCHANGE: IP-EIGRP(0) 100: Neighbor 10.1.1.6 (Tunnel100) is down: interface down
R3(config-if)#
*Mar 1 00:53:15.351: %LINK-5-CHANGED: Interface Tunnel100, changed state to administratively down
*Mar 1 00:53:16.351: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface Tunnel100, changed state to down

```

Gráfico 4.21 Túnel 100 apagado

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.22 muestra la pérdida de tres pings desde la zona 1 con ip 172.16.0.1 hacia la zona 2 con ip 172.16.1.1. Adicional se presenta el restablecimiento de las comunicaciones utilizando la segunda DMVPN.

```

Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=63ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=72ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=61ms TTL=126
Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=43ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=32ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=40ms TTL=126

```

Gráfico 4.22 Pérdida y restablecimiento de conexión

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.23 muestra la traza desde la zona 1 hacia la zona 2 y presenta la nueva ruta 10.2.2.2 que toman los paquetes para llegar a la ip 172.16.1.1.

```
C:\Users\Milton>tracert 172.16.1.1
Traza a la dirección UIOGMR-UPS [172.16.1.1]
sobre un máximo de 30 saltos:

 1      2 ms      9 ms      9 ms    172.16.0.252
 2     61 ms     69 ms     69 ms    10.2.2.2
 3     56 ms     39 ms     49 ms    UIOGMR-UPS [172.16.1.1]

Traza completa.
```

Gráfico 4.23 Ruta con túnel 200

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.24 muestra que no existe caída en la conexión al apagar el túnel 100 desde la zona 3 con ip 172.16.2.2 hacia la zona 2 con ip 172.16.1.1.

```
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=54ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=44ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=43ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=44ms TTL=126
Respuesta desde 172.16.1.1: bytes=32 tiempo=43ms TTL=126
```

Gráfico 4.24 Conexión con túnel 200

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.25 muestra la traza desde la zona 3 hacia la zona 2 y presenta la nueva ruta 10.2.2.2 que toman los paquetes para llegar a la ip 172.16.1.1.

```
C:\Users\Sistemas>tracert 172.16.1.1
Traza a la dirección UIOGMR-UPS [172.16.1.1]
sobre un máximo de 30 saltos:

 1     11 ms     10 ms      8 ms    172.16.2.252
 2     32 ms     50 ms     38 ms    10.2.2.2
 3     42 ms     79 ms     39 ms    UIOGMR-UPS [172.16.1.1]

Traza completa.
```

Gráfico 4.25 Ruta con túnel 200

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.26 muestra la cantidad de tráfico que genera la zona 1 simulando el centro de distribución hacia la zona 2 que simula el centro nacional de control.

```
R1#show interfaces FastEthernet0/1
FastEthernet0/1 is up, line protocol is up
  Hardware is Gt96k FE, address is c201.4658.0001 (bia c201.4658.0001)
  MTU 1500 bytes, BW 10000 Kbit/sec, DLY 1000 usec,
    reliability 255/255, txload 1/255, rxload 1/255
  Encapsulation 802.1Q Virtual LAN, Vlan ID 1., loopback not set
  Keepalive set (10 sec)
  Half-duplex, 10Mb/s, 100BaseTX/FX
  ARP type: ARPA, ARP Timeout 04:00:00
  Last input 00:00:00, output 00:00:00, output hang never
  Last clearing of "show interface" counters never
  Input queue: 0/75/0/0 (size/max/drops/flushes); Total output drops: 0
  Queueing strategy: fifo
  Output queue: 0/40 (size/max)
  30 second input rate 8000 bits/sec, 6 packets/sec
  30 second output rate 7000 bits/sec, 5 packets/sec
    10449 packets input, 1636965 bytes
    Received 2574 broadcasts, 0 runts, 0 giants, 0 throttles
```

Gráfico 4.26 Tráfico generado en la zona 1

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.27 muestra la cantidad de tráfico que genera la zona 2 que simula el centro nacional de control de energía.

```
R6#show interfaces FastEthernet 1/0
FastEthernet1/0 is up, line protocol is up
  Hardware is AmdFE, address is c206.3760.0010 (bia c206.3760.0010)
  MTU 1500 bytes, BW 100000 Kbit/sec, DLY 100 usec,
    reliability 255/255, txload 1/255, rxload 1/255
  Encapsulation 802.1Q Virtual LAN, Vlan ID 1., loopback not set
  Keepalive set (10 sec)
  Full-duplex, 100Mb/s, 100BaseTX/FX
  ARP type: ARPA, ARP Timeout 04:00:00
  Last input 00:00:01, output 00:00:00, output hang never
  Last clearing of "show interface" counters never
  Input queue: 0/75/0/0 (size/max/drops/flushes); Total output drops: 0
  Queueing strategy: fifo
  Output queue: 0/40 (size/max)
  30 second input rate 8000 bits/sec, 8 packets/sec
  30 second output rate 14000 bits/sec, 10 packets/sec
    17360 packets input, 2236313 bytes
    Received 10191 broadcasts, 0 runts, 0 giants, 0 throttles
```

Gráfico 4.27 Tráfico generado en la zona 2

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.28 muestra la cantidad de tráfico que genera la zona 3 simulando el centro de distribución hacia la zona 2 que simula el centro nacional de control de energía.

```

R11#show interfaces FastEthernet0/1
FastEthernet0/1 is up, line protocol is up
  Hardware is Gt96k FE, address is c20b.3f0c.0001 (bia c20b.3f0c.0001)
  MTU 1500 bytes, BW 10000 Kbit/sec, DLY 1000 usec,
    reliability 255/255, txload 1/255, rxload 1/255
  Encapsulation 802.1Q Virtual LAN, Vlan ID 1., loopback not set
  Keepalive set (10 sec)
  Half-duplex, 10Mb/s, 100BaseTX/FX
  ARP type: ARPA, ARP Timeout 04:00:00
  Last input 00:00:00, output 00:00:01, output hang never
  Last clearing of "show interface" counters never
  Input queue: 0/75/0/0 (size/max/drops/flushes); Total output drops: 0
  Queueing strategy: fifo
  Output queue: 0/40 (size/max)
  30 second input rate 8000 bits/sec, 6 packets/sec
  30 second output rate 1000 bits/sec, 1 packets/sec
  11033 packets input, 1676379 bytes
  Received 3555 broadcasts, 0 runts, 0 giants, 0 throttles
  
```

Gráfico 4.28 Tráfico generado en la zona 3

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 4.4 presenta el tráfico generado por la simulación entre los centros de distribución de energía y el centro nacional de control de energía.

Descripción	Input [bps]	Output [bps]	Total [bps]
Guayas	8000	1000	9000
Pichincha	8000	7000	15000
CENACE	8000	14000	22000

Tabla 4.4 Tráfico generado a nivel nacional

Realizado por: Milton Ruiz

En base a los datos obtenidos se puede dimensionar que cada centro de distribución de cada provincia requiere la capacidad mínima de 64 kbps ofrecida por TRANSELECTRIC.

El centro nacional de control de energía debe soportar la transferencia de datos de todos los centros de distribución de las 24 provincias por lo que la capacidad requerida es de 264 kbps solicitando a TRANSELECTRIC la capacidad para transporte de datos de 5×64 kbps.

Debido a que la mayor cantidad de tráfico de datos se genera y se procesa en cada provincia y que los datos transmitidos desde los centros de distribución de energía al centro nacional de control de energía son datos de la potencia total consumida y datos de ciertas anomalías se ha calculado que un canal en WDM presenta capacidad suficiente para transportar todos los datos generados a nivel nacional.

4.2.1.3 Simulación capa aplicación

Se ha simulado la capa aplicación con el software de control LabView, en el cual se ha configurado la transmisión de información desde los medidores hasta los centros de distribución y desde los centros de distribución hasta el centro nacional de control de energía.

La transmisión de datos desde los medidores hacia el centro de distribución se lo realiza mediante el módulo arduino mega 2560 y el shield GSM-900. Se ha utilizado mensajes cortos de texto en los cuales se transmite la información de forma bidireccional.

El gráfico 4.29 presenta el panel frontal o panel del operador que simula el centro de distribución de cada provincia por ejemplo la Empresa Eléctrica Quito.



Gráfico 4.29 Panel de control medición avanzada

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.30 presenta el diagrama de bloques que es la programación gráfica de Labview.

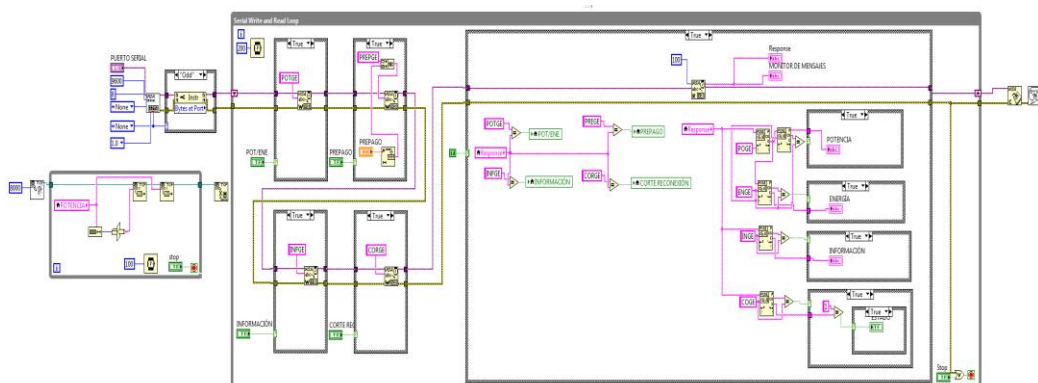


Gráfico 4.30 Programación Labview medición avanzada

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.31 presenta el panel frontal o panel del operador que simula el centro nacional de control de energía por ejemplo CENACE.

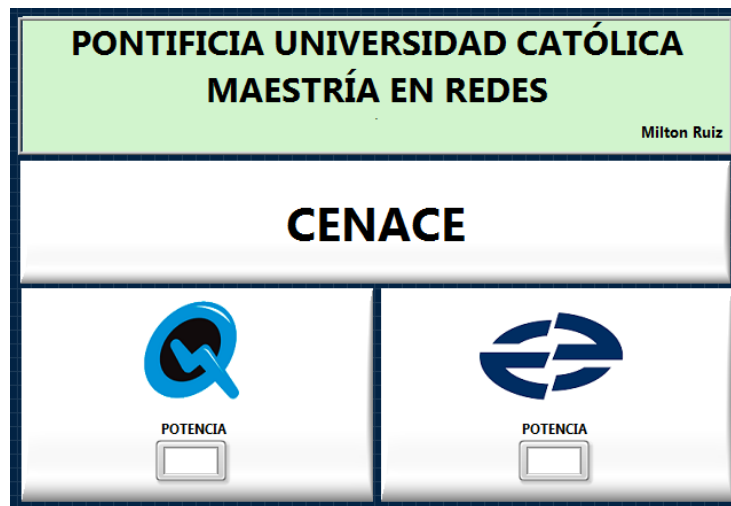


Gráfico 4.31 Panel de control nacional

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.32 muestra la programación de la aplicación servidor que simula el CENACE.

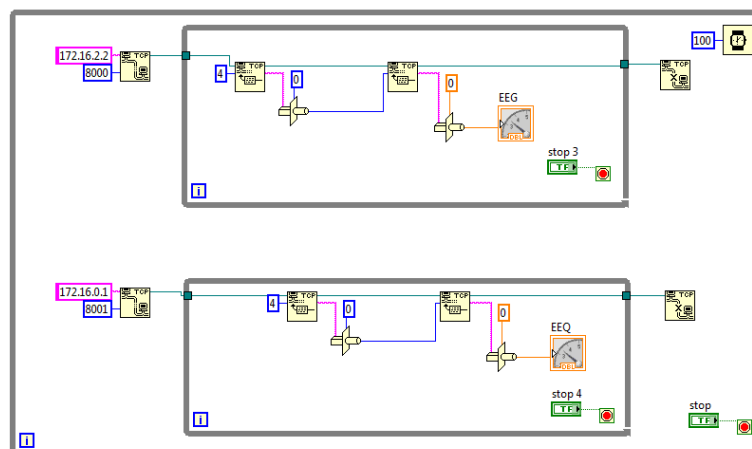


Gráfico 4.32 Programación Labview CENACE

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 4.33 muestra la programación de la aplicación cliente que simula el centro de distribución ubicado en cada provincia.

