

**EVALUACIÓN DEL USO DE DECODIFICACIÓN RS CON EL
ALGORITMO EUCLIDIANO E INFORMACIÓN *ERASURE* SOBRE
EL DESEMPEÑO DE LAS REDES NG_PON 1**



**Informe de proyecto de tesis para optar al título Magister en
Ingeniería de Telecomunicaciones**

**Presentado por:
Jenny Cuatindioy Imbachi**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERIA
MEDELLIN, 2017**

**EVALUACIÓN DEL USO DE DECODIFICACIÓN RS CON EL
ALGORITMO EUCLIDIANO E INFORMACIÓN *ERASURE* SOBRE
EL DESEMPEÑO DE LAS REDES NG_PON 1**

**Director de Proyecto de Investigación:
PhD. Ana María Cárdenas Soto**

**Presentado por:
Jenny Cuatindioy Imbachi**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERIA
MEDELLIN, 2017**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
INTRODUCCION	li
PRESENTACION	lii
SIGLAS	lv
1 ESTADO DEL ARTE DE REDES OPTICAS PASIVAS DE PRÓXIMA GENERACION	1
1.1 DESCRIPCIÓN DE XG-PON	2
1.2 MODELO DE ENLACE PUNTO A PUNTO PARA XG-PON	3
1.2.1 Transmisor XG-PON	4
1.2.2 Medio de Transmisión para XG-PON	7
1.2.3 Receptor XG-PON	9
1.3 ENLACE UPSTREAM EN XG-PON	10
1.4 ENLACE DOWNSTREAMEN XG-PON	11
1.5 CAPA DE CONVERGENCIA DE TRANSMISIÓN	12
1.5.1 Adaptación al nivel físico de XGTC para enlace <i>downstream</i>	13
1.5.2 Adaptación al nivel físico de XGTC para enlace <i>Upstream</i>	14
1.6 RESUMEN	16
Bibliografía	16
2 ESTADO DEL ARTE DE CÓDIGOS FEC CON REED SOLOMON	18
2.1 CODIFICADORES FEC	19
2.1.1 Codificación RS	20
2.1.2 Influencia del Canal de Transmisión	22
2.1.3 Etapa de Decodificación RS	22
2.2 DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO EUCLIDIANO	24
2.2.1 Proceso de Detección de Error	24

2.2.2	Determinación de los Polinomios de Valor y Posición de Error	25
2.2.3	Determinación de las Posiciones de Error	25
2.2.4	Determinación de los Valores de Error	25
2.2.5	Correcciones de Error	27
2.2.6	Modelo del Codificador RS(n,k) que Incluye el Algoritmo Euclidiano.	27
2.3	DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO BERLEKAMP MASEY	28
2.3.1	Polinomio de Posición de Error	29
2.3.2	Modelo del Decodificador RS(n,k) que Utiliza el Algoritmo Berlekamp Masey	31
2.4	DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE INFORMACIÓN <i>ERASURE</i>	31
2.5	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO	35
2.6	MODELO ESTADÍSTICO DE ANÁLISIS	38
2.7	RESUMEN	41
	Bibliografía	41
3	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN Y DISEÑO DE EXPERIMENTO	43
3.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS PARA EL ANÁLISIS DE XG-PON	45
3.2	ESCENARIOS BASE XG-PON SIN CODIFICACIÓN RS	46
3.2.1	Escenario Base XG-PON Downstream sin Codificación RS	46
3.2.1.1	Transmisor	47
3.2.1.2	Canal	49
3.2.1.3	Receptor	49
3.2.2	Escenario Base XG-PON Upstream sin Codificación RS	50
3.2.2.1	Transmisor	51
3.2.2.2	Canal	53
3.2.2.3	Receptor	53
3.3	ESCENARIOS XG-PON CON CODIFICACIÓN RS	53

3.3.1	Escenario XG-PON Downstream con Codificación RS	53
3.3.1.1	Transmisor	53
3.3.1.2	Canal	55
3.3.1.3	Receptor	55
3.3.2	Escenario XG-PON Upstream con Codificación RS	56
3.3.2.1	Transmisor	56
3.3.2.2	Canal	58
3.3.2.3	Receptor	58
3.4	ESQUEMA DE MEDICIÓN	59
3.5	RESUMEN	60
	Bibliografía	60
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	61
4.1	ESCENARIOS BASE PARA XG-PON	61
4.1.1	Escenario Downstream de XG-PON con modulación OOK	61
4.1.2	Enlace <i>Upstream</i> de XG-PON con Modulación OOK	66
4.2	INCIDENCIA DEL PROCESO DE MODULACIÓN DPSK	69
4.2.1	Escenario XG_PON <i>downstream</i> con DPSK	69
4.2.2	Escenario XG_PON <i>upstream</i> con DPSK	72
4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS ESCENARIOS XG-PON BASE Y LOS ESCENARIOS XG-PON QUE INCLUYEN EL ESQUEMA DPSK	74
4.4	INCIDENCIA DEL PROCESO DE DECODIFICACIÓN RS EN EL SISTEMA XG-PON	77
4.4.1	Evaluación del Esquema RS bajo las Condiciones VPI	78
4.5	RESUMEN	80
	Bibliografía	80
5	CONCLUSIONES	81

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.1	Interfaces de redes de servicio.	5
Tabla 1.2	Clasificación de las pérdidas de los caminos ópticos.	7
Tabla 1.3	Parámetros a nivel físico de <i>splitters</i> .	8
Tabla 1.4	Propiedades de la ONU en enlace <i>upstream</i> para XG-PON.	10
Tabla 1.5	Conformación de trama <i>upstream</i> en la capa de adaptación física.	10
Tabla 1.6	Características de la OLT como receptor.	11
Tabla 1.7	Características de la OLT en un enlace <i>downstream</i> .	11
Tabla 1.8	Características de la ONU en un enlace <i>downstream</i> .	12
Tabla 1.9	Conformación de trama <i>downstream</i> en la capa de adaptación física.	12
Tabla 2.1	Comparaciones entre algoritmos de decodificación RS.	18
Tabla 2.2	Semejanzas y diferencias entre el decodificador que incluye el algoritmo <i>Berlekamp Masey</i> y el decodificador que utiliza el algoritmo Euclidiano.	29
Tabla 2.3	Parámetros de análisis de desempeño.	35
Tabla 2.4	Tiempo de decodificación para RS(31,17) que incluye algoritmo Euclidiano con y sin información <i>erasure</i> .	37
Tabla 2.5	E_b/N_0 para diferentes tasas de codificación y algoritmos de decodificación RS(31,k).	37
Tabla 2.6	Valores establecidos para el modelo de análisis.	39
Tabla 3.1	Características del enlace <i>downstream</i> .	44
Tabla 3.2	Características del enlace <i>upstream</i> .	44
Tabla 3.3	Escenarios seleccionados para el análisis de XG-PON.	46
Tabla 3.4	Características del enlace <i>downstream</i> .	47
Tabla 3.5	Características del enlace <i>upstream</i> .	50
Tabla 3.6	Aspectos de medición del desempeño del sistema XG-PON.	59

Tabla 4.1	Tiempo promedio utilizado por los diferentes algoritmos de decodificación.	79
Tabla 4.2	BER obtenido de RS(248,216) en escenario <i>downstream</i> .	79
Tabla 4.3	Resultados de BER al decodificar con RS(248,232) en escenario <i>upstream</i> .	80

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Evolución de las redes de acceso respecto a condiciones de velocidad.	1
Figura 1.2	Esquema General de una XG-PON.	2
Figura 1.3	Modelo de comunicaciones punto a punto para XG-PON.	4
Figura 1.4	Esquema del transmisor en XG-PON	4
Figura 1.5	Conformación de trama en la capa de adaptación física	5
Figura 1.6	<i>Scrambler</i> para XG-PON	6
Figura 1.7	Red de distribución XG-PON	8
Figura 1.8	Esquema del receptor en XG-PON	9
Figura 1.9	Capas que conforman el protocolo XGTC	13
Figura 1.10	Downstream XGTC <i>bursts</i>	14
Figura 1.11	Trama entregada por la capa adaptación al nivel físico en el enlace downstream	14
Figura 1.12	XGTC <i>burst</i> para enlace <i>upstream</i>	15
Figura 1.13	Trama entregada por la capa adaptación al nivel físico en el enlace <i>upstream</i>	15
Figura 2.1	Utilización de decodificador FEC	18
Figura 2.2	Funciones de sistema de comunicaciones banda base	19
Figura 2.3	Estructura de una palabra de código RS.	21
Figura 2.4	Proceso de la Etapa de Codificación [7]	21
Figura 2.5	Fases del proceso de decodificación RS	23
Figura 2.6	Diagrama de flujo del algoritmo Euclidiano	26
Figura 2.7	Modelo general del código RS(n,k) que incluye algoritmo Euclidiano	28
Figura 2.8	Algoritmo Berlekamp Masey [13]	30
Figura 2.9	Modelo de codificador RS que utiliza el algoritmo Berlekamp	31

Masey

Figura 2.10	(a) Constelación a la salida transmisor. (b) Constelación afectada por el canal de comunicaciones.	32
Figura 2.11	Modelo general para el proceso de codificación y decodificación RS(n,k) con información <i>erasure</i> que incluye el algoritmo Euclidiano	34
Figura 2.12	Comportamiento del código RS(31,17) que incluye algoritmo Euclidiano con y sin información <i>erasure</i>	36
Figura 2.13	Comparación de los código RS(31,k) que incluyen los algoritmos Berlekamp, Euclidiano con y sin información <i>erasure</i> , para diferentes tasas de codificación	38
Figura 2.14	Modelo del sistema banda base con codificación	39
Figura 2.15	MANOVA para la variable <i>time</i>	40
Figura 2.16	MANOVA para la variable <i>err_m_out</i>	40
Figura 3.1	Modelo general de simulación del nivel físico de XG-PON	43
Figura 3.2	Esquema de Transmisión para el enlace Downlink de XG-PON	48
Figura 3.3	Esquema de la ODN en un sistema XG-PON para el enlace <i>downlink</i>	49
Figura 3.4	Esquema del receptor para XG-PON en el enlace <i>downlink</i>	50
Figura 3.5	Esquema del enlace <i>upstream</i> de XG-PON implementado en VPI.	51
Figura 4.1	Señal de información NRZ en el dominio de frecuencia.	62
Figura 4.2	Señal de información pasa banda a la salida del transmisor en el dominio de frecuencia, para el enlace downstream XG-PON	62
Figura 4.3	Señal pasa banda a la entrada del receptor en el dominio de frecuencia, para el enlace downstream XG-PON	63
Figura 4.4	Señal banda base recuperada en el receptor para enlace downstream XG-PON	63
Figura 4.5	Diagrama de ojo de la señal pasa banda recuperada en el enlace downstream XG-PON, en 20 Km	64
Figura 4.6	Variación de Q vs Distancia en enlace Downstream de XG-PON	65
Figura 4.7	Variación de BER vs distancia en el enlace <i>downstream</i> de XG-PON	65

Figura 4.8	Señal de información NRZ en el dominio de frecuencia	66
Figura 4.9	Señal pasa banda a la salida del transmisor, en el dominio de frecuencia	67
Figura 4.10	Diagrama de ojo de la señal banda base recuperada	67
Figura 4.11	Q vs Distancia enlace <i>upstream</i> base	68
Figura 4.12	BER vs Distancia enlace <i>upstream</i> base	68
Figura 4.13	Esquema XG_PON que incluye el esquema DPSK	69
Figura 4.14	Señal modulada mediante el esquema DPSK	70
Figura 4.15	Señal banda base recuperada en la OLT de XG-PON	71
Figura 4.16	BER variando las longitudes del enlace XG_PON	71
Figura 4.17	Señal banda base para enlace <i>upstream</i> de XG-PON	72
Figura 4.18	Espectro de la señal banda base en la OLT	73
Figura 4.19	BER vs Distancia en sistema XG-PON <i>Upstream</i>	73
Figura 4.20	BER vs Distancia en XG-PON downstream	74
Figura 4.21	BER vs Distancia en XG- PON Upstream	75
Figura 4.22	BER vs Potencia en enlace downstream de XG-PON	76
Figura 4.23	BER vs Potencia en enlace upstream de XG-PON	77
Figura 4.24	Relación de BER a la entrada y salida de un sistema FEC RS(248,216) [4]	78

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Padre Dios por permitirme este proceso, que aporta a mi área profesional y personal y que satisface parte la curiosidad que tengo por esta área del conocimiento, basada en la admiración que me producen aspectos de su creación, por ejemplo, la luz.

Agradezco a la PhD. Ana María Cárdenas directora del proyecto, por su acompañamiento, por compartir sus conocimientos y experiencia, por las directrices dadas, por la constancia, por su alto compromiso con mi proceso de formación. Me ha guiado alguien de muy alta calidad humana y profesional.