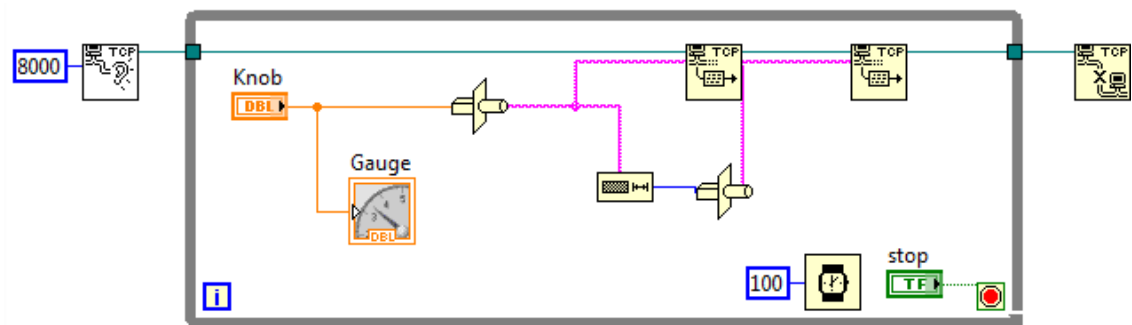


Gráfico 4.33 Aplicación cliente

Realizado por: Milton Ruiz

Existen dos aplicaciones denominadas cliente y servidor. El cliente envía la información y simula el centro de distribución, es necesario configurar el puerto en el cual trabaja la aplicación. El servidor recibe la información de todos los centros de distribución, es necesario configurar la dirección ip y el puerto en el cual trabaja la aplicación de cada centro de distribución.

La comunicación entre las aplicaciones cliente y servidor han sido realizadas en el software GNS3. GNS3 emular el comportamiento de los equipos de red y permite utilizar los puertos físicos de una computadora como puertos de los equipos de red ejemplo puertos de routers.

Es necesario para las comunicaciones entre los centros de distribución de energía y el centro nacional de control un canal óptico con la mínima capacidad ofrecida por TRANSELECTRIC que es de 64 kbps.

4.3 Análisis económico

El despliegue de la red eléctrica inteligente exige un gran costo de inversión inicial, el mismo que es amortizado por todos los actores del mercado eléctrico. Estos costos son compensados con la reducción de gastos de lecturas, gastos por pérdidas comerciales, cortes y reconexiones.

La tabla 4.5 presenta el número de abonados residenciales estimado hasta el año 2035. El cálculo ha sido realizado en base al crecimiento anual desde el año 2003 hasta el año 2015.

2016	2017	2018	2019	2020
3.415.246	3.471.092	3.526.939	3.582.785	3.638.631
2021	2022	2023	2024	2025
3.694.477	3.750.323	3.806.169	3.862.016	3.917.862
2026	2027	2028	2029	2030
3.973.708	4.029.554	4.085.400	4.141.246	4.197.092
2031	2032	2033	2034	2035
4.252.939	4.308.785	4.364.631	4.420.477	4.476.323

Tabla 4.5 Proyección de abonados al sector eléctrico residencial

Realizado por: Milton Ruiz

Las empresas Eléctrica Ambato, Regional Centro Norte S.A y Azogues C.A han estimado que el costo anual por la lectura de un medidor es de \$ 1,7469 dólares americanos. (Ruiz & Garcia, 2015)

La ecuación 4.1 se presenta el cálculo del costo anual por lecturas.

$$\text{Costo anual por lecturas} = \text{Número de medidores} * \text{Costo por lectura}$$

Ecuación 4.1 Costo anual por lecturas

La tabla 4.6 presenta el resultado del costo anual que las empresas eléctricas destinan para las lecturas de los medidores a nivel nacional.

2016	2017	2018	2019	2020
\$ 5.966.094	\$ 6.063.651	\$ 6.161.209	\$ 6.258.767	\$ 6.356.324
2021	2022	2023	2024	2025
\$ 6.453.882	\$ 6.551.440	\$ 6.648.997	\$ 6.746.555	\$ 6.844.113
2026	2027	2028	2029	2030
\$ 6.941.670	\$ 7.039.228	\$ 7.136.786	\$ 7.234.343	\$ 7.331.901
2031	2032	2033	2034	2035
\$ 7.429.459	\$ 7.527.016	\$ 7.624.574	\$ 7.722.132	\$ 7.819.689

Tabla 4.6 Costo estimado anual por lecturas en sitio de medidores

Realizado por: Milton Ruiz

El gasto mensual estimado por cortes y reconexiones asumido por las empresas encargadas de la comercialización es de USD\$7,69. La media de morosidad es de 16%, los datos han sido estimados por la empresa eléctrica de Ambato y la Empresa Eléctrica de Azogues C.A. Para calcular el costo anual por cortes y reconexiones del suministro eléctrico a nivel nacional multiplicamos el número de medidores a nivel

nacional por el costo anual por cortes y reconexiones y por el porcentaje de morosidad.

$$\text{Costo anual por C/R} = \# \text{ medidores} * \text{Costo por C/R mensual} * \text{año} * \% \text{ morosidad}$$

Ecuación 4.2 Costo anual por cortes y reconexión nacional

La tabla 4.7 presenta el costo anual estimado por cortes y reconexiones de medidores eléctricos a nivel nacional.

2016	2017	2018	2019	2020
\$ 50.425.427	\$ 51.249.984	\$ 52.074.542	\$ 52.899.099	\$ 53.723.657
2021	2022	2023	2024	2025
\$ 54.548.214	\$ 55.372.771	\$ 56.197.329	\$ 57.021.886	\$ 57.846.444
2026	2027	2028	2029	2030
\$ 58.671.001	\$ 59.495.559	\$ 60.320.116	\$ 61.144.674	\$ 61.969.231
2031	2032	2033	2034	2035
\$ 62.793.789	\$ 63.618.346	\$ 64.442.904	\$ 65.267.461	\$ 66.092.019

Tabla 4.7 Costo estimado anual por cortes y reconexiones

Realizado por: Milton Ruiz

El costo anual estimado que asumen las empresas eléctricas por pérdidas comerciales es del 8,79 %, datos proporcionados por la Empresa Eléctrica Azogues. La manipulación de medidores representa una pérdida mensual aproximada es de 150 kWh.

La tarifa eléctrica en el año 2015-2016 es de USD \$ 0,09 por kWh.

La ecuación 4.3 presenta los factores que intervienen en el cálculo de las pérdidas comerciales.

$$\text{CAPC} = \# \text{ medidores} * \% \text{ medidores manipulados} * \text{pérdida por manipulación} * \text{año} * \text{tarifa}$$

Ecuación 4.3 Costo anual por pérdidas comerciales

La tabla 4.8 presenta el costo anual desde el año 2016 hasta el año 2035 estimado por pérdidas comerciales.

2016	2017	2018	2019	2020
\$ 50.425.427	\$ 51.249.984	\$ 52.074.542	\$ 52.899.099	\$ 53.723.657
2021	2022	2023	2024	2025
\$ 54.548.214	\$ 55.372.771	\$ 56.197.329	\$ 57.021.886	\$ 57.846.444
2026	2027	2028	2029	2030
\$ 58.671.001	\$ 59.495.559	\$ 60.320.116	\$ 61.144.674	\$ 61.969.231
2031	2032	2033	2034	2035
\$ 62.793.789	\$ 63.618.346	\$ 64.442.904	\$ 65.267.461	\$ 66.092.019

Tabla 4.8 Costo anual estimado por pérdidas comerciales

Realizado por: Milton Ruiz

4.3.1 Cálculo de inversión del proyecto

Para calcular la inversión del proyecto se analizan los costos del minuto celular, costos por mega bit por segundo, costos de los equipos de comunicación y medidores.

La tabla 4.9 indica el porcentaje de inflación hasta el año 2035. La inflación ha sido tomada del banco central del Ecuador hasta el año 2018, a partir de ese año se ha calculado de acuerdo a la tendencia de la inflación.

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
5,16	3,55	4,47	5,1	2,72	3,36	3,9	3,66	3,49
2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
3,35	3,09	3,11	2,86	2,78	2,94	2,68	2,48	2,39
2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
2,30	2,20	2,11	1,99	1,90	1,77	1,63	1,55	1,45

Tabla 4.9 Inflación estimada hasta el año 2035

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 4.10 presenta el costo del minuto a celular tomado de la agencia de regulación y control de las telecomunicaciones a partir del año 2009 hasta el año 2016. A partir del año 2016 se ha calculado la tendencia del costo por minuto.

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
\$ 0,12	\$ 0,15	\$ 0,13	\$ 0,15	\$ 0,16	\$ 0,16	\$ 0,07	\$ 0,07	\$ 0,09
2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
\$ 0,09	\$ 0,08	\$ 0,08	\$ 0,07	\$ 0,07	\$ 0,06	\$ 0,06	\$ 0,05	\$ 0,05
2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05	\$ 0,05

Tabla 4.10 Costo por minuto a celular

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 4.11 presenta el costo por Mbps en base a los costos de TELCONET.SA corporativos registrados desde el año 2013 hasta el año 2016. A partir de este año se ha calculado de acuerdo a la tendencia de los costos por Mbps.

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
\$ 32,85	\$ 32,85	\$ 31,87	\$ 31,87	\$ 26,56	\$ 26,56	\$ 25,39	\$ 25,39	\$ 23,24
2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
\$ 23,24	\$ 21,13	\$ 21,13	\$ 19,05	\$ 17,73	\$ 16,59	\$ 15,56	\$ 14,88	\$ 13,58
2031	2032	2033	2034	2035				
\$ 12,38	\$ 11,13	\$ 10,05	\$ 8,80	\$ 7,73				

Tabla 4.11 Costo por Mbps

La evaluación financiera es realizada durante 20 periodos en los cuales se calculan los ingresos y egresos anuales, permitiendo evaluar los indicadores financieros.

La tabla 4.12 detalla los ahorros generados al utilizar medición avanzada.