Agradezco a mi madre y a mi familia por su apoyo incondicional y por la alegría con sencillez de corazón que compartimos ante los logros obtenidos en cada etapa.

Agradezco al decano de la Facultad de ingeniería de la Universidad de Medellín, por su apoyo laboral que me permite culminar esta etapa.

Agradecimientos al grupo GITA por sus diferentes aportes en las etapas del proyecto.

INTRODUCCION

Aunque la evolución de las PON ha permitido alcanzar altas velocidades de transmisión¹, presenta la siguiente limitación: entre mayor es la velocidad de transmisión mayor es la distorsión en las señales debido a los fenómenos lineales y no lineales de la fibra óptica, siendo la dispersión cromática uno de los efectos más críticos. Los problemas de distorsión producidos en el sistema de comunicación óptica, no siempre es posible mitigarlos completamente, no permitiendo en algunos casos, alcanzar la tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate) objetivo, esto explica el que se haya incluido en los sistemas de comunicaciones de las PON, esquemas que permitan detectar y corregir errores en el receptor sin necesidad de la retransmisión de información.

En esta investigación se analiza mediante simulación, el desempeño a nivel físico de las redes ópticas pasivas de próxima generación 1 (NG_PON 1, Next Generation_PON 1), al incluir el esquema de detección y corrección de errores Reed Solomon (RS) con símbolos *erasure* basado en el algoritmo Euclidiano, debido a que este aprovecha la información que entrega el esquema de modulación, para detectar con mayor eficiencia los valores y posiciones de error en el vector de información recibido por el decodificador. El algoritmo Euclidiano provee menor complejidad circuital y menor consumo energético que el algoritmo Berlekamp utilizado comúnmente en los decodificadores RS.

Entre los objetivos específicos planteados en esta investigación, para alcanzar el objetivo principal del proyecto se encuentran:

1. Evaluar mediante simulación, el desempeño a nivel físico de un sistema punto a punto basado en NG_PON 1, definiendo unos escenarios de comportamiento del canal, cuando hace uso de modulación multinivel.
2. Sobre los escenarios definidos, evaluar el desempeño a nivel físico del sistema NG_PON 1 ante las variaciones de las condiciones del canal, al incluir esquemas de codificación RS con los algoritmos más utilizados como son el Berlekamp y el Euclidiano sin información *erasure*.
3. Evaluar y comparar con los esquemas anteriores, el desempeño ante las variaciones de las condiciones del canal, del esquema de codificación RS que incluye el algoritmo Euclidiano con información *erasure*, bajo los mismos escenarios de simulación.²

¹ Velocidades entre 2.5 y 40 Gbps.

² El análisis comparativo de complejidad computacional no se ha considerado dentro de los alcances del proyecto. Sin embargo, se evaluarán aspectos como tiempo de procesamiento y utilización de recursos computacionales para complementar el análisis de desempeño de este algoritmo.

El desarrollo de este trabajo de investigación adapta la metodología de investigación “Modelos para el Desarrollo”, la cual propone las fases: Captura de Requerimientos, Documentación y Capacitación, Análisis de Requerimientos, Diseño, Desarrollo, Pruebas y Verificación, y Fase de Entrega, para abordar los objetivos de este trabajo de investigación. En la simulación se adapta la metodología “Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones”.

En las secciones 4.1 y 4.2 se describen los resultados de implementación del sistema XG-PON bajo simulación, teniendo en cuenta los esquemas de modulación OOK y DPSK, se puede concluir de acuerdo al análisis realizado en la sección 4.3 de este documento, que las técnicas de corrección de errores permiten el paso de 10^{-4} a 10^{-12} para XG-PON en ambos enlaces, *downstream* y *upstream*, usando OOK. Sin embargo, cuando se utiliza DPSK el enlace *downstream* tiene mejor desempeño que el enlace *upstream*.

La descripción de los escenarios que incluyen los esquemas de modulación OOK y DPSK en la tecnología XG-PON presentada en las secciones 3.1 y 3.3 de este documento y el análisis del sistema XG-PON definido bajo estos escenarios, como se muestra en las secciones 4.1 hasta 4.2 permite el cumplimiento del primer objetivo específico de este trabajo de investigación.

El cumplimiento del segundo objetivo requiere de la implementación del código RS que incluye los algoritmos Berlekamp y Euclidiano, el software desarrollado se describe en las secciones 2.2 y 2.3 de este documento. El código correspondiente al proceso de decodificación RS que incluye el algoritmo Euclidiano se encuentra descrito en el anexo F y la descripción del código correspondiente al codificador y decodificador RS que incluye el algoritmo Berlekamp se encuentra en el anexo H.

El cumplimiento del segundo y tercer objetivo específico se presenta en la sección 4.3 de este documento, junto con la sección 2.4 y el anexo I que incluye la descripción del software desarrollado relacionado con el decodificador RS que tiene en cuenta la información *erasure*. También las secciones 2.5 y 2.6 permiten realizar un análisis comparativo de los tres algoritmos teniendo en cuenta sus características y el modelo estadístico planteado para su análisis, teniendo en cuenta el modelo de canal AWGN.

Los códigos RS incluidos en el sistema XG-PON permiten el paso de tasas de error de 10^{-4} a 10^{-12} , debido a la cantidad de pruebas requeridas no se observa la ganancia de codificación entre ellos

También, entre los aportes de este proyecto de investigación se encuentra el análisis comparativo de las estrategias de detección y corrección de errores de interés de este proyecto, el cual ha sido expuesto en el evento internacional COMTEL 2015, de Perú.

PRESENTACION

Actualmente, la creciente demanda de sistemas que permitan la transmisión y recepción de datos con mayores velocidades, exige en las redes de acceso el manejo de altos volúmenes de información y anchos de banda continuamente crecientes. Entre los medios de transmisión que permiten soportar crecientes tasas de transmisión se encuentra la fibra óptica, y en particular bajo el esquema de redes ópticas pasivas (PON, Passive Optical Network), debido a sus ventajas en términos de cobertura y tasa de transmisión conservando un bajo costo, de esta manera las redes de acceso ópticas pasivas representan una solución a los requerimientos de los usuarios. En este documento se presenta el análisis de la tecnología de red de acceso pasiva denominada NG-PON 1 ó XG-PON enfocado en la incidencia del proceso de codificación y decodificación Reed Solomon (RS) en su desempeño.

Según UIT-T G.987.2, en las XG-PON y en las redes de transporte ópticas, se han incluido los esquemas de detección y corrección de errores RS, debido a que se ha logrado el paso de una $BER=1.8 \times 10^{-4}$ alcanzada sin utilizar el código RS a una $BER=10^{-12}$ utilizando el esquema de codificación RS como se muestra en la figura 1.

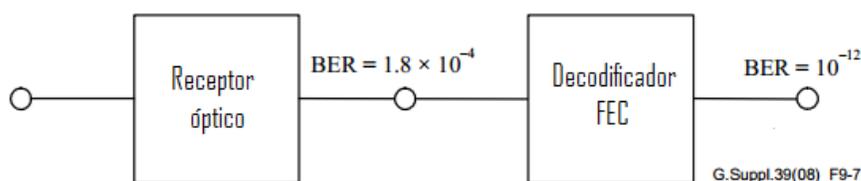


Figura 1. Utilización de decodificador FEC [6]

En este documento se analiza la tecnología XG-PON bajo la incidencia de los algoritmos de decodificación RS denominados Berlekamp, Euclidiano y Euclidiano con información *erasure*, seleccionados por su gran acogida en los sistemas de telecomunicaciones cableados e inalámbricos.

El documento está dividido en cinco capítulos, los cuales muestran el desarrollo del proceso de investigación adaptando la metodología propuesta en el anteproyecto. El capítulo 1 denominado ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS DE PRÓXIMA GENERACIÓN, contiene la descripción del nivel físico de la tecnología XG-PON, el capítulo 2 denominado ESTADO DEL ARTE DE LOS CÓDIGOS FEC CON REED SOLOMON, presenta el diseño de los codificadores y decodificadores RS implementados con los algoritmos Berlekamp, Euclidiano y Euclidiano con información *erasure*. Además, presenta los resultados de estos decodificadores teniendo en cuenta el canal AWGN.

En el capítulo 3, denominado ESCENARIOS DE SIMULACION, se presenta la adaptación de las características del nivel físico de XG-PON a las condiciones de las herramientas de simulación VPI y Matlab generando cuatro escenarios de estudio.

En el capítulo 4 denominado RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS se presentan los datos obtenidos en los escenarios, las limitaciones de las herramientas de simulación y la comparación de estos resultados con documentación teórica.

Finalmente, en el capítulo CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS se presentan de forma general las conclusiones del análisis realizado de la tecnología XG-PON bajo simulación al incidir la modulación DPSK y el proceso de codificación y decodificación RS.

Los capítulos 1 y 2 se apoyan en los anexos que se describen de forma general a continuación.

El ANEXO A denominado GENERALIDADES DE LAS REDES DE ACCESO PASIVAS, contiene aspectos de las redes pasivas ópticas como su evolución, funciones, servicios que soportan y descripción general de su nivel físico.

El ANEXO B denominado CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS RECOMENDADAS PARA XG-PON, presenta como su nombre lo indica las características de las fibras ópticas recomendadas para XG-PON. También incluye las generalidades sobre los fenómenos físicos presentes en el canal de transmisión, que afectan las señales ópticas.

El ANEXO C denominado MODULADOR DPSK presenta un esquema del modulador y demodulador DPSK implementado en sistemas de comunicaciones ópticas.

El ANEXO D denominado CAMPOS FINITOS DE GALOIS contiene la descripción de los campos finitos y sus operaciones.

El ANEXO E denominado EJEMPLO DE CODIFICACIÓN Y DECODIFICACIÓN CON RS(7,3) QUE INCLUYE ALGORITMO EUCLIDIANO, contiene las operaciones requeridas en los procesos de codificación y decodificación con un ejemplo utilizando el decodificador con algoritmo Euclidiano.

El ANEXO F denominado DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO EUCLIDIANO Y EL CANAL AWGN. Describe el diseño en bloques funcionales del simulador de los procesos de codificación y decodificación RS que incluye el algoritmo Euclidiano.

El ANEXO G denominado ARTÍCULO, permite demostrar la participación en el evento COMTEL 2015 con el artículo que relaciona los códigos RS creados.

El ANEXO H denominado DECODIFICACION RS QUE UTILIZA EL ALGORITMO BERLEKAMP describe los bloques funcionales creados para implementar un sistema de comunicaciones banda base que incluye el esquema de decodificación con el algoritmo Berlekamp.

El ANEXO I denominado DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA RS – ERASURE permite mediante bloques funcionales explicar el desarrollo del software Decodificación RS con información *erasure*.

El ANEXO J denominado ANALISIS ESTADISTICO. Contiene el modelo estadístico planteado que permite la evaluación de los códigos RS implementados.

La Universidad de Antioquia, mediante el grupo de investigación GITA permitió el acceso a las herramientas de simulación VPI-Photonics y Matlab, las cuales permitieron establecer los escenarios pero presentan limitaciones en cuanto al análisis de tasas de error cuando se pasa del dominio óptico al dominio eléctrico.