Año	Periodo	Lecturas	Corte reconexión	Fraude	Total ingresos
2016	1	\$ 5.966.094	\$ 50.425.427	\$ 48.632.422	\$ 105.023.942
2017	2	\$ 6.063.651	\$ 51.249.984	\$ 49.427.661	\$ 106.741.296
2018	3	\$ 6.161.209	\$ 52.074.542	\$ 50.222.899	\$ 108.458.649
2019	4	\$ 6.258.767	\$ 52.899.099	\$ 51.018.137	\$ 110.176.003
2020	5	\$ 6.356.324	\$ 53.723.657	\$ 51.813.375	\$ 111.893.356
2021	6	\$ 6.453.882	\$ 54.548.214	\$ 52.608.614	\$ 113.610.709
2022	7	\$ 6.551.440	\$ 55.372.771	\$ 53.403.852	\$ 115.328.063
2023	8	\$ 6.648.997	\$ 56.197.329	\$ 54.199.090	\$ 117.045.416
2024	9	\$ 6.746.555	\$ 57.021.886	\$ 54.994.328	\$ 118.762.770
2025	10	\$ 6.844.113	\$ 57.846.444	\$ 55.789.567	\$ 120.480.123
2026	11	\$ 6.941.670	\$ 58.671.001	\$ 56.584.805	\$ 122.197.476
2027	12	\$ 7.039.228	\$ 59.495.559	\$ 57.380.043	\$ 123.914.830
2028	13	\$ 7.136.786	\$ 60.320.116	\$ 58.175.281	\$ 125.632.183
2029	14	\$ 7.234.343	\$ 61.144.674	\$ 58.970.520	\$ 127.349.537
2030	15	\$ 7.331.901	\$ 61.969.231	\$ 59.765.758	\$ 129.066.890
2031	16	\$ 7.429.459	\$ 62.793.789	\$ 60.560.996	\$ 130.784.243
2032	17	\$ 7.527.016	\$ 63.618.346	\$ 61.356.234	\$ 132.501.597
2033	18	\$ 7.624.574	\$ 63.618.346	\$ 62.151.473	\$ 133.394.393
2034	19	\$ 7.722.132	\$ 65.267.461	\$ 62.946.711	\$ 135.936.304
2035	20	\$ 7.819.689	\$ 66.092.019	\$ 63.741.949	\$ 137.653.657

Tabla 4.12 Ingresos por medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 4.13 presenta los costos del arrendamiento de telecomunicaciones celulares, arrendamiento de enlaces de datos, equipos de infraestructura de red y medidores eléctricos inteligentes. Los costos son transformados a egresos anuales durante los veinte periodos de análisis.

Año	Periodo	Medidores	Infraestructura	Telecomunicaciones celulares	Enlaces	Total egresos
2016	1	\$ 853.811.542	\$ 2.496.000	\$ 604.931	\$ 9.179	\$ 856.921.651
2017	2	\$ 13.961.542		\$ 707.554	\$ 7.649	\$ 14.676.745
2018	3	\$ 13.961.542		\$ 791.400	\$ 7.649	\$ 14.760.591
2019	4	\$ 13.961.542		\$ 699.692	\$ 7.314	\$ 14.668.548
2020	5	\$ 13.961.542		\$ 721.654	\$ 7.312	\$ 14.690.508
2021	6	\$ 13.961.542		\$ 690.440	\$ 6.692	\$ 14.658.674
2022	7	\$ 13.961.542		\$ 624.972	\$ 6.692	\$ 14.593.205
2023	8	\$ 13.961.542		\$ 526.442	\$ 6.084	\$ 14.494.068
2024	9	\$ 13.961.542		\$ 534.166	\$ 6.084	\$ 14.501.792
2025	10	\$ 13.961.542		\$ 431.814	\$ 5.486	\$ 14.398.842
2026	11	\$ 13.961.542		\$ 437.969	\$ 5.106	\$ 14.404.616
2027	12	\$ 13.961.542		\$ 444.124	\$ 4.779	\$ 14.410.445
2028	13	\$ 13.961.542		\$ 450.280	\$ 4.481	\$ 14.416.302
2029	14	\$ 13.961.542		\$ 456.435	\$ 4.284	\$ 14.422.261
2030	15	\$ 13.961.542		\$ 462.590	\$ 3.911	\$ 14.428.042
2031	16	\$ 13.961.542		\$ 468.745	\$ 3.566	\$ 14.433.853
2032	17	\$ 13.961.542		\$ 474.900	\$ 3.205	\$ 14.439.647

2033	18	\$ 13.961.542		\$ 481.056	\$ 2.893	\$ 14.445.490
2034	19	\$ 13.961.542		\$ 487.211	\$ 2.533	\$ 14.451.285
2035	20	\$ 13.961.542		\$ 493.366	\$ 2.225	\$ 14.457.133

Tabla 4.13 Egresos por medición inteligente

Realizado por: Milton Ruiz

El flujo de efectivo determina cuánto dinero se conserva después de los gastos. Se calcula al restar de los ingresos los egresos anuales durante los veinte periodos de análisis. La tabla 4.14 presenta el flujo de efectivo, al final del periodo de análisis el flujo de efectivo resultante es de \$ 1.293.277.740.

Año	Periodo	Flujo efectivo
2016	1	(\$ 751.897.708)
2017	2	\$ 92.064.551
2018	3	\$ 93.698.059
2019	4	\$ 95.507.455
2020	5	\$ 97.202.848
2021	6	\$ 98.952.036
2022	7	\$ 100.734.858
2023	8	\$ 102.551.349
2024	9	\$ 104.260.978
2025	10	\$ 106.081.281
2026	11	\$ 107.792.860

2027	12	\$ 109.504.385
2028	13	\$ 111.215.881
2029	14	\$ 112.927.276
2030	15	\$ 114.638.848
2031	16	\$ 116.350.391
2032	17	\$ 118.061.950
2033	18	\$ 118.948.902
2034	19	\$ 121.485.018
2035	20	\$ 123.196.524
Total		\$ 1.293.277.740

Tabla 4.14 Flujo efectivo

Realizado por: Milton Ruiz

Al ser un proyecto de inversión los ingresos anuales futuros deben ser penalizados con un 5% que representa el interés que un banco puede pagar por la inversión del dinero y un 3% por la depreciación del dinero, las tasas de depreciación son determinadas por el Banco Central del Ecuador. Si sumamos las penalidades la tasa de actualización debe ser del 8%.

$$(1+t)^{-n}$$

Ecuación 4.4 Tasa de actualización

Donde,

t corresponde al porcentaje de penalización anual.

n corresponde al periodo.

La tabla 4.15 presenta los ingresos y egresos anuales futuros actualizados al presente.

Tasa $(1+t)^{-n}$	Ingresos Actualizados	Egresos Actualizados
0,93	\$ 97.244.391	\$ 793.445.973
0,86	\$ 91.513.457	\$ 12.582.943
0,79	\$ 86.097.973	\$ 11.717.433
0,74	\$ 80.982.651	\$ 10.781.820
0,68	\$ 76.152.738	\$ 9.998.113
0,63	\$ 71.594.018	\$ 9.237.451
0,58	\$ 67.292.817	\$ 8.514.995
0,54	\$ 63.235.996	\$ 7.830.694
0,50	\$ 59.410.953	\$ 7.254.506
0,46	\$ 55.805.608	\$ 6.669.450
0,43	\$ 52.408.403	\$ 6.177.893
0,40	\$ 49.208.284	\$ 5.722.586
0,37	\$ 46.194.693	\$ 5.300.844
0,34	\$ 43.357.556	\$ 4.910.218
0,32	\$ 40.687.266	\$ 4.548.321
0,29	\$ 38.174.674	\$ 4.213.104
0,27	\$ 35.811.068	\$ 3.902.588
0,25	\$ 33.381.817	\$ 3.614.970
0,23	\$ 31.498.081	\$ 3.348.537
0,21	\$ 29.533.345	\$ 3.101.752

Tabla 4.15 Ingresos y egresos actualizados.

Realizado por: Milton Ruiz

Para tomar una decisión respecto a la factibilidad del proyecto se debe verificar los resultados de los indicadores financieros, para lo cual el VAN debe ser mayor que cero, TIR mayor o igual que la tasa de interés y la relación beneficio-costo mayor o igual a cero.

La tabla 4.16 presenta el resultado de los indicadores financieros.

Indicador	Valor	Decisión
VAN	\$ 226.711.599	Aceptable
TIR	12%	Aceptable
B/C	1,25	Aceptable
Payback [años]	9	Aceptable

Tabla 4.16 Indicadores de factibilidad financiera

Realizado por: Milton Ruiz

4.4 Análisis legal

4.4.1 Consideraciones de seguridad y privacidad

Los datos generados por medición avanzada deben ser tratados bajo reglas de seguridad y privacidad. El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos de América publicó en el año 2010 un informe en el cual identifica dos categorías relacionados por los problemas de privacidad. La primera categoría demuestra que los medidores inteligentes revelarán las actividades realizadas en el interior del hogar. La segunda categoría son los temores de las medidas de seguridad cibernética en torno a la transmisión digital de datos de los medidores inteligentes, ya que pueden ser expuestas a un mal uso por usuarios autorizados y no autorizados. (Kumar & Hussain, 2014)

4.4.2 Mayor potencial de robo o violación de datos

Las tecnologías inalámbricas tienden a desempeñar un papel destacado en el transporte de información debido a que su implementación es menos costosa, el principal inconveniente es la seguridad. De acuerdo con el departamento de energía, una red de servicios públicos tiene cuatro niveles. El primer nivel núcleo o backbone, ya que es la ruta primaria hacia el centro de datos de los servicios públicos. El segundo nivel es el backhaul de distribución, es el punto de agregación de datos del vecindario. El tercer nivel es el punto de acceso, típicamente es el medidor inteligente. El cuarto nivel es la HAN o red doméstica.

Los datos del consumo eléctrico que se envían través de una infraestructura de red inteligente al estar almacenados en muchos sitios son más vulnerables a la interceptación sin autorización. El movimiento de la información también aumenta la posibilidad de que sea sustraída por terceros mientras está en tránsito, sobre todo cuando se viaja a través de una red inalámbrica o a través de componentes de comunicaciones que utilizan protecciones de seguridad obsoletas.

4.4.3 Garantías constitucionales

A continuación se analizan los artículos vigentes en la Constitución de la República del Ecuador del año 2008 que inciden en el sector de las telecomunicaciones.(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008)

Capítulo tercero

Derechos de las personas y grupos de atención prioritaria

Sección novena

Personas usuarias y consumidoras

Art. 52.- Las personas tienen derecho a disponer de bienes y servicios de óptima calidad y a elegirlos con libertad, así como a una información precisa y no engañosa sobre su contenido y características.

Art. 54.- Las personas o entidades que presten servicios públicos o que produzcan o comercialicen bienes de consumo, serán responsables civil y penalmente por la deficiente prestación del servicio, por la calidad defectuosa del producto, o cuando

sus condiciones no estén de acuerdo con la publicidad efectuada o con la descripción que incorpore...

Capítulo sexto

Derechos de libertad

Art. 66.- Se reconoce y garantizará a las personas:

19. El derecho a la protección de datos de carácter personal, que incluye el acceso y la decisión sobre información y datos de este carácter, así como su correspondiente protección. La recolección, archivo, procesamiento, distribución o difusión de estos datos o información requerirán la autorización del titular o el mandato de la ley...

25. El derecho a acceder a bienes y servicios públicos y privados de calidad, con eficiencia, eficacia y buen trato, así como a recibir información adecuada y veraz sobre su contenido y características...

5 CONCLUSIONES

- La infraestructura de telecomunicaciones para la transmisión de datos en redes eléctricas inteligentes ha sido diseñada bajo una arquitectura distribuida y escalable empleando medios alámbricos e inalámbricos considerando parámetros de cobertura, disponibilidad, seguridad, capacidad y rentabilidad.
- El uso de infraestructura celular para el transporte de datos desde los medidores inteligentes de energía eléctrica hasta las empresas de distribución permite ahorrar costos debido a que no es necesario la implementación de infraestructura adicional en comparación con otras tecnologías inalámbricas como WiMax o RFID y se evita la interferencia inalámbrica ya que se usan frecuencias licenciadas.
- Los datos de lecturas por medición avanzada pueden ser transmitidos mediante mensajes cortos de texto o mediante llamada celular. Los SMS son un servicio complementario de la telefonía celular y para la transmisión de datos no requiere la asignación de un canal, la desventaja es el elevado costo del servicio. Las llamadas celulares son menos costosas pero implica que cada radio base debe dar el canal a cada medidor para la transferencia de información.
- Se concluye que el tráfico generado por la implementación de medición avanzada en redes eléctricas inteligentes presenta un mínimo impacto a la

infraestructura de telecomunicaciones celulares, al igual que a los proveedores de servicios de datos.

- La fibra óptica implementada por TRANSELECTRIC S.A a nivel nacional permite las comunicaciones entre todos los actores del sector eléctrico ya que se encuentra instalada en las subestaciones, plantas de generación, empresas de control de producción y transporte de energía eléctrica.