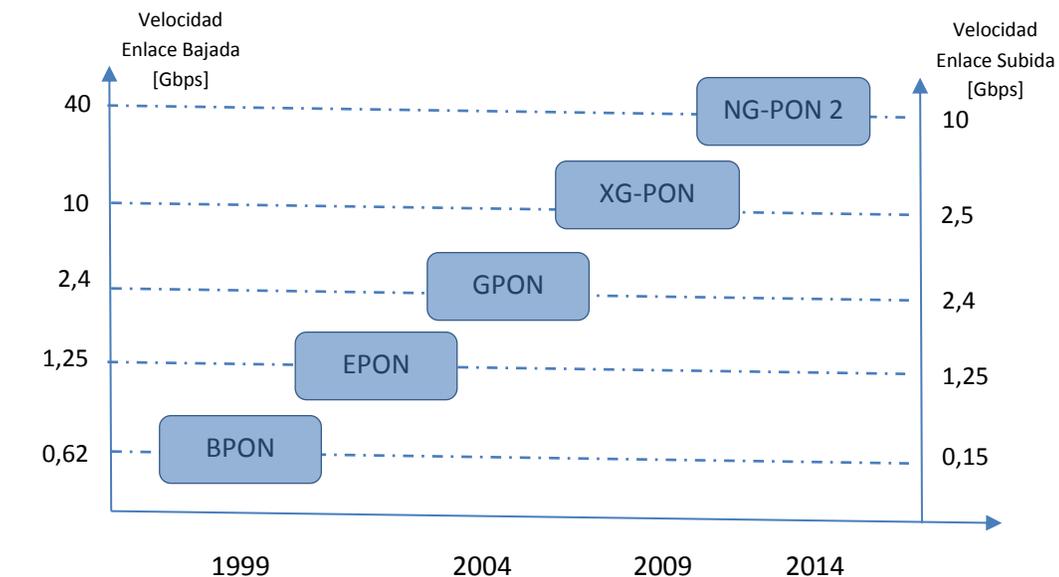
SIGLAS

BER	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i>
BPON	Red Óptica Pasiva Banda Ancha, <i>Broadband Passive Optical Network</i>
DPSK	Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase, <i>Differential Phase Shift Keying</i>
EPON	Red Óptica Pasiva basada en Ethernet, <i>Ethernet Passive Optical Network</i>
FEC	Corrección de Errores Hacia Adelante, <i>Forward Error Correction</i>
GPON	Red Óptica Pasiva en enlaces de Gbps, <i>Giga Passive Optical Network</i>
MER	Tasa de Error de Modulación, <i>Modulation Error Rate</i>
NRZ	No Retorno a Zero, <i>No Return Zero</i>
ODN	Red de Distribución Óptica, <i>Optical Distributed Network</i>
OLT	Terminal de Línea Óptica, <i>Optical Line Terminal</i>
ONU	Unidad de Red Óptica, <i>Optical Network Unit</i>
OOK	Modulación de Amplitud en el Formato Óptico Digital, <i>On Off Keying</i>
PDU	Unidad de Datos de Protocolo, <i>Protocol Data Unit</i>
PON	Red Óptica Pasiva, <i>Passive Optical Network</i>
PSB	Bloque de Sincronización Física, <i>Physical Synchronization Block</i>
SDU	Unidad de Datos de Servicio, <i>Service Data Unit</i>
TDM	Multiplexación por División de Tiempo, <i>Time Division Multiplexing</i>
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda, <i>Wavelength Division Multiplexing</i>
XGPON	Red Óptica Pasiva de Próxima Generación, <i>Next Generation Passive Optical Network</i>
XGTC	Capa de Convergencia de Transmisión de XG-PON, <i>XG-PON Transmission Convergence</i>

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE DE REDES ÓPTICAS PASIVAS DE PRÓXIMA GENERACIÓN

Las redes de acceso ópticas pasivas (*PON, Passive Optical Network*) se presentan como una solución tecnológica a los desafíos actuales, debido a que han ido evolucionando para adaptarse a los nuevos requerimientos de las aplicaciones y los servicios ofrecidos a los usuarios, por ejemplo, la necesidad de establecer comunicaciones con mayor velocidad de transmisión, como se observa en la figura 1.1.



BPON: Red Óptica Pasiva Banda Ancha
EPON: Red Óptica Pasiva Ethernet

GPON: Red Óptica Pasiva en Giga bytes
NG-PON: Red Óptica Pasiva de Próxima Generación

Figura 1.1. Evolución de las redes de acceso respecto a condiciones de velocidad [1-5]

Se habla de desafío debido a que la respuesta es la integración de diversos factores como los desarrollos y las limitaciones tecnológicas de los sistemas de transmisión y recepción, las condiciones del medio de transmisión y los costos, por ejemplo, mitigar los efectos lineales y no lineales propios del medio utilizado en estas tecnologías inciden altamente en el costo, y al establecerse altos niveles de calidad, la evaluación de diferentes estrategias utilizadas en otras tecnologías como la inclusión de los esquemas de detección y corrección de errores es de gran interés para la comunidad de investigación y proveedores de tecnologías de las telecomunicaciones en el área de acceso.

En este capítulo, el autor propone el modelo de enlace punto a punto que une las interfaces de usuario de proveedor de servicios, para describir las condiciones físicas de la red de acceso de nueva generación (*NG-PON, Next Generation Passive Optical*

Networks) de 10 Gbps que en este documento se denominan XG-PON. La descripción de las características se basa principalmente en las recomendaciones de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT, *Union International of Telecommunications*), la cual incluye la conformación de las tramas para obtener las velocidades de los enlaces *upstream* y *downstream* de XG-PON.

Los anexos A, B y C como apoyo a este capítulo incluyen información de la evolución de las redes de acceso, su diferenciación técnica a nivel físico, la conformación general y los servicios que ofrecen, en el anexo B se presenta la información de las fibras ópticas recomendadas para XG-PON y en el anexo C se presenta información general del demodulador DPSK.

1.1. DESCRIPCIÓN DE XG-PON

XG-PON es una tecnología dentro de las redes de acceso que está siendo aún definida por la UIT-T, y sus principales características se presentan en [3-8], la cuales se presentan de forma general en esta sección. Dentro de una XG-PON están definidas funciones del lado de usuario y funciones del lado de la red, como se muestra en la figura 1.2.

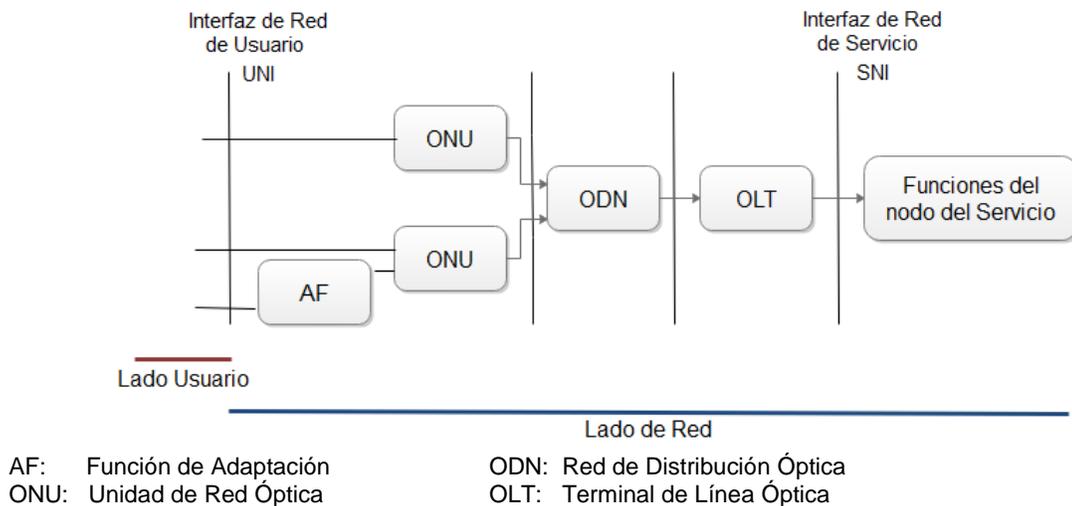


Figura 1.2. Esquema General de una XG-PON [8]

En el lado de usuario, entre las funciones principales de la XG-PON se encuentra proveer conectividad al usuario para que acceda a los diferentes servicios, la conectividad se ofrece mediante diferentes topologías que tienen en cuenta medios de transmisión e interfaces de usuario. En el lado de red, la XG-PON se encargan de la conexión con el nodo de servicio, distribución de la red y adaptación a las diferentes interfaces entre los usuarios y la red.

Debido a las características de los servicios ofrecidos, la función de adaptación (AF, *Adaptation Function*) permite la comunicación entre las interfaces de usuario y las interfaces de red.

La unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*), tiene como función recibir la información de muchos usuarios y enviarla a la red para ser recibida por el nodo de servicio, para ello conforma tramas con la información de los diferentes usuarios mediante el esquema de multiplexación por división de tiempo (*TDM, Time Division Multiplexing*) y adapta la señal al medio óptico utilizando bandas de frecuencia designadas por el esquema de multiplexación por división de longitud de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) para optimizar el uso de las fibras. Visto desde otra dirección, la ONU también cumple la función de recepción de señal desde la red de distribución óptica (*ODN, Optical Distribution Network*) para entregarla a los diferentes usuarios o etapas de adaptación.

La ODN es la etapa que permite la distribución de la información de servicio y la conectividad entre la ONU y el terminal de línea óptica (*OLT, Optical Line Terminal*) que es la interfaz de unión con el nodo de servicio que puede ser constituido por servidores o equipos de almacenamiento de información de servicio. El OLT es utilizado para recibir la información del usuario y también para transmitir la información desde el nodo de servicio.

Según [1-2], la tendencia de la red óptica pasiva (*PON, Passive Optical Network*) es llegar con fibra óptica hasta el usuario, ofreciendo mayores capacidades de los enlaces de comunicación entre los usuarios y los proveedores de servicio. Esta tendencia implica una clasificación a nivel de servicio y conectividad de las redes generando modelos de red de acceso bajo la tecnología fibra hacia el hogar (*FTTX, Fiber to the X*), descritas en el anexo A.

1.2. MODELO DE ENLACE PUNTO A PUNTO PARA XG-PON

Como se describió anteriormente, a nivel físico la XG-PON ofrece comunicación bidireccional entre los usuarios y el nodo de servicio, por tanto, para facilitar el análisis de su comportamiento, el autor propone el modelo general de comunicación punto a punto como herramienta para describir las principales características del enlace de subida (*upstream*) y del enlace de bajada (*downstream*) de XG-PON. El modelo general propuesto en la figura 1.3, consiste de un transmisor XG-PON, el medio de transmisión y el receptor XG-PON.



Figura 1.3. Modelo de comunicaciones punto a punto para XG-PON.

1.2.1. Transmisor XG-PON

Un transmisor adapta la información expresada en forma eléctrica al medio óptico con la potencia, ancho espectral y en las frecuencias requeridas por el medio de transmisión. Inicialmente, la señal eléctrica pasa por el codificador no retorno a cero (*NRZ*, *non return to zero*) según la recomendación [4] y es también codificada mediante el código de corrección de errores hacia adelante (*FEC*, *Forward Error Correction*); esta señal eléctrica modula a la señal óptica, y es combinada con otras señales de la red de usuario mediante el esquema de WDM. Los módulos que cumplen esta función son la ONU y el OLT, dependiendo de la dirección del enlace XG-PON que se establezca, *upstream* ó *downstream* respectivamente, en la figura 1.4, se presentan los principales módulos funcionales de un transmisor.



NRZ: Codificación No Retorno a Cero TDM: Multiplexación por División de Tiempo
 RS: Codificación Reed Solomon DPSK: Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial
 WDM: Multiplexación por División de Longitud de Onda

Figura 1.4. Esquema del transmisor en XG-PON [6-8]

Codificación de fuente. El método de aleatorización utilizado en XG-PON es NRZ, debido a que permite mayor eficiencia espectral, respecto al código de línea RZ que también es utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas. Debido a que el código de línea RZ requiere mayor ancho de banda es menos robusto frente a efectos de dispersión cromática que el código NRZ, pero al aumentar la tasa de bit debido a los requerimientos de ancho de banda del código RZ la potencia se distribuye a todo el ancho de banda disminuyendo la incidencia de los efectos no lineales como la dispersión por modo de polarización. En la recomendación de la UIT-T se propone para las redes XG-PON optar por el código de línea NRZ, debido a la distancia entre longitudes de onda, la cual hace menos crítico el efecto de la dispersión por modo de polarización según [6-8].

Multiplexación. La aplicación de técnicas de acceso como la multiplexación por división de tiempo (*TDM, Time Division Multiplexing*) permite usar una sola fibra para el transporte de la información. La trama que se conforma a través de la técnica de TDM tiene una duración de 125 μ s y puede incluir información de diferentes interfaces de servicio, como se muestra en la tabla 1.1 [4].

Tabla 1.1. Interfaces de redes de servicio [4].

SIN	Interfaz de servicio	Servicio
1000 BASE		Ethernet
10GIGA -E		Ethernet
40 GIGA E		Ethernet
100 GIGA E		Ethernet
ITU-T G965	V 5.2	POTS
ITU-T G703	PDH STM-N	DS3, E1, E3, STM-1, DS1
ITU-T G957	STM-N	E1, E3, DS1, DS3, GFP, E4, STM-1, STM-4
ATIS 0600107	PDH	DS1, DS3

El tamaño de la trama que se entregue al medio de transmisión depende de la dirección *downstream* o *upstream* del enlace, de forma general se puede decir que está conformado por un encabezado denominado información del bloque de sincronización físico (PSBu, *physical synchronization block-upstream*) y la información útil codificada denominada *payload*, como lo muestra la figura 1.5



PSBu: Bloque de Sincronización Física *upstream*
 Payload: Información Útil

Figura 1.5. Conformación de trama en la capa de adaptación física [8]

El código de corrección de errores definido para XG-PON es Reed Solomon (RS) que tiene entre sus funciones la detección, la corrección del error y la recuperación de la información codificada, tareas que se realizan en el transmisor y receptor, sin retransmisión, esta es la temática central de esta investigación, por lo tanto se explicará con detalle en el capítulo siguiente de este documento, según [6-8]. En el enlace *upstream* se implementa para la información de control, la codificación convolucional.