- Comunicaciones seguras son indispensables en la transmisión de información por tal motivo la implementación de encriptación permite que solo los actores de la comunicación que tengan el cifrado de seguridad puedan conocer el contenido de los mensajes transmitidos.
- DMVPN brinda alta disponibilidad creando una malla completa entre todos los actores de la red inteligente, al mismo tiempo brinda seguridad al cifrar la información que es enviada a través de un túnel al destino. La redundancia de proveedores de datos permite realizar la recuperación ante desastres manteniendo las comunicaciones activas en caso de fallas.
- La distancia máxima de transmisión depende de la potencia a la salida del transmisor, la dispersión cromática, el coeficiente de atenuación y la sensibilidad del receptor por lo tanto a medida que la distancia aumenta es necesario modificar la ganancia de los amplificadores ópticos y regular la compensación permitiendo la recepción de datos fiables.

- El ancho de banda y la capacidad del canal disponible en un enlace de fibra óptica depende de la distancia, a menor distancia es mayor el ancho de banda mientras que a mayor distancia se reduce el ancho de banda y por ende la capacidad del canal. Al utilizar longitudes de onda de 1550 nm la atenuación se reduce a la mitad respecto a longitudes de onda a 1310 nm.

- Los resultados financieros arrojan índices positivos permitiendo concluir que el proyecto es viable y factible de realizar tanto técnica como económicamente.

6 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la creación de un marco regulatorio para redes eléctricas inteligentes debido a que no existe reglamentos en la constitución ni en el Instituto Ecuatoriano de Normalización sobre los actores de las redes eléctricas inteligentes.
- Para seleccionar el tipo de servidor de almacenamiento de información se debe tomar en cuenta que no todos los datos transmitidos por medición avanzada son datos almacenables debido a que existen delimitadores que indican la característica medida.
- Al ser un proyecto nacional se recomienda la creación de planes de reemplazo de equipos de medición avanzada, control y telecomunicaciones. Permitiendo la transición ordenada a una red eléctrica inteligente evitando cortes prolongados del suministro eléctrico.
- Al ser un proyecto público se recomienda la creación de un modelo de negocio con la operadora nacional CNT permitiendo la reducción en los costos de arrendamiento de la infraestructura de telecomunicaciones en comparación con las operadoras celulares privadas.

7 BIBLIOGRAFÍA

Abdelnaby, M. (2012a). Dispersión cromática. doi:10.1007/978-3-642-03703-0

Abdelnaby, M. (2012b). Dispersion modal. Retrieved May 3, 2016, from <http://fobasics.blogspot.com/2012/07/dispersion.html>

Abdelnaby, M. (2012c). Dispersión por modo de polarización. Retrieved May 3, 2016, from <http://fobasics.blogspot.com/2012/07/polarization-mode-dispersion.html>

Abdelnaby, M. (2012d). Spectral Attenuation Various Fiber Types. Retrieved May 3, 2016, from <http://fobasics.blogspot.com/2012/07/fiber-attenuation.html>

Arcotel. (2015). *Radiobases por prestador y tecnología*. Retrieved from <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>

Berger, L. T., & Iniewski, K. (2012). *“Smart Grid Applications, Communications, and Security.”* New Jersey: John Wiley. Retrieved from <http://books.google.com.ec/books?id=HPEbtwAACAAJ>

Celec-EP. (2012). Mapa de la red nacional de fibra óptica. Retrieved December 10, 2015, from https://www.celec.gob.ec/transelectric/index.php?option=com_content&view=article&id=124&Itemid=289&lang=es

Comteq, D. (2015). OPGW, 1–2. Retrieved from <http://www.marga.com.ar/~marga/6677/tp2/otros/opgw>

Constitución de la Republica del Ecuador. (2008). Constitución de la Republica del Ecuador, 121.

- Ekanayake, J., & Liyanage, K. (2012). *SMART GRID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS*. (Wiley, Ed.) (First edit). New Delhi.
- El mercurio. (2014, February 10). En 2016 operarán 8 nuevos proyectos hidroeléctricos. Retrieved July 30, 2015, from <http://www.elmercurio.com.ec/417607-en-2016-operaran-8-nuevos-proyectos-hidroelectricos/#.VgxQW5evuKx>
- Enel. (2015). Electronic meter - Enel.com. Retrieved August 1, 2015, from <https://www.enel.it/it-it>
- Enerzuul. (2011). Situación actual del Smart Metering en España. Retrieved August 1, 2015, from <http://www.enerzuul.es/?p=781>
- García, F., Garcés, P., & Atiaja, R. (2012). Panorama General del Sector Eléctrico en América Latina y el Caribe. *OLADE*, 31–41. Retrieved from [http://temp3.olade.org/sites/default/files/publicaciones/Documento Tecnico ELEC.pdf](http://temp3.olade.org/sites/default/files/publicaciones/Documento_Tecnico_ELEC.pdf)
- Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529–539. doi:10.1109/TII.2011.2166794
- Hossain, E., Han, Z., & Poor, V. (2012). *Smart Grid Communications and Networking*. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- ITTAY, F. (2008). Reflexión y refracción. Retrieved May 4, 2016, from <http://fittaydelrulz.blogspot.com/>

ITU-T. G.959.1 (2012).

Kumar, V., & Hussain, M. (2014). Secure communication for advance metering infrastructure in smart grid.

Meadows, J. (2010). *Smart from the start*. Retrieved from <http://www.pwc.com/gx/en/utilities/energy-supply/pdf/managing-smart-grid-programmes.pdf>

MEER. (2014). Estructura de comunicaciones AMR en Guayaquil-Ecuador - RFID. Retrieved from <http://www.energia.gob.ec/>

Millan, R. (2007). Coarse Wavelength Division Multiplexing, 20071723. doi:10.1201/9781420018691

Moreton, M. (2011). ftx. Retrieved May 5, 2016, from <https://martinmoreton.wordpress.com/2011/11/26/fttc-la-mejor-solucion-a-todos-nuestros-problemas/>

Parlamento Europeo. (2009). DIRECTIVA 2009/28/CE, 2008(2), 30–32. Retrieved from https://www.iberdrola.es/02sica/gc/prod/es_ES/hogares/docs/directivas_PE.pdf

PRYSMIAN. (2007). Cable óptico dieléctrico ADSS.

Reid, I. E., & Stevens, H. A. (2012). *Smart meters and the smart grid: privacy and cybersecurity considerations*. New York: Nova Science Publishers.

Ruiz, M., & Garcia, E. (2015). *INTEROPERABILIDAD ENTRE MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL*. Politécnica Salesiana.

- Senplades. (2009). *PLAN NACIONAL PARA EL BUEN VIVIR*. Retrieved from http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Plan_Nacional_para_el_Buen_Vivir.pdf
- Sgic. (2013). NIST Smart Grid Conceptual Model. Retrieved August 5, 2015, from <https://www.sgiclearinghouse.org/ConceptualModel>
- Stallings, W. (2002). *Wireless Communications and Networks* (Second Edi). Pearson.
- Tektronix. (2001). SONET Telecommunications Standard, 14–19. Retrieved from <http://www.tek.com/document/primer/sonet-telecommunications-standard-primer>
- Weranga, K. S. K., Kumarawadu, S., & Chandima, D. P. (2014). *Smart Metering Design and Applications*. Sri Lanka: Springer. doi:10.1007/978-981-4451-82-6
- Wikipedia. (2016). Refracción y reflexión. Retrieved May 5, 2016, from https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexión_interna_total
- Zhou, J., Qingyang Hu, R., & Qian, Y. (2012). Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(9), 1632–1642. doi:10.1109/TPDS.2012.53

8 ANEXOS

La tabla 8.1 presenta las configuraciones en routers del proveedor de servicios carrier 1.

Nombre	Interfaz	IP	Loopback 0	OSPF neighbor	Vecino
R1	Fa 0/0	10.0.0.25/30	1.1.1.1/24	2.2.2.2	10.0.0.26/30
R1	Fa 0/1	10.0.0.1/29			
R6	Fa 0/0	10.0.0.26/30	2.2.2.2/24	1.1.1.1	10.0.0.25/30
R6	Fa 0/1	10.0.0.29/30		3.3.3.3	10.0.0.30/30
R6	Fa 1/0	10.0.0.9/29			
R11	Fa 0/0	10.0.0.30/30	3.3.3.3/24	2.2.2.2	10.0.0.29/30
R11	Fa 0/1	10.0.0.17/29			

Tabla 8.1 Configuración carrier 1

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.2 presenta el reenvío mpls del R1.

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	Untagged	2.2.2.2/32	0	Fa0/0	10.0.0.26
17	17	3.3.3.3/32	0	Fa0/0	10.0.0.26
18	Pop tag	10.0.0.8/29	0	Fa0/0	10.0.0.26

19	Pop tag	10.0.0.28/30	0	Fa0/0	10.0.0.26
20	19	10.0.0.16/29	0	Fa0/0	10.0.0.26

Tabla 8.2 Mpls R1

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.3 presenta los vecinos del protocolo ospf del R1.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
2.2.2.2	1	FULL/DR	10.0.0.26	FastEthernet0/0

Tabla 8.3 Vecinos ospf R1

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.4 presenta el reenvió mpls del R6.

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	Untagged	1.1.1.1/32	0	Fa0/0	10.0.0.25
17	Untagged	3.3.3.3/32	0	Fa0/1	10.0.0.30
18	Pop tag	10.0.0.0/29	467470	Fa0/0	10.0.0.25
19	Pop tag	10.0.0.16/30	681254	Fa0/1	10.0.0.30

Tabla 8.4 Mpls R6

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.5 presenta los vecinos del protocolo ospf del R6.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
3.3.3.3	1	FULL/DR	10.0.0.30	FastEthernet0/1
1.1.1.1	1	FULL/DR	10.0.0.25	FastEthernet0/0

Tabla 8.5 Vecinos ospf R6

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.6 presenta el reenvío mpls del R11.

Local tag	VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes switched	Outgoing interface	Next Hop
16	16	1.1.1.1/32	0	Fa0/0	10.0.0.29
17	Untagged	2.2.2.2/32	0	Fa0/0	10.0.0.29
18	Pop tag	10.0.0.8/29	0	Fa0/0	10.0.0.29
19	18	10.0.0.0/29	0	Fa0/0	10.0.0.29
29	Pop tag	10.0.0.24/30	0	Fa0/0	10.0.0.29

Tabla 8.6 Mpls R11

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.7 presenta los vecinos del protocolo ospf del R11.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
2.2.2.2	1	FULL/DR	10.0.0.29	FastEthernet0/0

Tabla 8.7 Vecinos ospf R11

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.8 presenta las configuraciones en routers del proveedor de servicios carrier 1.

Nombre	Interfaz	IP	Loopback 0	Vecino
R2	Fa 0/0	192.168.0.25/30	4.4.4.4/24	192.168.0.26/30
R2	Fa 0/1	192.168.0.1/29		
R7	Fa 0/0	192.168.0.26/30	5.5.5.5/24	192.168.0.25/30
R7	Fa 0/1	192.168.0.29/30		192.168.0.30/30
R7	Fa 1/0	192.168.0.9/29		
R12	Fa 0/0	192.168.0.30/30	6.6.6.6/24	192.168.0.29/30
R12	Fa 0/1	192.168.0.17/29		

Tabla 8.8 Configuración carrier 2.

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.9 presenta el reenvío mpls del R2.

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	Untagged	5.5.5.5/32	0	Fa0/0	192.168.0.26
17	17	6.6.6.6/32	0	Fa0/0	192.168.0.26
18	Pop tag	192.168.0.8/29	0	Fa0/0	192.168.0.26
19	Pop tag	192.168.0.28/30	0	Fa0/0	192.168.0.26
20	19	192.168.0.16/29	0	Fa0/0	192.168.0.26

Tabla 8.8.9 Mpls R2

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.10 presenta los vecinos del protocolo ospf del R2.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
5.5.5.5	1	FULL/DR	192.168.0.26	FastEthernet0/0

Tabla 8.10 Vecinos ospf R2

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.11 presenta el reenvío mpls del R7.