Scrambler. Posterior a la etapa de codificación de canal, XG-PON utiliza la técnica de adaptación y dispersión de energía que convierte la trama de bits obtenida hasta el momento en una señal casi aleatoria de forma que se evite la transmisión de largas series de unos y ceros, este proceso también es denominado *scrambler* según [8], el cual

consiste en la operación de registros y suma en orden dos como lo muestra la figura 1.6, representada por el polinomio $1 + x^{39} + x^{58}$.

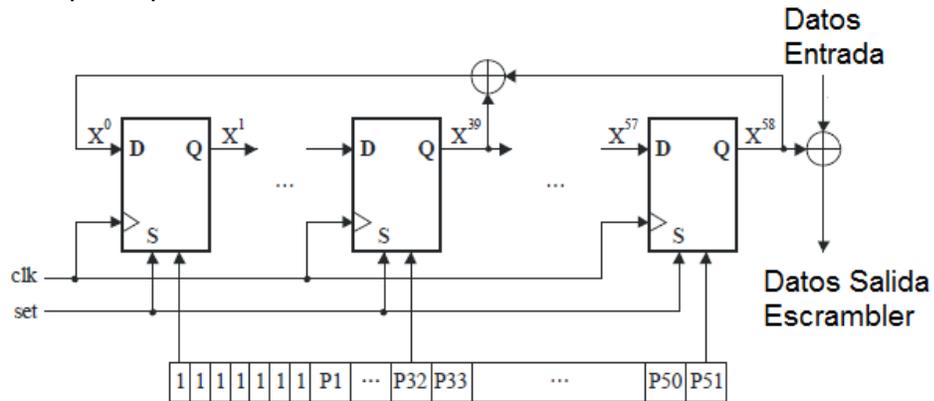


Figura 1.6. Scrambler para XG-PON [8]

Modulación. El modulador permite adaptar la información banda base al canal de comunicaciones, la selección depende del desempeño de los sistemas de comunicaciones teniendo en cuenta aspectos como: eficiencia espectral, tolerancia a la dispersión, a efectos no lineales, dificultad en la implementación y costos. Entre los esquemas de modulación más evaluados para redes ópticas se encuentran: modulación binaria simple (*OOK, On-Off Keying*), modulación por desplazamiento de fase diferencial (*DPSK, Differential Phase Shift Keying*) y el esquema de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (*DQPSK, Differential Quadrature Phase Shift Keying*) donde el primer esquema corresponde a la clasificación modulación de intensidad y los dos últimos son clasificados como moduladores de fase [9-10].

El formato DQPSK es recomendado para las redes de transporte ópticas, debido a que es más robusto frente a la dispersión cromática y a la dispersión por modo de polarización. El formato de modulación OOK es uno de los más utilizados, pero presenta altos niveles de BER frente a los efectos como la dispersión cromática, debido a que maneja cambios en la intensidad de la señal, según [9-10].

El formato DPSK es uno de los esquemas de modulación más promisorios de acuerdo con los requerimientos de los escenarios PON. DPSK permite una implementación sencilla en el transmisor debido a que no es muy exigente con el ancho de línea del láser y en el receptor es posible implementar el demodulador mediante un detector diferencial coherente con alta sensibilidad, debida a la distancia en la constelación. En el formato DPSK se debe tener control en la potencia del transmisor debido a las velocidades que se manejan en XG-PON, para evitar la incidencia de los efectos no lineales de la fibra, pero este aspecto no es tan crítico, debido a las longitudes de onda utilizadas para los enlaces *upstream* y *downstream*, estos enlaces operan en 1260-1280 nm ubicada en la banda O y en 1575-1580 nm ubicada en la banda C del espectro electromagnético, con velocidades de 2.5 Gbps y 10 Gbps, respectivamente [6-8]. La asignación de las bandas

de frecuencia para ambos enlaces, se realiza mediante la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*).

Se presentan a continuación algunas condiciones para la selección del esquema de modulación, teniendo en cuenta las condiciones de operación a nivel físico de XG-PON, según [9-11].

1. Se recomienda el láser de realimentación distribuida (*DFB, Distributed Feedback Lasers*) debido a que el ancho de línea afecta el desempeño del formato de modulación, por la incidencia del efecto de dispersión cromática en las redes XG-PON, según las características de DFB dadas en [9-11].
2. Debido a las ventajas del formato de modulación NRZ-DPSK para una red XG-PON, se opta por la modulación externa que permite variar la fase del láser, sin incidir de forma considerable en el ancho de banda requerido, el modulador Mach Zehnder (MZM) permite establecer estas características y requiere para su implementación voltajes de control.
3. En la modulación DPSK se tiene un comparador de fase entre el bit actual y el bit de llegada, esta comparación se realiza mediante la operación XOR.

1.2.2. Medio de Transmisión para XG-PON

La ODN es de gran importancia para los proveedores, debido a que la inversión económica realizada en su implementación es alta, decisiones como la reutilización y adaptación de la red de distribución existente es una tendencia en la implementación de las tecnologías PON avanzadas. Bajo el modelo propuesto, un camino óptico de la ODN representa el bloque funcional Medio de Transmisión, que está compuesto por fibra óptica y elementos distribuidores pasivos.

Los caminos ópticos de las redes de distribución están caracterizados de acuerdo con las pérdidas que se presentan como se muestra en la tabla 1.2, que inciden en la selección de los receptores ópticos.

Tabla 1.2. Clasificación de las pérdidas de los caminos ópticos [7]

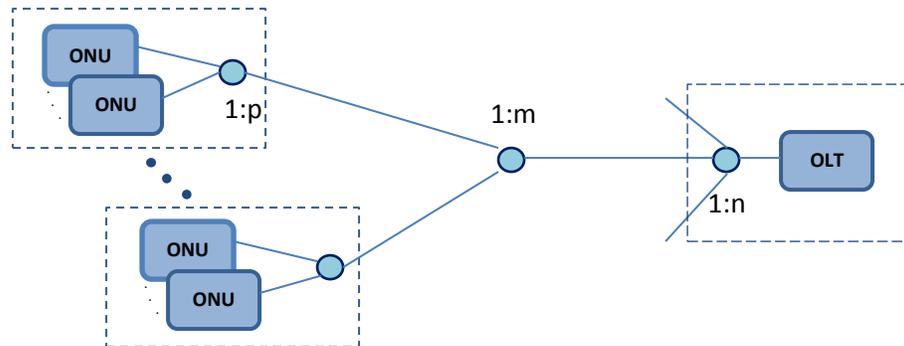
[dB]	Clase Nominal 1 (N1)	Clase Nominal 2 (N2)	Clase Extendida1 (E1)	Clase Extendida2 (E2)
Pérdidas mínimas	14	16	18	20
Pérdidas máximas	29	31	33	35

La configuración de los elementos pasivos y la fibra óptica permite la distribución de la información a diferentes usuarios y también el establecimiento de enlaces bidireccionales,

entre la ONU y la OLT que para el modelo propuesto en este documento, se refieren al transmisor y receptor, dependiendo de la dirección de los enlaces.

La distancia diferencial óptica³ que maneja una ODN es DD1=20 Km y DD2= 40 Km, para establecer enlaces con las pérdidas aceptables en los enlaces de la ODN, se deben incluir los atenuadores necesarios.

Splitter. La arquitectura de la red de distribución en XG-PON está conformada por *splitters* que tienen la función de interconectar las ONU con la OLT asignada, como se muestra en la figura 1.7, donde p, m y n son las posibilidades de distribución de la señal de los *splitters* utilizados, en cada etapa de distribución. Los proveedores de la tecnología basada en XG-PON buscan que $p \times m \times n$ sea mayor a 64, según la descripción dada en [4], se busca conformar módulos 1:128 ó 1:256.



ONU: Unidad de Red Óptica
 OLT: Terminal de Línea Óptica

Figura 1.7. Red de distribución XG-PON [4]

En la tabla 1.3 se presentan algunas de las características a nivel físico de los *splitters* que pueden ser utilizados en las XG-PON, dadas en [12-13].

Tabla 1.3. Parámetros a nivel físico de *splitters*[12]

1: N	1:2	1:4	1:8	1:16	1:32	1:64
Fibra	G 657					
Longitud de onda [nm]	1260-1650					
Pérdida de Inserción [dB] (P/S) ⁴	3.8/4	7.1/7.3	10.2/10.5	13.5/13.7	16.5/16.9	20.5/21
Pérdida de retorno [dB] (P/S) ⁵	50/55	50/55	50/55	50/55	50/55	50/55
Pérdida por polarización [dB] ⁶	0.2	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35
Directividad [dB] ⁷	55	55	55	55	55	55

³ Distancia diferencial óptica. Distancia entre la ONU y el OLT

⁴ Pérdida de inserción. Relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

⁵ Pérdida de retorno. Relación de la potencia de salida y la potencia de la señal que se refleja.

⁶ Pérdida de polarización. Debida a cambios de dirección del campo electromagnético.

⁷ Directividad. Capacidad de concentrar la potencia de una señal en determinada dirección o línea óptica

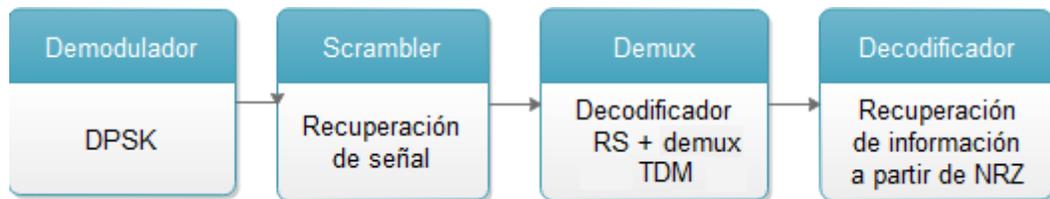
Pérdida por longitud de onda [dB]	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
-----------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fibra óptica. Las características de las fibras clasificadas en las categorías A y B de la fibra óptica monomodo son recomendadas para transportar la información en el área de distribución de la XG-PON, debido a que permiten alcanzar en estas redes, altos niveles de ancho de banda y velocidad de transmisión, aunque hasta el momento el control de los efectos lineales y no lineales, implican altos costos, según [14-18], que no se justifican en estas redes, por esta razón, incluir los esquemas de detección y corrección de errores en las redes con tecnologías XG-PON, es de gran importancia.

En el anexo B se presentan las principales características de las fibras recomendadas para esta tecnología y la descripción general los factores que inciden sobre la señal óptica, como atenuación, dispersión intramodal y efectos no lineales.

1.2.3. Receptor XG-PON

Finalmente, el receptor en un enlace XG-PON cumple con las funciones complementarias al transmisor como la demodulación, desmultiplicación y decodificación y recuperación de la información, como se muestra en la figura 1.8.



DPSK: Desplazamiento de Fase Diferencial TDM: Multiplexación por División de Tiempo
 RS: Reed Solomon NRZ: No Retorno a Cero

Figura 1.8. Esquema del receptor en XG-PON [8]

Demodulador. El proceso de demodulación consiste en tomar la señal de la banda de operación del enlace y entregarla en el formato banda base. El demodulador DPSK requiere un detector diferencial coherente, el cual se realiza a partir de un interferómetro de retardo de línea (*DLI, Delay Line Interferometer*) para comparar las fases del símbolo actual y del símbolo anterior, el interferómetro Mach Zehnder (MZI) pertenece a la clasificación DLI y se utiliza para velocidades menores o iguales a 10Gbps.

Scrambler. Consiste en la aplicación del polinomio $1 + x^{39} + x^{58}$ para organizar nuevamente la información que se le dio un carácter aleatorio en el transmisor.

Demux. La demultiplexación inicialmente consiste en distribuir la información de las tramas TDM a cada uno de los usuarios, pero inicialmente se realiza el proceso de

decodificación RS, denominada también decodificación de canal, que permite la detección y la corrección de los errores encontrados en las tramas, después se distribuye la información a cada usuario.

Decodificador. Se recupera la señal a partir de la señal codificada bajo el formato NRZ.

1.3. ENLACE UPSTREAM EN XG-PON

Se puede establecer una analogía entre los bloques funcionales: transmisor, medio de transmisión y receptor de XG-PON, para explicar las funciones del enlace de subida, la ONU, la red de distribución y el OLT tendrían estas funciones respectivamente. La tabla 1.4, presenta de forma general, las propiedades de la ONU, para un enlace con dirección *upstream*.