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	Untagged	4.4.4.4/32	0	Fa0/0	192.168.0.25

17	Untagged	6.6.6.6/32	0	Fa0/1	192.168.0.30
18	Pop tag	192.168.0.0/29	498454	Fa0/0	192.168.0.25
19	Pop tag	192.168.0.16/29	492650	Fa0/1	192.168.0.30

Tabla 8.11 Mpls R7

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.12 presenta los vecinos del protocolo ospf del R7.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
6.6.6.6	1	FULL/DR	192.168.0.30	FastEthernet0/1
4.4.4.4	1	FULL/DR	192.168.0.25	FastEthernet0/0

Tabla 8.12 Vecinos ospf R7

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.13 presenta el reenvió mpls del R12.

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	16	4.4.4.4/32	0	Fa0/0	192.168.0.29
17	Untagged	5.5.5.5/32	0	Fa0/0	192.168.0.29

18	Pop tag	192.168.0.8/29	0	Fa0/0	192.168.0.29
19	18	192.168.0.0/29	0	Fa0/0	192.168.0.29
29	Pop tag	192.168.0.24/30	0	Fa0/0	192.168.0.29

Tabla 8.13 Mpls R12

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.14 presenta los vecinos del protocolo ospf del R7.

Neighbor ID	Pri	State	Address	Interface
5.5.5.5	1	FULL/DR	192.168.0.29	FastEthernet0/0

Tabla 8.14 Vecinos ospf R7

Realizado por: Milton Ruiz

FRONTERA EMPRESA

La tabla 8.15 presenta la configuración de HSRP en R3 ubicado en la zona 1.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	150	P	Active	local	172.16.0.251	172.16.0.254

Tabla 8.15 HSRP en router R3

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.16 presenta la configuración del balance de carga configurado en R3.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Active	172.16.0.250	local	172.16.0.251
Fa0/0.1	1	1	-	Active	0007.b400.0101	local	-
Fa0/0.1	1	2	-	Listen	0007.b400.0102	172.16.0.251	-

Tabla 8.16 GLBP en router R3

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.17 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R3.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
4	10.1.1.4	Tu100	11	02:29:16	132	792	0	3
3	10.1.1.2	Tu100	6	02:29:21	194	1164	0	3
2	10.1.1.3	Tu100	7	02:29:23	270	1620	0	3
1	10.1.1.5	Tu100	9	02:29:23	222	1332	0	6
0	10.1.1.6	Tu100	14	02:29:51	970	5000	0	3

Tabla 8.17 Vecinos EIGRP proceso 100 en R3

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.18 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R3.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.2.2.1	Tu200	13	02:37:38	212	1908	0	22

Tabla 8.18 Vecinos EIGRP proceso 200 en R3.

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.19 presenta la configuración de HSRP en R4 ubicado en la zona 1.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	100		Standby	172.16.0.252	local	172.16.0.254

Tabla 8.19 HSRP en router R4

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.20 presenta la configuración del balance de carga configurado en R4.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Standby	172.16.0.250	172.16.0.252	local
Fa0/0.1	1	1	-	Listen	0007.b400.0101	172.16.0.252	-
Fa0/0.1	1	2	-	Active	0007.b400.0102	local	-

Tabla 8.20 GLBP en router R4

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.21 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R4.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.1.1.1	Tu100	10	00:11:54	112	1008	0	28

Tabla 8.21 Vecinos EIGRP proceso 100 en R4

La tabla 8.22 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R4.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.2.2.1	Tu200	12	02:40:21	471	2826	0	27

Tabla 8.22 Vecinos EIGRP proceso 200 en R4

La tabla 8.23 presenta el establecimiento de seguridades entre los nodos.

SPI	Prot	Local Address	M	Type
0513D79E	ESP	10.0.0.3	*	IKE-based IPsec SA
BAB8E8EE	ESP	192.168.0.3	*	IKE-based IPsec SA

Tabla 8.23 Establecimiento de seguridades ipsec

Realizado por: Milton Ruiz

Z2

La tabla 8.24 presenta la configuración de HSRP en R8 ubicado en la zona 2.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	150	P	Active	local	172.16.1.251	172.16.1.254

Tabla 8.24 HSRP en router R8

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.25 presenta la configuración del balance de carga configurado en R8.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Active	172.16.1.250	local	172.16.1.251
Fa0/0.1	1	1	-	Active	0007.b400.0101	local	-
Fa0/0.1	1	2	-	Listen	0007.b400.0102	172.16.1.251	-

Tabla 8.25 GLBP en router R8

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.26 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R8.

H	Address	Interface	Hold Uptime	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
---	---------	-----------	-------------	--------	-----------	-----	-------	---------

			(sec)					
0	10.1.1.1	Tu100	14	00:14:25	848	5000	0	28

Tabla 8.26 Vecinos EIGRP proceso 100 en R8

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.27 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R8.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.2.2.1	Tu200	14	02:42:15	559	3354	0	23

Tabla 8.27 Vecinos EIGRP proceso 200 en R8

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.28 presenta la configuración de HSRP en R9 ubicado en la zona 2.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	100		Standby	172.16.1.252	local	172.16.1.254

Tabla 8.28 HSRP en router R9

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.29 presenta la configuración del balance de carga configurado en R9.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Standby	172.16.1.250	172.16.1.252	local
Fa0/0.1	1	1	-	Listen	0007.b400.0101	172.16.1.252	-
Fa0/0.1	1	2	-	Active	0007.b400.0102	local	-

Tabla 8.29 GLBP en router R9

La tabla 8.30 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R9.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.1.1.1	Tu100	14	00:16:59	1065	5000	0	28

Tabla 8.30 Vecinos EIGRP proceso 100 en R9

La tabla 8.31 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R9.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.2.2.1	Tu200	7	02:44:59	809	4854	0	23

Tabla 8.31 Vecinos EIGRP proceso 200 en R9

Realizado por: Milton Ruiz

Z3

La tabla 8.32 presenta la configuración de HSRP en R13 ubicado en la zona 3.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	150	P	Active	local	172.16.2.251	172.16.2.254

Tabla 8.32 HSRP en router R13

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.33 presenta la configuración del balance de carga configurado en R13.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Active	172.16.2.250	local	172.16.2.251
Fa0/0.1	1	1	-	Active	0007.b400.0101	local	-
Fa0/0.1	1	2	-	Listen	0007.b400.0102	172.16.2.251	-

Tabla 8.33 GLBP en router R13

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.34 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R13.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.1.1.1	Tu100	13	00:43:21	168	1512	0	28

Tabla 8.8.34 Vecinos EIGRP proceso 100 en R13

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.35 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R13.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.2.2.1	Tu200	8	03:11:55	77	462	0	25

Tabla 8.35 Vecinos EIGRP proceso 200 en R13

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.36 presenta la configuración de HSRP en R14 ubicado en la zona 3.

Interface	Grp	Pri	P	State	Active	Standby	Virtual IP
Fa0/0.1	1	100		Standby	172.16.2.252	local	172.16.2.254

Tabla 8.36 HSRP en router R14

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.37 presenta la configuración del balance de carga configurado en R14.

Interface	Grp	Fwd	Pri	State	Address	Active router	Standby router
Fa0/0.1	1	-	100	Standby	172.16.2.250	172.16.2.252	local
Fa0/0.1	1	1	-	Listen	0007.b400.0101	172.16.2.252	-
Fa0/0.1	1	2	-	Active	0007.b400.0102	local	-

Tabla 8.8.37 GLBP en router R14

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.38 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 100 en router R14.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
0	10.1.1.1	Tu100	13	00:36:31	960	5000	0	28

Tabla 8.38 Vecinos EIGRP proceso 100 en R14

Realizado por: Milton Ruiz

La tabla 8.39 presenta los vecinos del protocolo eigrp del proceso 200 en router R14.

H	Address	Interface	Hold Uptime (sec)	Uptime	SRTT (ms)	RTO	Q Cnt	Seq Num
4	10.2.2.2	Tu200	14	03:08:40	249	1494	0	7
3	10.2.2.3	Tu200	10	03:08:49	230	1380	0	10

2	10.2.2.4	Tu200	10	03:08:49	369	2214	0	12
1	10.2.2.5	Tu200	11	03:08:49	261	1566	0	9
0	10.2.2.6	Tu200	11	03:09:15	407	2442	0	11

Tabla 8.39 Vecinos EIGRP proceso 200 en R14

Realizado por: Milton Ruiz

El gráfico 8.1 muestra la señal de recepción en el espectro eléctrico después 100 km.

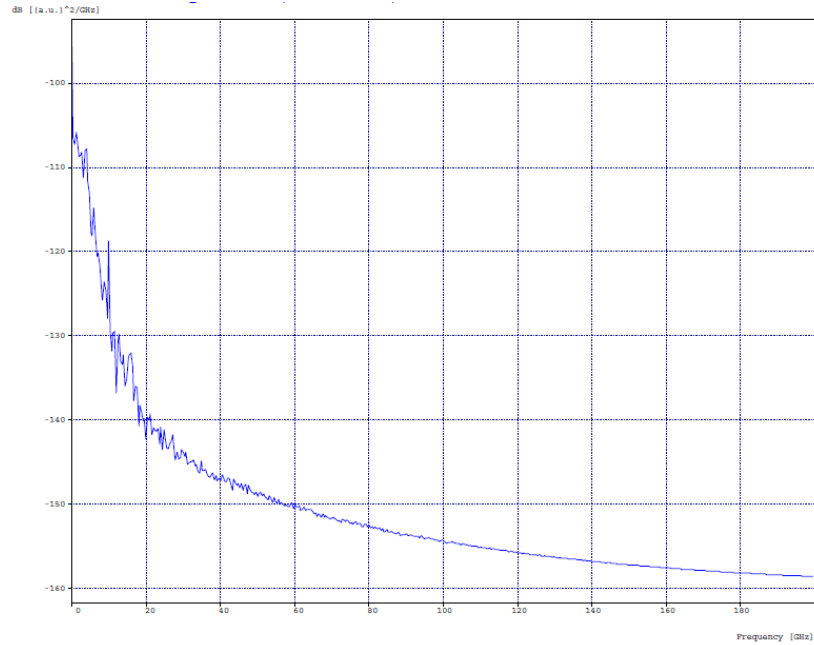


Gráfico 8.1 Espectro eléctrico recepción a 100 km

El gráfico 8.2 muestra la señal de recepción en el espectro eléctrico después 200 km.

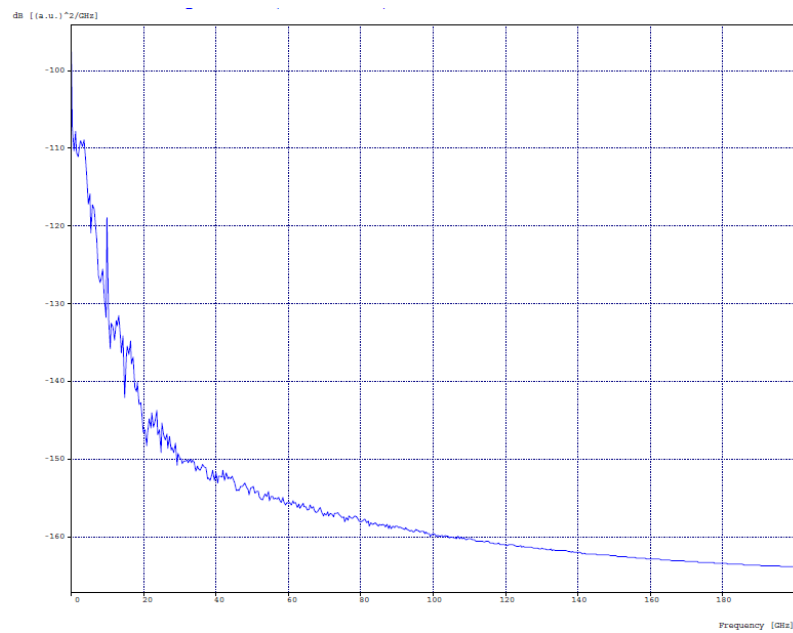


Gráfico 8.2 Espectro eléctrico recepción a 200 km

El gráfico 8.3 muestra la señal de recepción en el espectro eléctrico después 300 km.