Tabla 1.4. Propiedades de la ONU en enlace *upstream* para XG-PON [6-8]

Propiedad	Descripción
Código de línea	NRZ
Código de canal	RS(248,232)
Modulación	OOK, DPSK ⁸ , QPSK
Esquema de transmisión	WDM
Frecuencias de operación	1260-1280 nm
Velocidad de transmisión	2,48832 Gbps
Rango de potencia de salida	2 dBm – 7dBm
Tolerancia del transmisor a la potencia óptica reflejada	más de -15 dB
Máxima reflectancia en la interfaz R/S	Menor de -6 dB
Rango de dispersión	0 hasta -140 ps/nm (DD20) ⁹ 0 hasta -280 ps/nm (DD40) ¹⁰

La velocidad de transmisión del enlace de subida es de 2.48832 Gbps con una duración de trama de 125µs, esto implica que la trama del nivel de adaptación física está conformada por 38880 bytes, que se distribuye en la información del PSBu y payload. Según el anexo III de [9], en el enlace de subida de XG-PON, la trama y su PSBu tienen una longitud constante, como se muestra en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Conformación de trama *upstream* en la capa de adaptación física [8].

⁸ Conforme con el alcance de este proyecto se utilizará el esquema de modulación DPSK.

⁹ Para una distancia entre la ONU y la OLT de 20 Km, es decir DD20: Distancia diferencial de 20 Km

¹⁰ Para una distancia entre la ONU y la OLT de 40 Km, es decir DD40: Distancia diferencial de 40 Km

Tamaño de trama [bytes]	Payload [byte]	PSBu [bytes]
38880	38856	24

El OLT cumple con las funciones de receptor en el enlace de subida de XG-PON, el cual recibe datos desde la ODN, entre sus funciones se encuentran: la demodulación, la demultiplexación, la decodificación de canal y la recuperación de la señal transmitida, en la tabla 1.6 se presentan de forma general sus principales características, según la recomendaciones de la ITU-T [7-8].

Tabla 1.6. Características de la OLT como receptor [7-8].

Item	Unidad	Valor			
Máxima penalidad del trayecto óptico. Está dada para DD2	Db	0.5			
Máxima reflectancia S/R medida en la longitud de onda de recepción	dB	Menor a -20			
Nivel de referencia de tasa de error de bit sin FEC		10^{-4} sin FEC y 10^{-12} con FEC			
Clase de ODN		N1	N2	E1	E2
Mínima sensibilidad al nivel de referencia de la VER	dBm	-27.5	-29.5	-31.5	-33.5
Mínima overload al nivel de referencia de la BER	dBm	-7	-9	-11	-13
Tolerancia del receptor para potencia óptica reflejada	dB	Menor de 10			
Inmunidad a dígitos consecutivos idénticos	Bit	Menor a 72			

1.4. ENLACE DOWNSTREAM EN XG-PON.

La dirección de bajada de un enlace XG-PON tiene los mismos componentes generales que el enlace con dirección de subida los cuales son: transmisor, medio de transmisión y receptor. El transmisor tiene la función de adaptar la señal al medio óptico y en XG-PON está a cargo del OLT, posteriormente se encuentra el ODN, que como su nombre lo indica, es la red asociada a las funciones de distribución de las señales hacia las diferentes ONUs, que relacionadas al receptor cumple la tarea de hacer llegar la información a los usuarios. En [8] se describen las condiciones del nivel físico que permiten establecer el enlace XG-PON en la dirección de bajada, las cuales se presentan de forma general, en las tablas 1.7 y 1.8

Tabla 1.7. Características de la OLT en un enlace *downstream* [7-8].

Item	Unidad	Valor			
Velocidad de transmisión	Gbps	9.95328			
Longitud de onda de operación	Nm	1575 – 1580			
Código de Línea NRZ		NRZ			
FEC		RS(248,216) a partir de RS(255,223)			
Mínima ORL del ODN	dB	32			
Clases de ODN		N1	N2	E1	E2

			N2a	N2b		E2a	E2b
Potencia mínima media	dBm	2	4	10.5	6	8	14.5
Potencia máxima media	dBm	6	8	12.5	10	12	16.5
Radio de extinción mínima	dB	8.2					
Tolerancia del transmisor a la potencia óptica reflejada	dB	-15					
Rango de dispersión	ps/nm	0-400 en DD20 0-800 en DD40					
Radio de supresión mínimo	dB	30					
Máximas pérdidas de camino óptico diferencial	dB	15					

Tabla 1.8. Características de la ONU en un enlace *downstream* [7-8].

Item	Unidad	Valor					
Máxima penalidad de camino óptico	dB	1					
Máxima reflectancia	dB	Menor a -20					
Nivel de la tasa de error de bit		10^{-3} sin codificador 10^{-12} con FEC					
Clasificación del ODN		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b
Sensitividad mínima al nivel de referencia VER	dBm	-28	-28	-21.5	-28	-28	-21.5
Minimo overload al nivel de referencia VER	dBm	-8	-8	-3.5	-8	-8	-3.5
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	Bit	Más de 72					
Tolerancia del receptor a la potencia óptica reflejada	dB	Menos de 10					

La velocidad de transmisión del enlace de bajada es de 9.95328 Gbps con una duración de trama de 125µs, esto implica que la trama del nivel de adaptación física está conformada por 155520 bytes, que se distribuye en la información del PSBd y payload, como se indica en la tabla 1.9.

Tabla 1.9. Conformación de trama *downstream* en la capa de adaptación física [7-8].

Tamaño de trama [bytes]	Payload [byte]	PSBu [bytes]
155520	155496	24

1.5. CAPA DE CONVERGENCIA DE TRANSMISIÓN

La capa de convergencia de transmisión de la red de acceso XG-PON (XGTC, *Next Generation Transmission Convergence*), es un protocolo que especifica los formatos y procedimientos de mapeo entre las unidades de datos de servicio (SDU, *Service Data Unit*) hasta la conformación adecuada del flujo de bits para modular la portadora óptica.

Las tres capas que componen al protocolo XGTC se denominan Adaptación de Servicio, Conformación de Tramas y Adaptación al Nivel Físico, que se muestran en la figura 1.9 y sus funciones están definidas para el sistema transmisor, de los enlaces con dirección *upstream* y *downstream*, es decir, las funciones pueden ser cumplidas por la ONU ó el OLT, respectivamente. En el lado del receptor se cumplen las funciones complementarias XGTC.

Adaptación de Servicio	Con la información de la Unidad de Datos de Servicio se conforma el payload del XGTC, mediante la encapsulación, multiplexación y alineación.
Conformación de Tramas	Asigna identificadores, información de inicio de trama, de tamaño de trama, mediante el overhead. Conformar tramas agregando la información overhead a la información payload que recibe de la capa Adaptación de Servicio. Conformar la ráfaga XGTC.
Adaptación al nivel Físico	Realiza la partición de la ráfaga XGTC en tramas y aplica a cada trama el código RS, también aleatoriza la información codificada.

Figura 1.9. Capas que conforman el protocolo XGTC [8]

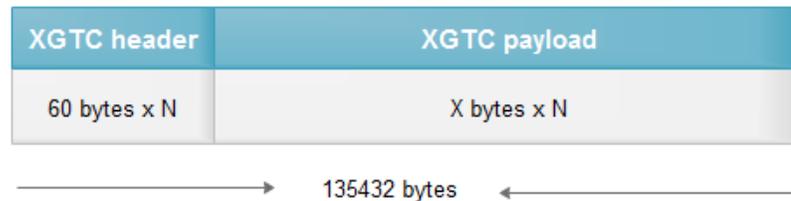
A continuación, se presentan los principales lineamientos dados en XGTC para la conformación del flujo de bits tanto para el enlace *downstream* como para el enlace con dirección *upstream*, centrándose en la capa de Adaptación al nivel Físico, debido al alcance de este proyecto de investigación.

1.5.1. Adaptación al nivel físico de XGTC para enlace *downstream*.

En la dirección *downstream*, el OLT es el transmisor del enlace de comunicaciones, el recibe del nodo de servicio la información y la adapta al medio de transmisión que cumple con las funciones de transporte y distribución de la señal óptica. La ONU recibe y recupera la señal para entregarla al usuario final del servicio por medio de las interfaces de adaptación.

En este caso, de acuerdo con la XGTC, mediante la capa Adaptación de Servicio, la OLT recibe de la SDU la información relacionada con el servicio y también la información de gestión y control de interfaces de las ONU asignadas a la OLT, entre sus funciones se encuentra organizar esta información, aplicar el proceso de segmentación y de encapsulación y asignar identificadores denominados XGEM-ID, conformando de esta manera el *payload* XGTC.

La capa de conformación de tramas es responsable de la construcción y asignación de información *overhead* que soporta las funcionalidades de gestión PON. En esta capa se conforma la unidad de información *downstream* XGTC *burts* que tiene un tamaño de 135432 bytes, como se indica en la figura 1.10, a partir de la información XGTC-payload que entrega la capa Adaptación de Servicio. El número de unidades payload no está definido, debido a que tienen longitud variable.



XGTC: Capa de Convergencia de XG-PON

Figura 1.10. *Downstream* XGTC *burts*

En el nivel de Adaptación al Nivel Físico el XGTC *burts* se segmenta en tamaños de 216 bytes y posteriormente se agrega información de redundancia mediante el codificador RS(248,216), conformándose 627 unidades de información codificada de longitud 248 bytes. Posterior a este proceso, las 627 palabras codificadas se multiplexan y se aleatorizan mediante el módulo *scrambler*, como se indicó en la sección 1.2.3 de este capítulo y se agrega un encabezado de 24 bytes denominado PSBd, como se muestra en la figura 1.11. Este nivel entrega una trama de 155520 bytes para ser transmitidos en 125 μ s, alcanzando una velocidad de 9,95328 Gbps.

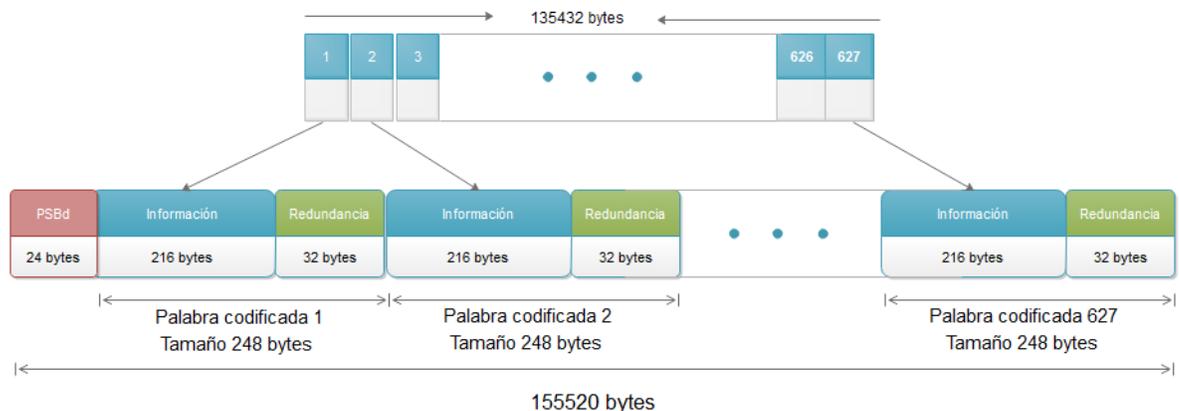


Figura 1.11. Trama entregada por la capa adaptación al nivel físico en el enlace *downstream*

1.5.2. Adaptación al nivel físico de XGTC para enlace *upstream*.

En el enlace con dirección *upstream*, la información de diferentes usuarios se multiplexa y se adapta dentro de una trama agregando información de gestión y de control de errores, este proceso lo realiza la ONU, que además, transmite esta información hacia la OLT, permitiendo la comunicación de los usuarios con el nodo de servicio.

La capa conformación de tramas XGTC entrega a la capa adaptación al nivel físico la unidad de información denominada XGTC *burst*, que está compuesta por sub-unidades de información útil y de control, como se muestra en la figura 1.12.

XGTC header	DBRu	payload	DBRu	payload	...	XGTC trailer
4 - 60 bytes	4 bytes	N bytes	4 bytes	N bytes		4 bytes

Figura 1.12. XGTC *burst* para enlace *upstream*

El XGTC *header* contiene información de identificación de las ONU, de señalización y operación y mantenimiento. La información de esta sección se codifica con el código convolucional BCH (63,12,2).

La información DBRu es utilizada para asociación de la información payload con el identificador de la ONU respectivo. También añade información de redundancia cíclica con el polinomio $g(x) = x^8 + x^2 + x + 1$.

La información payload corresponde a los datos útiles enviados desde el usuario al nodo de servicio.

El XGTC tráiler contiene información de suma de paridad del XGTC *bursts*.

Posteriormente, en la etapa de adaptación al nivel físico, la unidad de información XGTC *burst* se fragmenta en bloques de 232 bytes y se agrega información de redundancia de 16 bytes de acuerdo con el código de corrección de errores RS(248,232). Esta información se aleatoriza mediante el proceso denominado *scrambler* y también se agrega información de 24 bytes adicionales, para que el OLT pueda identificar la trama y alinearla, a esta información se le denomina PSBu. El operador de la ONU puede optar por codificar o no esta información dependiendo de los niveles de BER que esté observando.

En la figura 1.13 se muestra la unidad de información que entrega la capa de nivel de adaptación al nivel físico de una ONU, para que sea transmitido por fibra óptica hacia la OLT. Se observan dos casos: trama de longitud máxima y trama de longitud mínima.

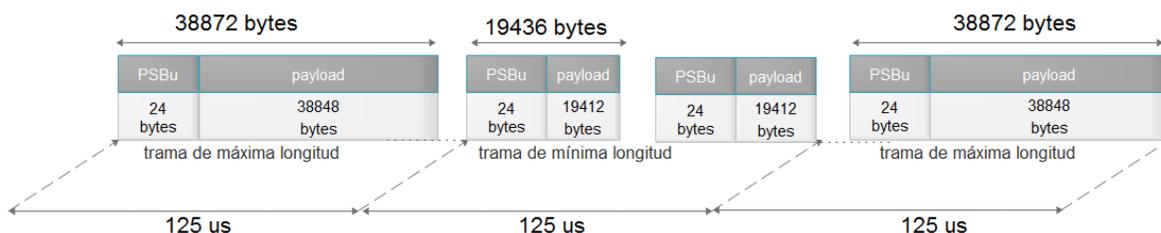


Figura 1.13. Trama entregada por la capa adaptación al nivel físico en el enlace *upstream*

La trama contiene 38880 bytes y se transmite en 125 μ s, alcanzado una velocidad de 2,48832 Gbps. Existe un espacio dentro de la trama de 8 bytes que no se utiliza con información útil o de control, para evitar interferencia inter-símbolo con la trama siguiente. Se puede asumir este espacio de trama con bits en estado 0 lógico, para conformar la trama total de 38880 bytes. En esta figura también, se presentan las condiciones de longitud mínima de esta unidad de información.

La trama de longitud mayor tiene información codificada de longitud 38848 bytes, esta unidad de información es el resultado de multiplexar 157 palabras codificadas con el código de detección y corrección de errores RS(248,232), es decir, el XGTC *burst* se divide en 156 unidades de 232 bytes, y una unidad de 160 bytes, esta palabra de información con longitud menor a 232 bytes se rellena con 72 bytes en 0 lógico a la derecha para conformar una palabra de longitud de 232 bytes. Al alcanzar la longitud definida por el código RS(248,232), se aplica el proceso de codificación. Finalmente, se eliminan los 72 bytes agregados al inicio de trama y se multiplexa con las 156 tramas codificadas, como se explicó anteriormente.

1.6. RESUMEN

El capítulo 1 permite conocer las características principales de la tecnología XG-PON a nivel físico, enfocando el estudio en el modelo de comunicaciones punto a punto tanto en la dirección *downstream* como en *upstream*, permitiendo conocer las principales características del transmisor, red de distribución y receptor. Además, se describe el proceso de conformación de las tramas para alcanzar las tasas de transmisión de los enlaces downstream y upstream basado principalmente en las recomendaciones de la UIT-T.

De esta manera, este capítulo se constituye en la base teórica que permitirá establecer los escenarios requeridos para el estudio a nivel de simulación del desempeño de esta tecnología bajo la incidencia de los códigos de corrección de errores Reed Solomon (RS), los cuales se describen y se comparan en el capítulo 2. El desarrollo de este capítulo hace parte de la fase Captura de Requerimientos de la metodología propuesta para este trabajo de investigación.

Bibliografía

- [1] Recomendación UIT-T G.983-1, "Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas", enero, 2005.
- [2] Huawei Technologies Co Next Generation PON Evolution. Online: <http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>. Ingreso, marzo 2014.
- [3] Recomendación UIT-T G.984-1, "Gigabit-capable passive optical networks. General characteristics". Marzo, 2008.
- [4] Recomendación UIT-T G.987-1, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification", octubre, 2010.
- [5] Recomendación UIT-T G.989-1, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements", marzo, 2013.
- [6] Millán Ramón. NG-PON. Conectónica No. 154. GM2 Publicaciones Técnicas. Online: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/ngpon.php>. Ingreso, octubre 2015.
- [7] Recomendación UIT-T G.987-2, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification", febrero, 2016.
- [8] Recomendación UIT-T G.987.3, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission Convergence (TC) layer specification", enero, 2014.
- [9] Carmona, Claudia. "Comparación de técnicas de modulación eléctrica ópticas en redes de acceso PON". Tesis para optar al título de magister. Universidad de Antioquia 2013.
- [10] D. van den Borne. "Robust optical transmission system". ISBN 978-90-386-1794-7. Technische Universiteit Eindhoven, Países Bajos. 2008.
- [11] Kahn, J. "Modulation and Detection Techniques for Optical Communication Systems in Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications", Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CThC1. Online: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=COTA>.
- [12] ISAY, Proveedor de soluciones para empresas de telecomunicaciones. Online: <http://www.tradeisay.com/articulos/que-es-un-splitter-de-fibra-optica.html>. Ingreso, octubre 2015.
- [13] State of art. Networking. "Passive Optical Splitter. PLC Splitter for FTTH & GEPON applications". Online: <http://www.ad-net.com.tw/product/plc-splitters-planar-lightwave-circuit-splitter-for-ftth-gepon-applications/>. Ingreso: enero 2016.

- [14] Recomendación ITU-T G652. "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", noviembre de 2009
- [15] Recomendación ITU-T G657. "Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network", octubre de 2012.
- [16] Martin, J. "Sistemas y Redes de Comunicaciones Ópticas". ISBN:84-205-4008-0. Pearson Educación S.A. 2004.
- [17] Recomendación ITU-T G-Sup 39-201209. "Optical and system design and engineering considerations". Septiembre, 2012.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE CÓDIGOS REED SOLOMON

Según [1-3], buscando mejorar la fiabilidad y eficiencia del uso de los sistemas de comunicaciones ópticos, se han incluido diferentes técnicas de modulación, codificación y de transmisión, junto con algunas técnicas de compensación de las distorsiones. Sin embargo, no se ha logrado mitigar completamente el efecto de las distintas distorsiones sobre la señal óptica y en algunos casos demandan incrementos de potencia para obtener una relación señal a ruido que garantice un desempeño adecuado de la red.

Según la UIT-T [4], en las NG-PON y en las redes de transporte ópticas, se han incluido los esquemas de detección y corrección de errores Reed Solomon (RS), debido a que se ha logrado el paso de una $BER=1.8 \times 10^{-4}$ alcanzada sin utilizar el código RS a una $BER=10^{-12}$ utilizando el esquema de codificación RS en conjunto con el Código de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), ó códigos convolucionales, la concatenación entre estos códigos conforman los códigos de corrección de errores hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*), como se muestra en la figura 2.1.

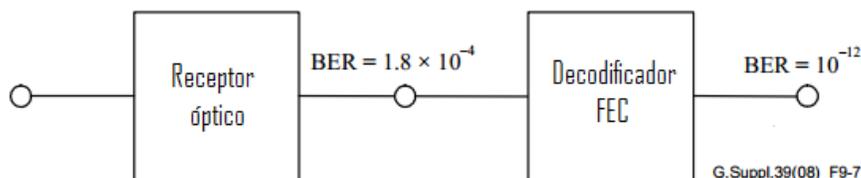


Figura 2.1. Utilización de decodificador FEC [4]

Los esquemas de codificación RS se clasifican en codificadores de dominio de tiempo y de dominio de frecuencia, los cuales utilizan los algoritmos Euclidiano y Berlekamp-Massey respectivamente. En la clasificación del dominio del tiempo también se utiliza el algoritmo PGZ (PGZ, Peterson-Gorenstein-Zierler) pero este esquema tiene su mejor desempeño en sistemas que manejan bajas BER [5]. En la tabla 2.1 se observan las diferencias principales entre los algoritmos de decodificación RS [5].

Tabla 2.1. Comparaciones entre algoritmos de decodificación RS [5]

	Mayor	Mediano	Bajo
Complejidad circuital	Berlekamp	Euclidiano	PGZ
Retardo	Euclidiano	PGZ	Berlekamp
Consumo de Potencia	Berlekamp	PGZ	Euclidiano
Corrección de errores	Berlekamp/Euclidiano	Berlekamp/Euclidiano	PGZ
Requerimiento de almacenamiento	Berlekamp	Euclidiano	PGZ
Tamaño hardware	Euclidiano	PGZ	Berlekamp

Características como el bajo consumo de potencia y la mediana complejidad, hacen que la evaluación del desempeño del algoritmo Euclidiano sea de gran interés, para diferentes grupos de investigación y también para proveedores de tecnología en telecomunicaciones. Existen variaciones del proceso de decodificación que permiten alcanzar según [6], ganancias adicionales de codificación entre [2.1 – 2.3] dB al utilizar la información *erasure*¹¹, que consiste en realizar el proceso de detección y corrección de errores considerando la información adicional de probabilidad de error obtenida en la modulación.

Dado lo anterior, es importante conocer el aporte de los esquemas de codificación a los sistemas de comunicaciones, por tanto en este capítulo se presenta una descripción y comparación de los codificadores RS que incluyen los algoritmos Berlekamp, Euclidiano, y Euclidiano con información *erasure*. y su incidencia en un sistema de comunicaciones que incluye un canal de transmisión definido por el modelo AWGN.

2.1. CODIFICADORES FEC

La figura 2.2 representa un sistema de comunicaciones banda base que incluye los procesos de codificación y decodificación para mejorar su fiabilidad. El proceso de codificación se realiza en el transmisor, el cual consiste en adicionar información de redundancia a la información base. Para hacer llegar la señal al receptor, se utiliza un canal de transmisión que afecta la señal, por tanto la señal recibida no es la misma transmitida, el receptor inicia entonces los procesos de detección y corrección de errores para recuperar la señal, dependiendo de la capacidad de corrección de errores del codificador utilizado.

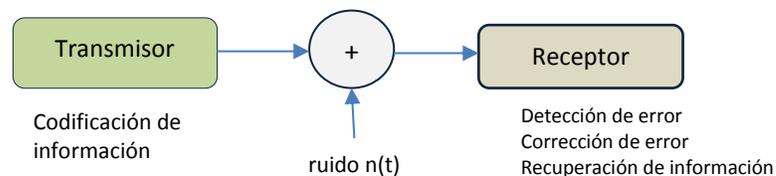


Figura 2.2. Funciones de sistema de comunicaciones banda base [7]

La técnica de control de errores FEC realiza la detección y corrección de errores utilizando la señal de información codificada, que llega al receptor, sin solicitar la retransmisión de la información. La clasificación de los códigos FEC en códigos convolucionales y códigos bloque se debe a la forma como se adiciona la información de redundancia a la información útil, los códigos convolucionales procesan la información de forma serial y continua, bit a bit y los códigos bloque añaden como su nombre lo indica,

¹¹ Un símbolo *erasure* se define como un símbolo de error cuya localización es conocida con un grado de certeza por parte del demodulador.

bloques de información de redundancia a la información útil, a estos códigos también se les denomina códigos sin memoria [7].

Dentro de los códigos bloque se encuentran los códigos cíclicos, donde cada cambio cíclico permite formar una nueva palabra de código válida, dentro de estos códigos se encuentran los códigos Bose Ray Chaudhuri (BCH), los cuales presentan una amplia facilidad de decodificación, el código Reed Solomon (RS) es el más representativo dentro de esta clasificación [7-8]. En la decodificación RS se utilizan algoritmos matemáticos para detectar y corregir los errores presentes en la palabra recibida, pero este proceso depende de la capacidad de corrección de errores que en este documento se denomina t . Los estudios realizados actualmente están enfocados en utilizar nuevos o modificaciones de los existentes, que mejoren la capacidad de corrección de errores, como se indica en [9].

Las operaciones requeridas en los procesos de codificación y decodificación RS se basan en las operaciones entre símbolos del campo finito $GF(2^m)$, donde m es la cantidad de bits que conforman un símbolo en esta base numérica y 2^m es la cantidad de símbolos del campo. En el anexo D de este documento se presenta la descripción y ejemplos de las operaciones suma, multiplicación, división y potencia que se pueden presentar entre los elementos de un campo finito, basándose en [10]-[13]

En la codificación RS [7-9], la palabra original de información útil contiene k símbolos y se codifica, transformándola en n símbolos, mediante la asignación de información de redundancia, denominando este procedimiento de codificación $RS(n,k)$, el cual debe cumplir las siguientes condiciones:

Condición 1. Las operaciones del código $RS(n,k)$ se realizan en el conjunto de números del $GF(2^m)$. La descripción de las características de este conjunto numérico se encuentra en el anexo D.

Condición 2. La longitud de la palabra codificada en $RS(n,k)$, cumple con la condición:
 $n = 2^m - 1$.