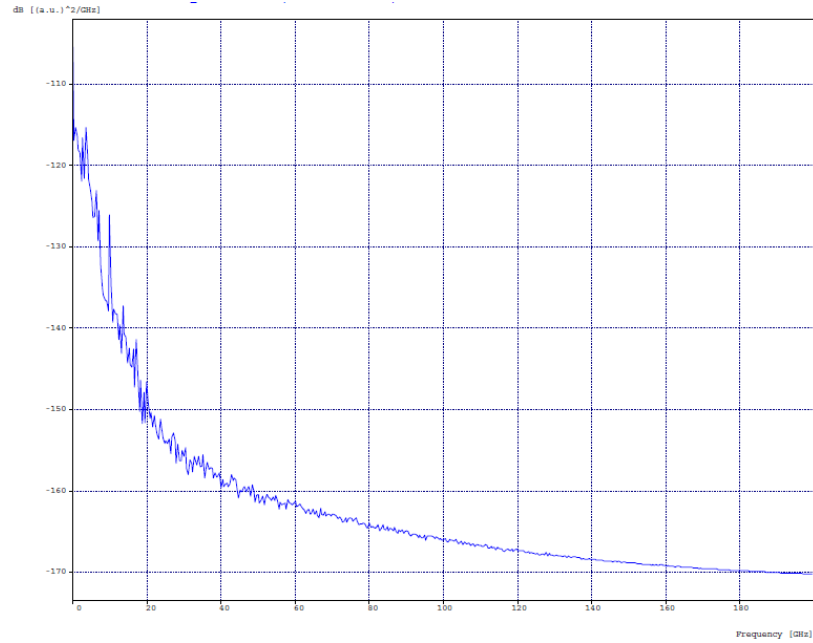


Gráfico 8.3 Espectro eléctrico recepción a 300 km

El gráfico 8.4 muestra la señal de recepción en el espectro eléctrico después 400 km.

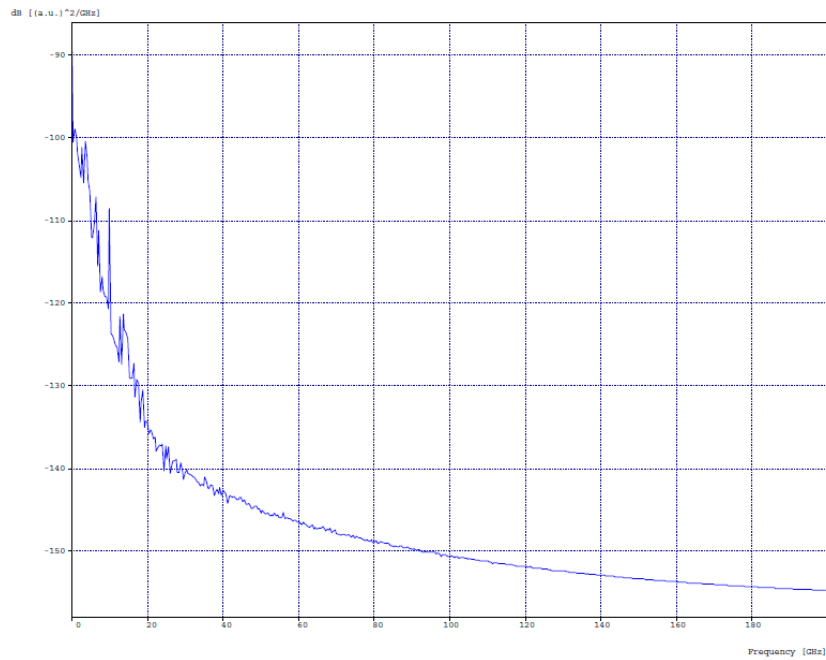


Gráfico 8.4 Espectro eléctrico recepción a 400 km

El gráfico 8.5 muestra la señal de recepción en el espectro eléctrico después 500 km.

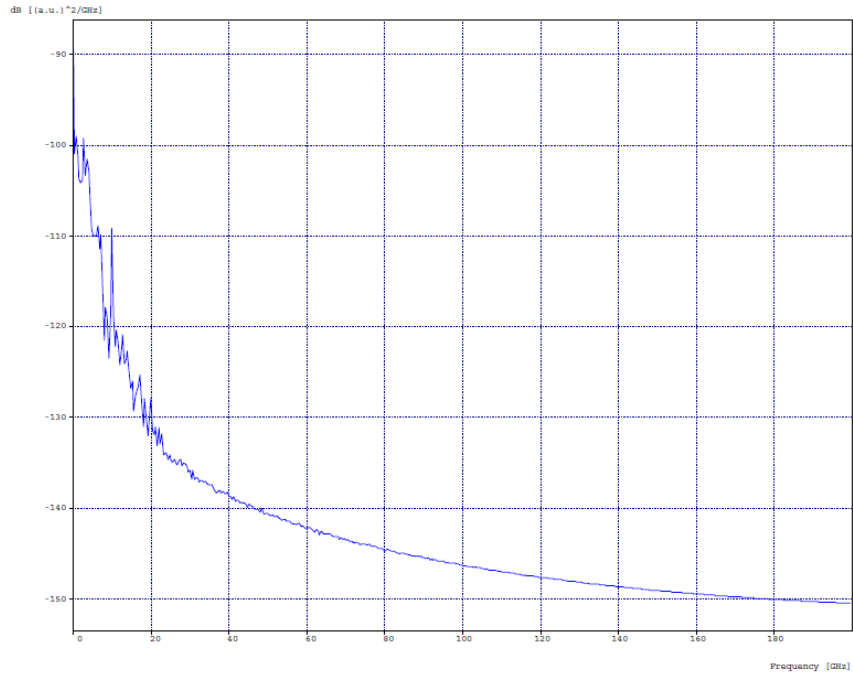


Gráfico 8.5 Espectro eléctrico recepción a 500 km

El gráfico 8.6 muestra el diagrama del ojo en recepción después 100 km.

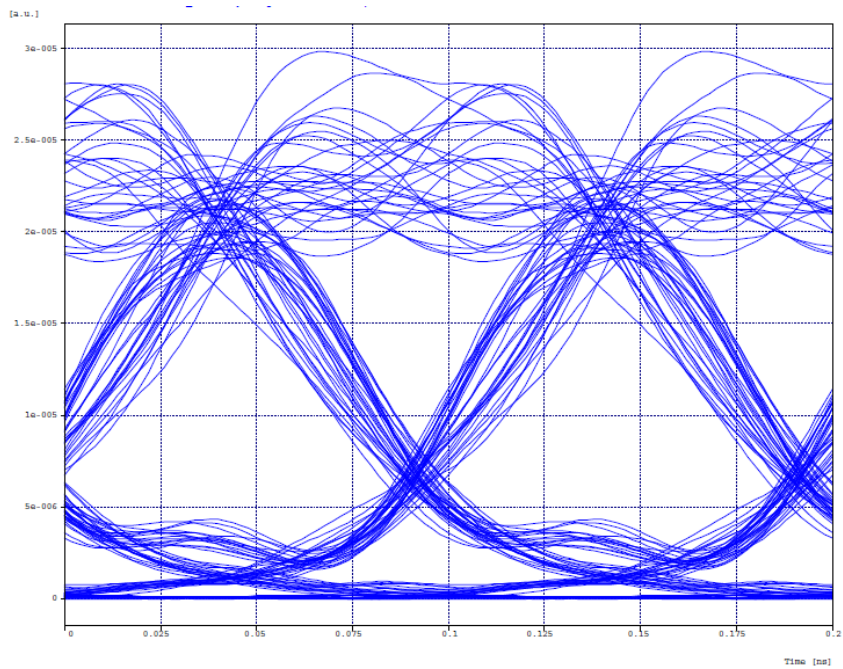


Gráfico 8.6 Diagrama del ojo recepción 100 km

El gráfico 8.7 muestra el diagrama del ojo en recepción después 200 km.

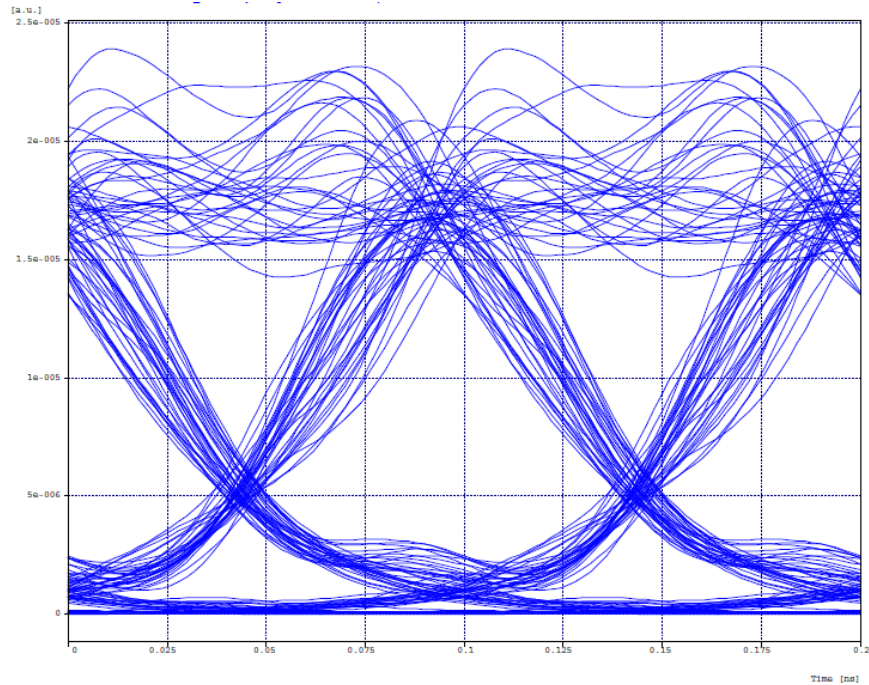


Gráfico 8.7 Diagrama del ojo recepción 200 km

El gráfico 8.8 muestra el diagrama del ojo en recepción después 300 km.

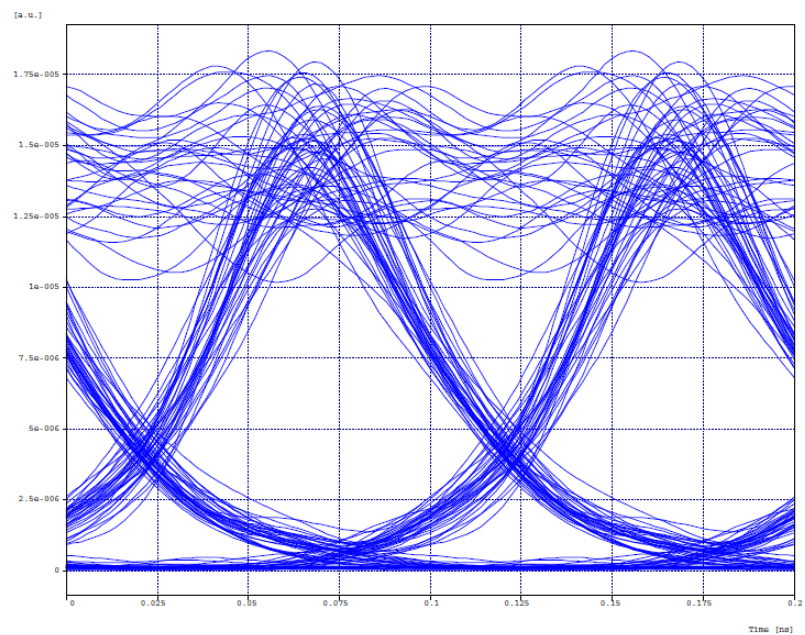


Gráfico 8.8 Diagrama del ojo recepción 300 km

El gráfico 8.9 muestra el diagrama del ojo en recepción después 400 km.