Condición 3. La capacidad de corrección de errores t , está dada por: $t = \frac{n-k}{2}$

En la siguiente sección, se describen los procesos en el transmisor y en el receptor para la codificación y decodificación de la información, bajo el código $RS(n,k)$, los cuales se basan en las condiciones de campos finitos, que están descritas en el anexo D.

2.1.1 Codificación RS

La etapa de codificación consiste en agregar información de redundancia a una palabra denominada mensaje, de longitud k símbolos. La información de redundancia se caracteriza por tener una longitud de r símbolos. Si el proceso se realiza de forma sistemática, los símbolos de redundancia se agregan al final de la palabra mensaje,

obteniendo mediante este proceso una palabra codificada de longitud n símbolos, como se muestra en la figura 2.3.

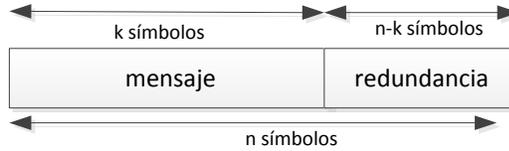


Figura 2.3. Estructura de una palabra de código RS [7].

Las operaciones matemáticas a ser realizadas en el proceso de codificación se basan en polinomios y se representan en la figura 2.4, este proceso permite obtener la palabra codificada $c(x)$ a partir de la palabra de información $m(x)$ [7]. A continuación, se describen algunas de las características de cada uno de estos polinomios y de sus operaciones para obtener la palabra codificada.

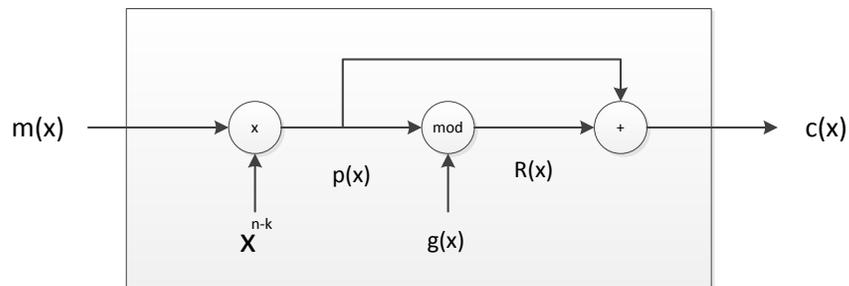


Figura 2.4. Proceso de la Etapa de Codificación [7]

El polinomio $m(x)$ representa el mensaje que está conformado por cada uno de los símbolos de la palabra fuente ($m_0, m_1, m_2, \dots, m_{k-1}$) como se indica en (2.1), donde $k-1$ corresponde al grado del polinomio. Los coeficientes numéricos pertenecen al campo de Galois $GF(2^m)$ [7-8].

$$m(x) = m_{k-1}x^{k-1} + m_{k-2}x^{k-2} + \dots + m_1x^1 + m_0 \quad (2.1)$$

Para conformar la palabra codificada $c(x)$, es necesario trasladar el polinomio $m(x)$ de orden $k-1$ y conformar un nuevo polinomio de orden $n-1$, denominado $p(x)$, el traslado se logra mediante la operación descrita en (2.2) [7-8].

$$p(x) = m(x) \cdot x^{n-k} = m_{k-1}x^{n-1} + m_{k-2}x^{n-2} + \dots + m_1x^{n-k+1} + m_0x^{n-k} \quad (2.2)$$

Al final de $p(x)$ se inserta la información de redundancia representada por el polinomio $R(x)$ que corresponde al residuo de la división entre los polinomios $p(x)$ y $g(x)$, como se indica en (2.3) [7-8].

$$R(x) = p(x) \text{ mod } g(x) \quad (2.3)$$

El grado del polinomio generador $g(x)$ es $n-k$ y sus raíces están definidas mediante la ecuación (2.4), para el código RS(n,k), estas raíces se establecen a partir del elemento primitivo α del GF(2^m) [7-8].

$$g(x) = \prod_{i=1}^{n-k} (x - \alpha^i) \quad (2.4)$$

Finalmente, se obtiene el polinomio de información codificada $c(x)$, el cual es de orden $n-1$ y contiene n símbolos como se indica en (2.5).

$$\begin{aligned} c(x) &= p(x) + R(x) \\ c(x) &= c_{n-1}x^{n-1} + c_{n-2}x^{n-2} + c_{n-3}x^{n-3} + \dots + c_1x^1 + c_0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.1.2. Influencia del Canal de Transmisión

El canal de comunicaciones modifica las señales transmitidas que en este capítulo son representadas por el polinomio $c(x)$, de tal manera que la información a la entrada del receptor debe ser procesada para minimizar el impacto de los factores propios del canal sobre la señal transmitida. Las señales del canal de comunicaciones que inciden en la señal codificada son representadas por el polinomio $e(x)$ y la señal a la entrada del receptor está representada por el polinomio $r(x)$, el cual es afectado por el polinomio de error como se indica en (2.6) [7-9].

$$r(x) = c(x) + e(x) \quad (2.6)$$

2.1.3. Etapa de Decodificación RS

El proceso de decodificación se inicia al recibir la palabra $r(x)$, el decodificador RS(n,k) verifica inicialmente si la palabra recibida se encuentra en el conjunto de palabras de código válidas, de no ser así, se considera que se ha modificado la información transmitida, debido a la transmisión de las señales sobre el canal de comunicación. Esta etapa de procesamiento del decodificador se denomina detección del error.

Si se detectan símbolos erróneos en $r(x)$, el decodificador inicia el proceso de recuperación de la palabra original, a partir de $r(x)$, esta etapa se conoce como corrección del error, la cual consiste en localizar los símbolos erróneos en $r(x)$ y los valores de error correspondiente a cada error detectado [7-9]. Posteriormente el decodificador recupera la señal a partir de las posiciones y los valores de error determinados. En la figura 2.5 se presentan las fases del proceso de decodificación RS descritas anteriormente.

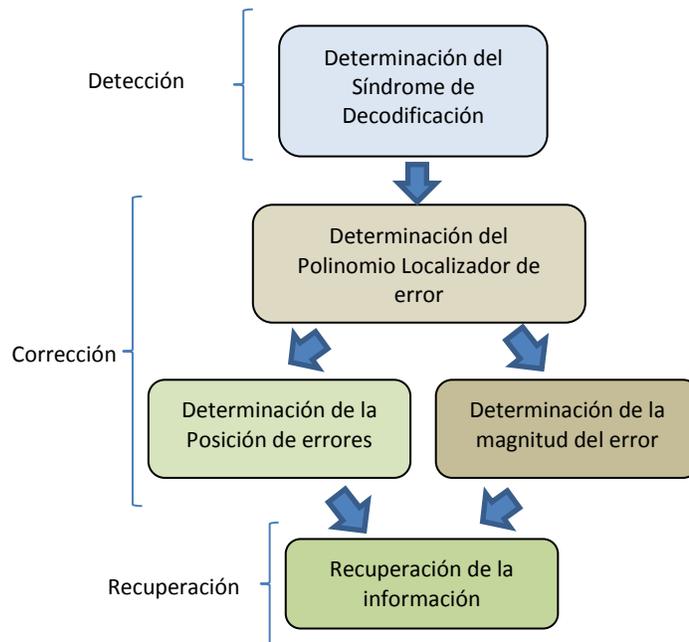


Figura 2.5. Fases del proceso de decodificación RS [propia autoría]

El cálculo del síndrome corresponde a la etapa de detección de errores, con esta información, mediante los algoritmos Euclidiano ó Berlekamp, se determinan los polinomios localizador de error $\sigma(x)$ y de valor de error $\omega(x)$. Posteriormente, se emplea el método de búsqueda de Chien para determinar las raíces de $\sigma(x)$, que dan información de las posiciones de los errores que contenga la palabra que llega al receptor al obtener su inverso. También, mediante el algoritmo de Forney se encuentran los valores o las magnitudes de los errores [7-9].

Finalmente, conocidos la posición de error y su valor, se conforma el polinomio de error $e(x)$ y se recupera la palabra de código RS transmitida $c(x)$, como se indica en la ecuación (2.9), aplicando propiedades de $GF(2^m)$ y reemplazando (2.8) en (2.9). Al tener la palabra codificada $c(x)$ se puede obtener la palabra de información original $m(x)$ [7-8].

$$\begin{aligned}
 r(x) + e(x) &= c(x) \\
 c(x) + e(x) + e(x) &= c(x) \\
 c(x) &= c(x)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

En el proceso de detección se puede dar el caso en que las variaciones que ha sufrido la palabra $c(x)$ original, por influencia del canal es tal que, se ha obtenido a la entrada del receptor una palabra que pertenece a las palabras de código válidas, aquí el decodificador RS asume que la palabra recibida no ha sufrido cambios, por tanto, el decodificador RS no puede recuperar la señal original y entrega al usuario una palabra errónea [8].

Otro caso en que no se puede corregir errores, se presenta cuando la capacidad de corrección de errores del código RS, (condición 3, sección 2.1), es menor a la cantidad de errores presentados en $r(x)$. En este caso, el decodificador puede identificar que existe error en la palabra recibida, pero no lo puede corregir [8].

Como se indicó anteriormente, las diferentes clases de códigos RS se originan por los algoritmos utilizados en las etapas del proceso de decodificación. Por tanto, en las siguientes secciones de este documento, se describen los decodificadores seleccionados para evaluar el desempeño del sistema punto a punto basado en la tecnología XG-PON, terminando con la comparación de las diferencias existentes entre ellos. Es necesario resaltar que, el proceso de codificación dado en el transmisor es el mismo para todos los codificadores RS implementados en este proyecto de investigación.

En el anexo E se presenta un ejemplo de codificación y decodificación para detección y corrección de errores utilizando el código RS(7,3), utilizando las operaciones requeridas dentro del campo finito GF(8).

2.2. DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO EUCLIDIANO

En esta sección se describen las operaciones requeridas en las fases detección, corrección de error y recuperación de la palabra transmitida, teniendo en cuenta el comportamiento del decodificador RS(n,k) que incluye el algoritmo Euclidiano.

2.2.1. Proceso de Detección de Error

En la conformación de la palabra codificada $c(x)$ inciden las raíces del polinomio generador $g(x)$, por tanto, el proceso de evaluar estas raíces en la palabra recibida $r(x)$ por el decodificador, permite determinar si esta palabra ha sido modificada por el canal de comunicaciones. Este proceso se denomina cálculo del síndrome y está dado por la expresión (2.8) [7-9].

$$S_i = r_{n-1}\alpha^{(n-1)i} + r_{n-2}\alpha^{(n-2)i} + r_{n-3}\alpha^{(n-3)i} + \dots + r_1\alpha^{(1)i} + r_0, \text{ donde } : 1 \leq i \leq n - k \quad (2.8)$$

Si todos los valores $S_i = 0$, para $1 \leq i \leq n - k$, el decodificador interpreta que la palabra recibida no ha sufrido modificaciones, en el caso en que $S_i \neq 0$ para cualquier caso de i , el decodificador interpreta que la palabra transmitida ha sido modificada por efectos del canal e inicia la etapa de corrección de errores. El polinomio síndrome está definido por la expresión (2.9) [8-9].

$$S(x) = S_{n-k}x^{n-k-1} + S_{n-k-1}x^{n-k-2} + \dots + S_2x^1 + S_1 \quad (2.9)$$

El objetivo del decodificador es encontrar los valores y las posiciones de error que le permiten recuperar $c(x)$, el síndrome ofrece la información inicial de estos valores, como lo indica la expresión (2.10) [8-9].

$$\begin{aligned}
r(x) &= c(x) + e(x) \\
r(\alpha^1) &= c(\alpha^1) + e(\alpha^1) = e(\alpha^1) = S_1 \\
r(\alpha^2) &= c(\alpha^2) + e(\alpha^2) = e(\alpha^2) = S_2 \\
&\dots \\
r(\alpha^{n-k}) &= c(\alpha^{n-k}) + e(\alpha^{n-k}) = e(\alpha^{n-k}) = S_{n-k}
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

2.2.2. Determinación de los Polinomios de Valor y Posición de error

Para determinar los polinomios de posición del error y valor del error, $\sigma(x)$ y $w(x)$, respectivamente, en el proceso de corrección de errores, el decodificador RS(n,k) utiliza el algoritmo Euclidiano, a partir de la información del síndrome. El algoritmo consiste en una serie de divisiones sucesivas, que permiten encontrar los polinomios de interés residuos y cocientes, dentro de las condiciones de capacidad de corrección de errores del codificador t, que se controla mediante el grado del polinomio residuo de las divisiones realizadas a partir del síndrome y del polinomio x^{2t} . La figura 2.6 representa el diagrama de flujo realizado a partir de la información dada en [7-13], donde se relacionan las condiciones de inicio en los polinomios y de las operaciones que deben realizarse para encontrar $\sigma(x)$ y $w(x)$. Al tener los datos de salida $r_j(x)$, $a_j(x)$ y $b_j(x)$ se debe observar que se cumpla la condición dada por la expresión (2.11), según [7-13].

$$r_j(x) = a_j(x)r_{-1}(x) + b_j(x)r_0(x) \tag{2.11}$$

2.2.3. Determinación de las Posiciones de Error

Las posiciones de error están relacionadas con las raíces del polinomio de posición, es decir, los valores de $x = \alpha^i$ para $i = 0, 1, \dots, n - 1$, que conforman la base del campo finito $GF(2^m)$ para los que $\sigma(x) = 0$; al proceso de encontrar las raíces del polinomio de posición de error se denomina búsqueda de Chien. Los inversos de las raíces de $\sigma(x)$, dan información de las posiciones en donde existen diferencias entre los polinomios $r(x)$ y $c(x)$ [1- 9]. Los valores de error se obtienen a partir de la información dada por el algoritmo Chien, donde los inversos de las raíces del polinomio encontradas, dan información de las posiciones de error, las cuales se pueden determinar en la expresión exponencial de estos datos, donde la posición corresponde al exponente de esta expresión.