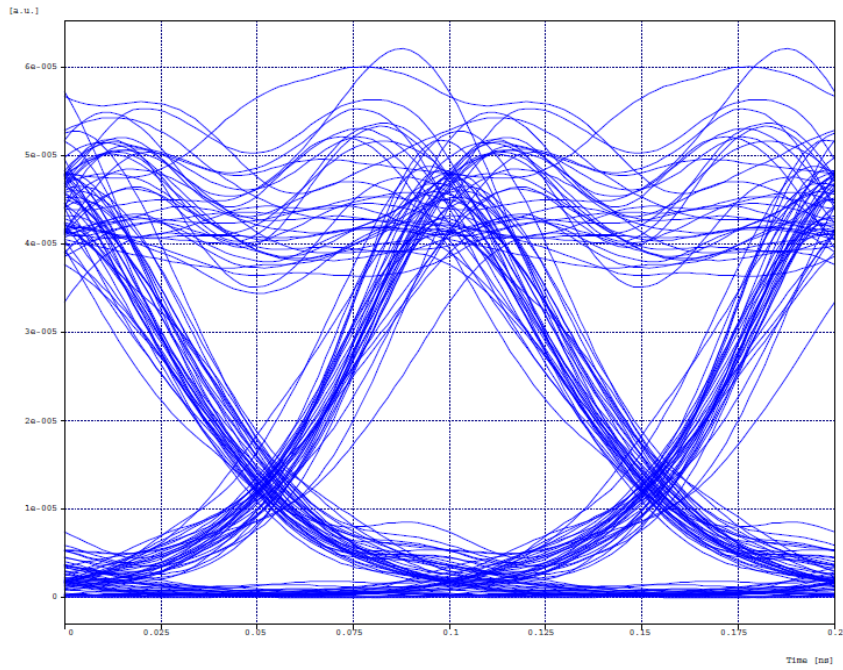


Gráfico 8.9 Diagrama del ojo recepción 400 km

El gráfico 8.10 muestra el diagrama del ojo en recepción después 500 km.

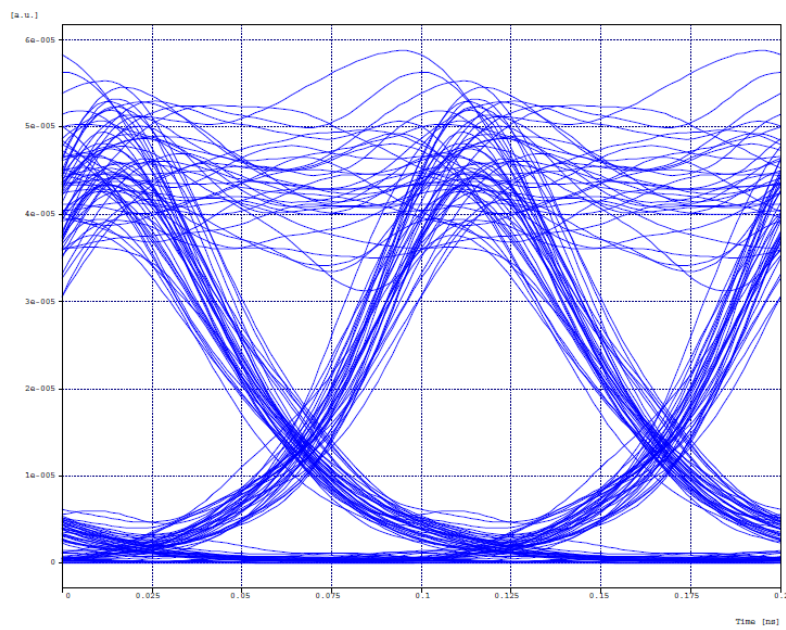


Gráfico 8.10 Diagrama del ojo recepción 500 km

El gráfico 8.11 muestra el espectro óptico en transmisión.

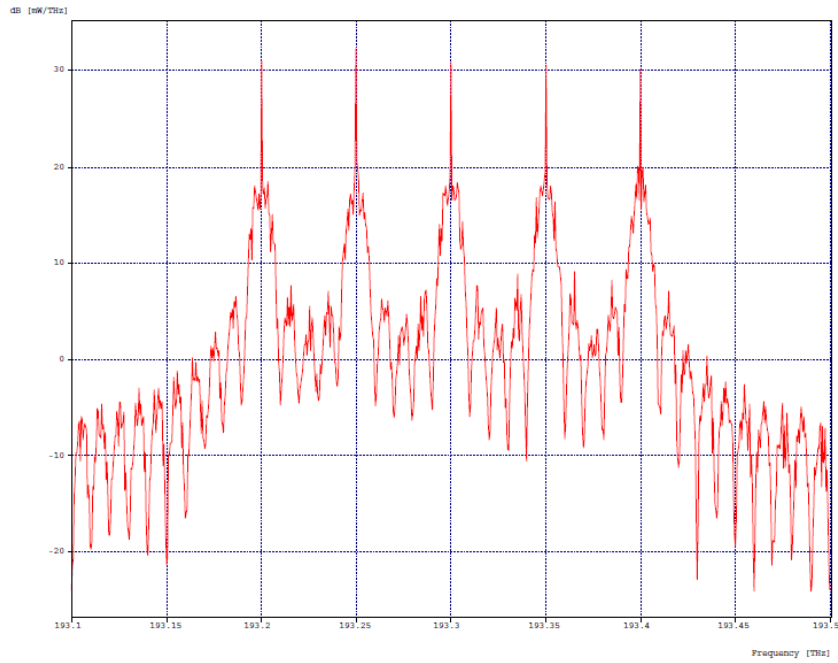


Gráfico 8.11 Espectro óptico en transmisión

El gráfico 8.12 muestra el espectro óptico en recepción después de 100 km.

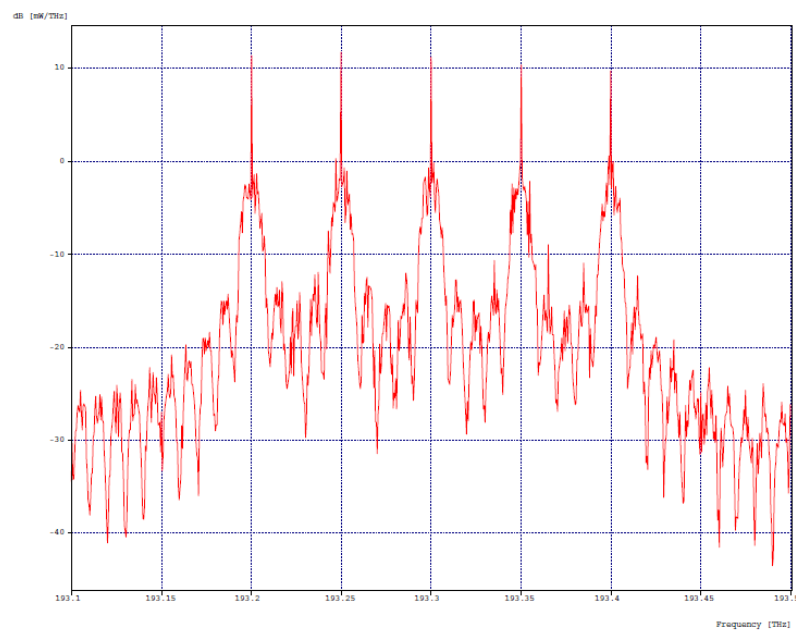


Gráfico 8.12 Espectro óptico en recepción a 100 km

El gráfico 8.13 muestra el espectro óptico en transmisión.

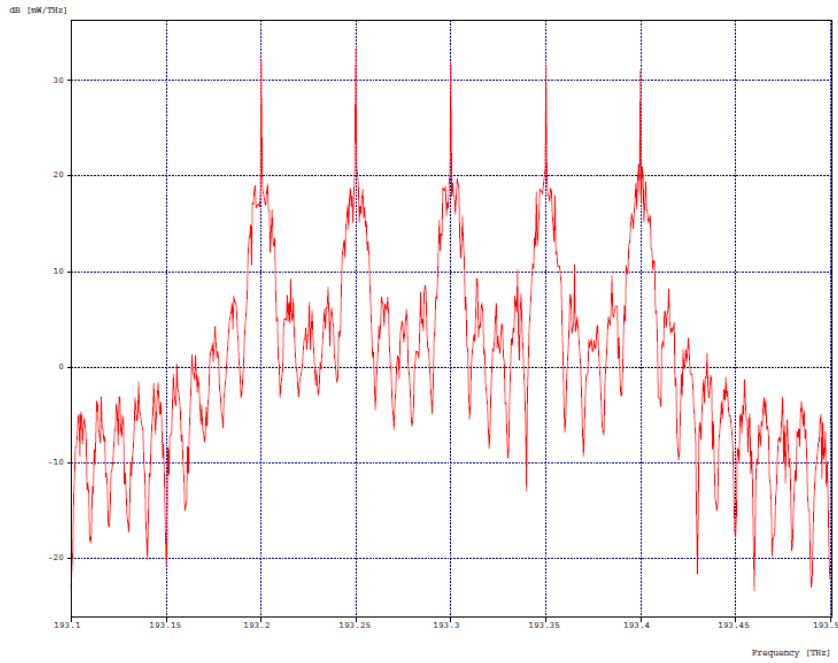


Gráfico 8.13 Espectro óptico en transmisión

El gráfico 8.14 muestra el espectro óptico en recepción después de 200 km.

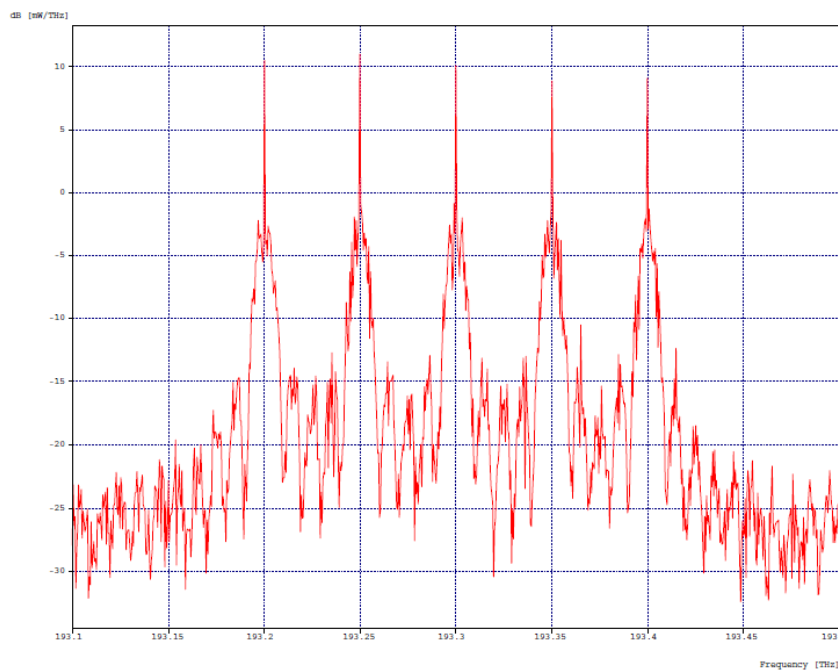


Gráfico 8.14 Espectro óptico en recepción a 200 km

El gráfico 8.15 muestra el espectro óptico en transmisión.

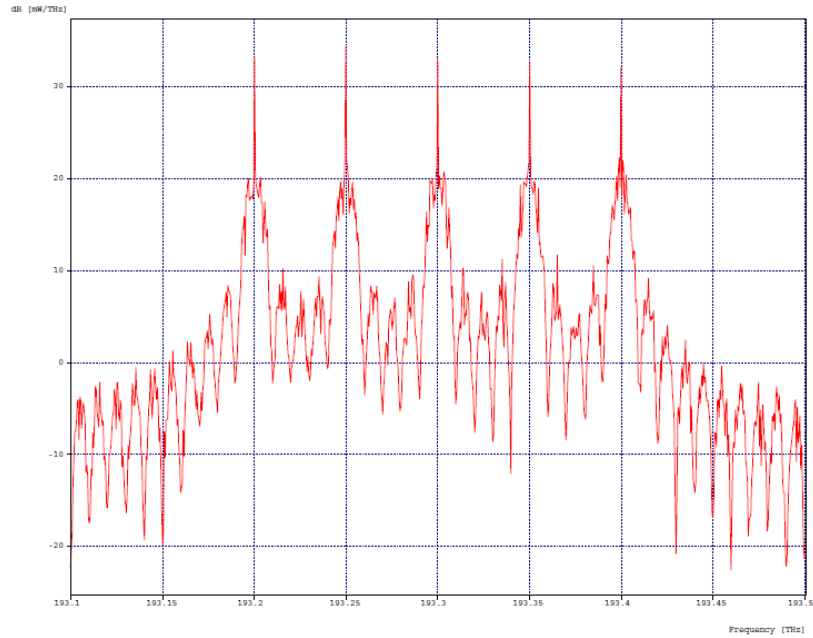


Gráfico 8.15 Espectro óptico en transmisión

El gráfico 8.16 muestra el espectro óptico en recepción después de 300 km.

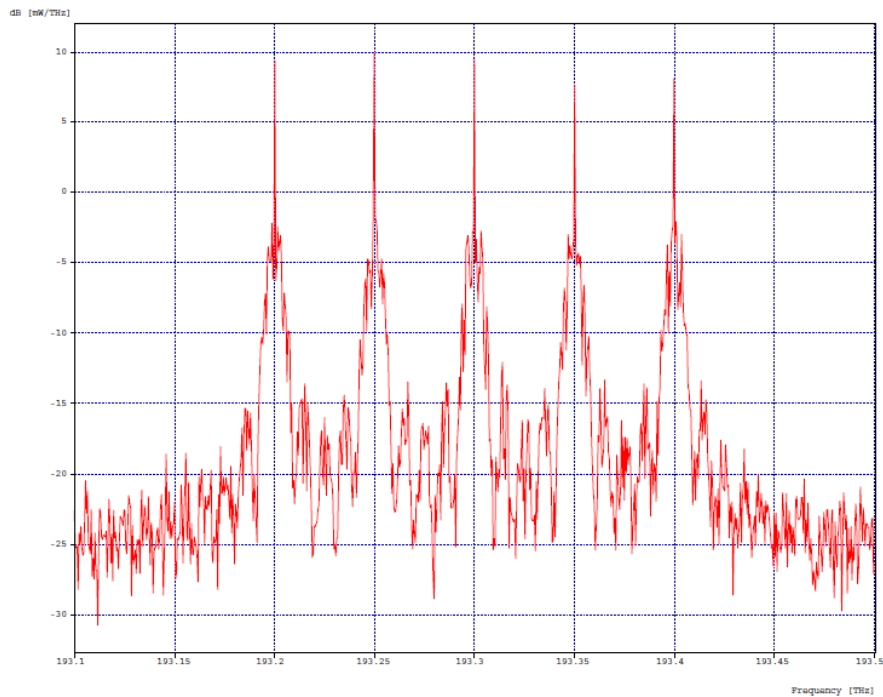


Gráfico 8.16 Espectro óptico en recepción a 300 km

El gráfico 8.17 muestra el espectro óptico en transmisión.

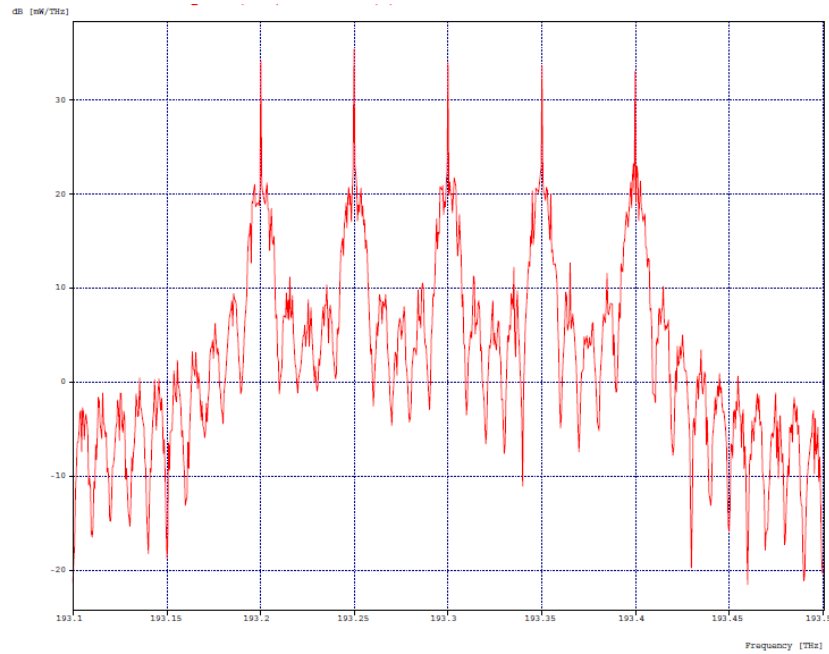


Gráfico 8.17 Espectro óptico en transmisión

El gráfico 8.18 muestra el espectro óptico en recepción después de 400 km.

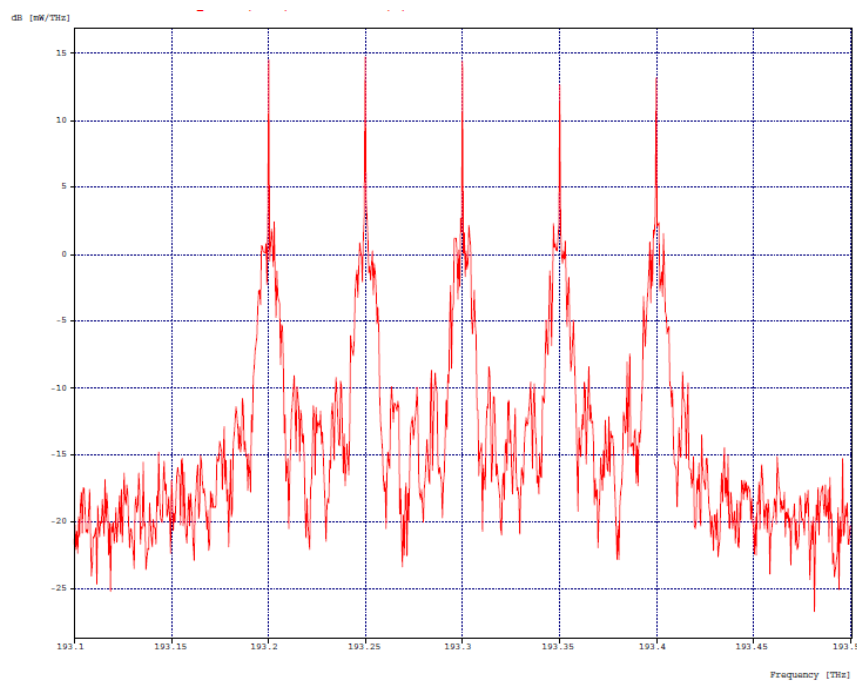


Gráfico 8.18 Espectro óptico en recepción a 400 km

El gráfico 8.19 muestra el espectro óptico en transmisión.

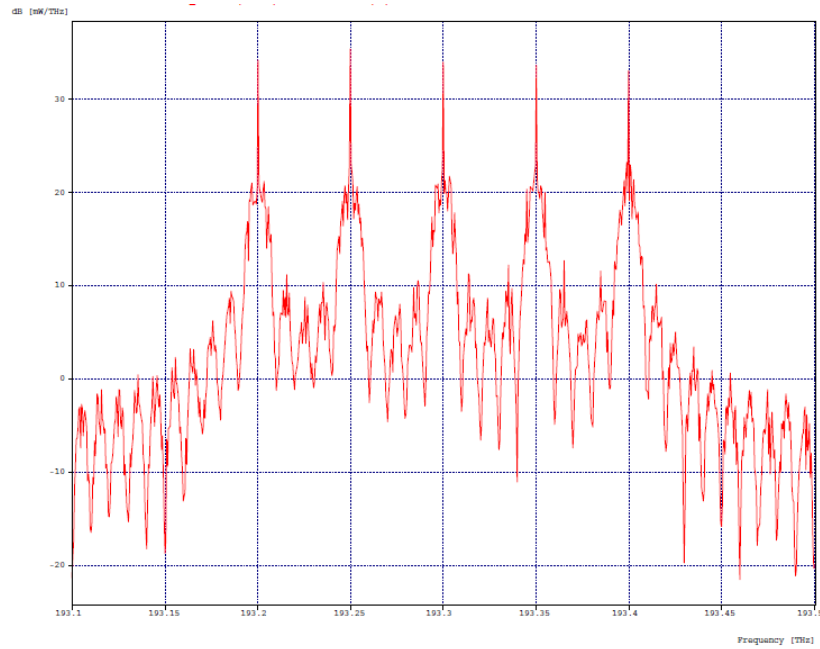


Gráfico 8.19 Espectro óptico en transmisión

El gráfico 8.20 muestra el espectro óptico en recepción después de 500 km.

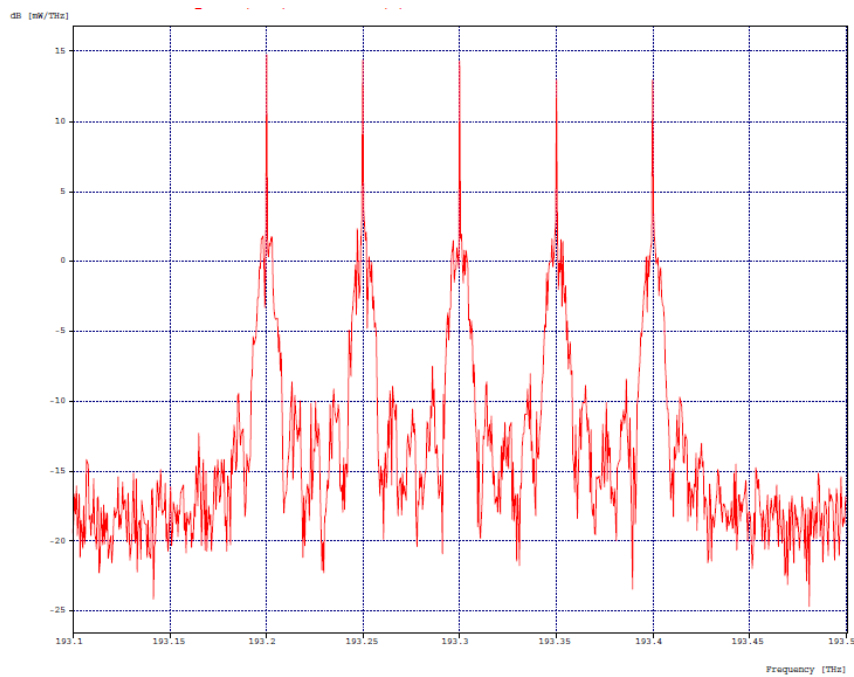


Gráfico 8.20 Espectro óptico en recepción a 500 km