2.2.4. Determinación de los Valores de Error

Mediante el algoritmo Forney y la información alcanzada por el algoritmo de búsqueda de Chien, se determinan los valores de los errores, expresados mediante Y_i . El algoritmo Forney dado en la expresión (2.12), permite determinar los valores de error al evaluar las raíces inversas del polinomio de posición en el cociente entre los polinomios de valor de error y la derivada del polinomio de posición de error, donde v indica el número máximo de errores que se ha podido detectar [7-13].

$$Y_l = \frac{\omega(X_l^{-1})}{d(X_l^{-1})} \quad \forall l = 1, 2, \dots, v \quad (2.12)$$

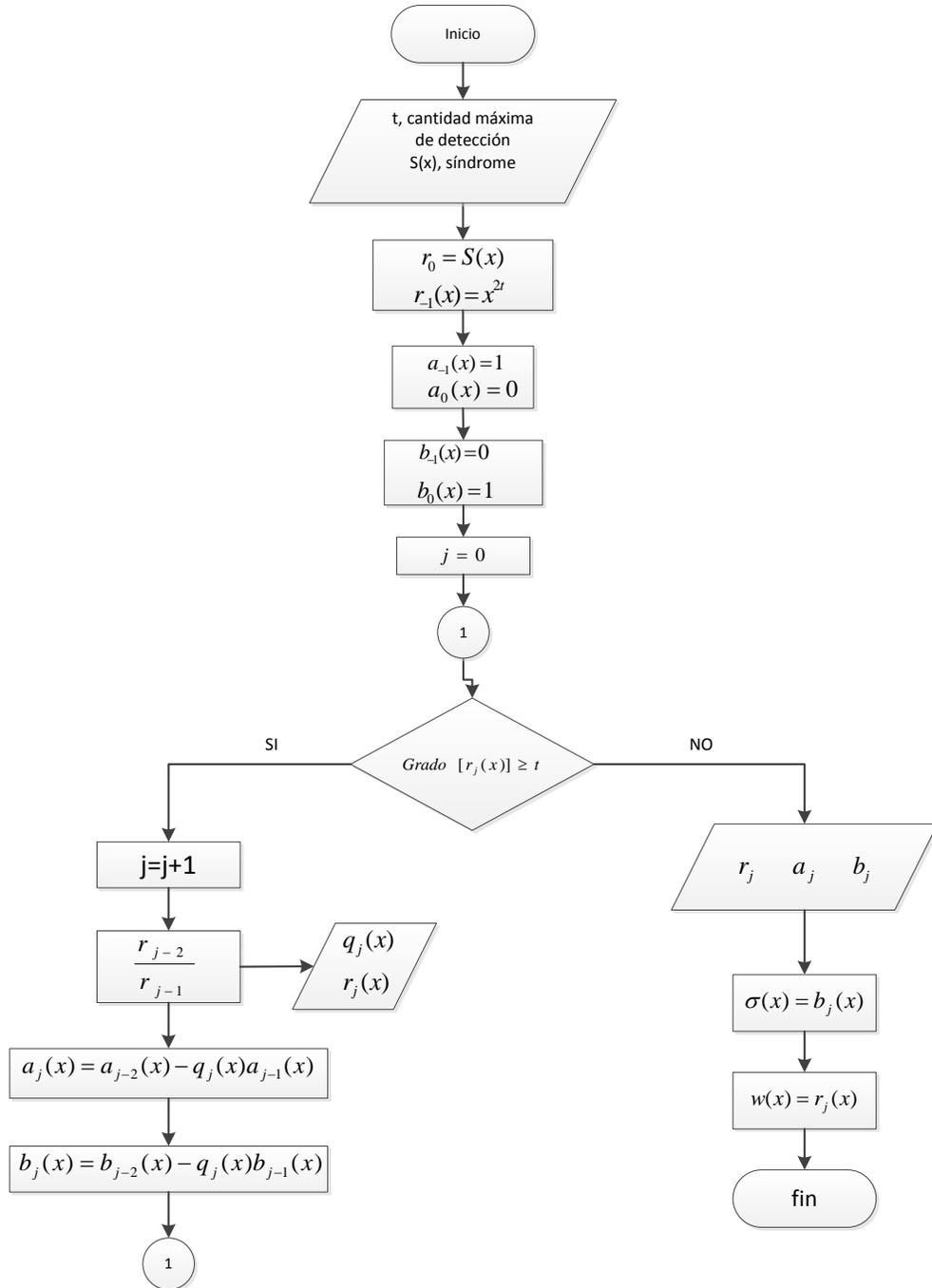


Figura 2.6. Diagrama de flujo del algoritmo Euclidiano [7-13]

2.2.5. Correcciones de Error

Obtenidos los valores y las posiciones de los errores, se conforma el polinomio de error dado por $e(x)$ y con esta información se recupera la palabra transmitida, aplicando (2.7) con operaciones en $GF(2^m)$ [7]

En el anexo E se presenta un ejemplo de aplicación del proceso de codificación y decodificación utilizando el algoritmo Euclidiano con el código RS(7,3), que puede tomarse en cuenta para cualquier código RS(n,k) que incluye el algoritmo Euclidiano.

2.2.6. Modelo del Codificador RS(n,k) que Incluye el Algoritmo Euclidiano.

Adaptando la metodología de investigación propuesta para el desarrollo de este proyecto de investigación, se obtiene el modelo del codificador – decodificador RS(n,k) que utiliza el algoritmo Euclidiano.

En el anexo F, se encuentra de forma detallada la conformación del modelo que permite entender las funciones del codificador - decodificador RS(n,k) que incluye el algoritmo Euclidiano. También se describe el código implementado utilizando la herramienta de simulación Matlab R2010a, facilitada por el grupo GITA de la Universidad de Antioquia

A continuación, en la figura 2.7, se presenta el modelo general del código RS(n,k) obtenido, que incluye el algoritmo Euclidiano. El bloque análisis de desempeño se enfoca en dos aspectos, determinar la BER frente a las variaciones de las condiciones del canal como relación señal a ruido (*SNR, signal noise rate*) cuando se seleccionó el canal es AWGN como escenario de prueba inicial. Posteriormente el canal de comunicaciones se adapta a las condiciones de operación del nivel físico de la tecnología XG-PON.

Determinar el tiempo de ejecución del proceso de decodificación es otro aspecto en que se centra el proceso de análisis de desempeño, debido a que este aspecto se relaciona con los recursos computacionales.

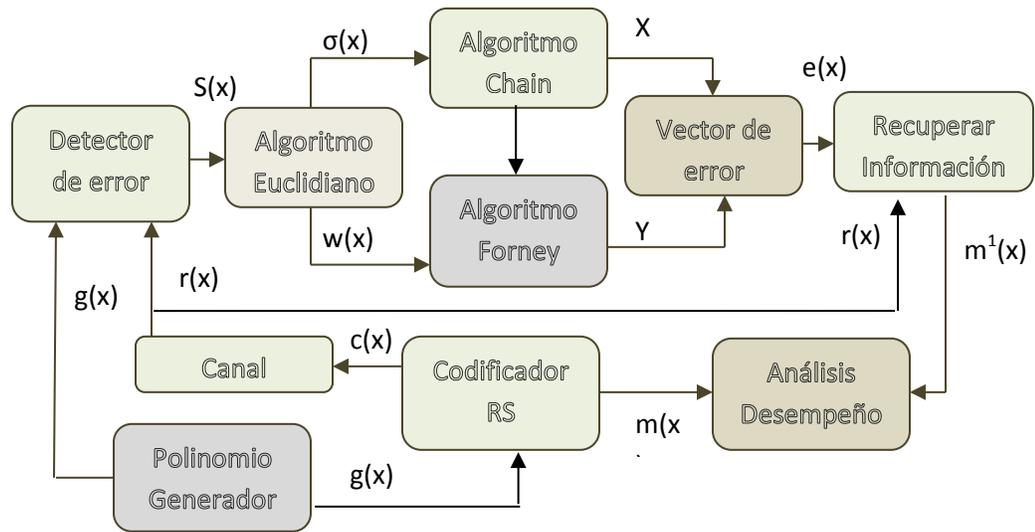


Figura 2.7. Modelo general del código RS(n,k) que incluye algoritmo Euclidiano [autoría propia]

2.3. DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO BERLEKAMP MASEY

El codificador RS que incluye el algoritmo Berlekamp Masey es ampliamente utilizado en diferentes tecnologías como Wimax, x-DSL, DVB-T, ISDB-T, G-PON, NG-PON, por su capacidad en la detección y corrección de errores y también por el menor tamaño requerido en el hardware utilizado para su implementación, a pesar del alto consumo de potencia y requerimientos de almacenamiento, por tanto, la búsqueda de soluciones a estas condiciones de funcionamiento es de interés en los procesos de investigación actuales.

Las diferencias principales entre el decodificador que utiliza el algoritmo Berlekamp Masey y el decodificador que utiliza el algoritmo Euclidiano presentadas en la tabla 2.2, se encuentran en el proceso para obtener los polinomios de posición y de magnitud de error, en el decodificador descrito en la sección 2.2, se utiliza el algoritmo Euclidiano para este propósito y en este decodificador se utiliza el algoritmo Berlekamp Masey y la operación descrita en la expresión (2.13) para obtener el polinomio de posición y de valor de error respectivamente.

$$\omega(x) = S(x)\sigma(x)\text{mod}(x^{2t}) \quad (2.13)$$

Tabla 2.2. Semejanzas y diferencias entre el decodificador que utiliza el algoritmo Berlekamp Masey y el decodificador que utiliza el algoritmo Euclidiano [7-13]

Proceso de decodificación que:	Obtención del síndrome	Obtención de polinomio de posición de error	Obtención de polinomio de valor de error	Obtención de posición de error	Obtención de valor de error	Obtención de polinomio de error
Incluye algoritmo Euclidiano	Proceso dado por las expresiones (2.8) (2.9)	Mediante Algoritmo Euclidiano	Mediante Algoritmo Euclidiano	Algoritmo Chain	Algoritmo Forney	A partir de valores y posiciones de error
Incluye algoritmo Berlekamp	Proceso dado por las expresiones (2.8) (2.9)	Mediante Algoritmo Berlekamp	Proceso dado por la expresión (2.13)	Algoritmo Chain	Algoritmo Forney	A partir de valores y posiciones de error

2.3.1. Polinomio de Posición de Error

El polinomio de posición de error se determina mediante el algoritmo Berlekamp Masey a partir de su interacción con el polinomio síndrome. Inicialmente se define el término discrepancia, como la relación obtenida por la interacción $j - 1$ del LFSR, como se presenta en (2.14), (2.15) y (2.16), dadas en [13].

$$\Delta_j = S_j - \tilde{S}_j \quad (2.14)$$

$$LFSR = \tilde{S}_j = -\sum_{i=1}^{L_j-1} \sigma_i S_{j-i} \quad (2.15)$$

$$\Delta_j = S_j + \sum_{i=1}^{L_j-1} \sigma_i^{j-1} S_{j-i} \quad (2.16)$$

La figura 2.18 presenta el diagrama de flujo del algoritmo Berlekamp Masey, con el cual se obtiene el polinomio de posición de error $\sigma(x)$, en este diagrama se utiliza la variable u , como la iteración j donde ocurre un cambio en la posición L del Síndrome y en el polinomio de conexión LFSR. Al igual que en el algoritmo Euclidiano, el número de divisiones sucesivas está limitado por la capacidad de corrección de errores del codificador utilizado, esto se observa en el grado del polinomio $r(x)$, dado en el algoritmo por j .

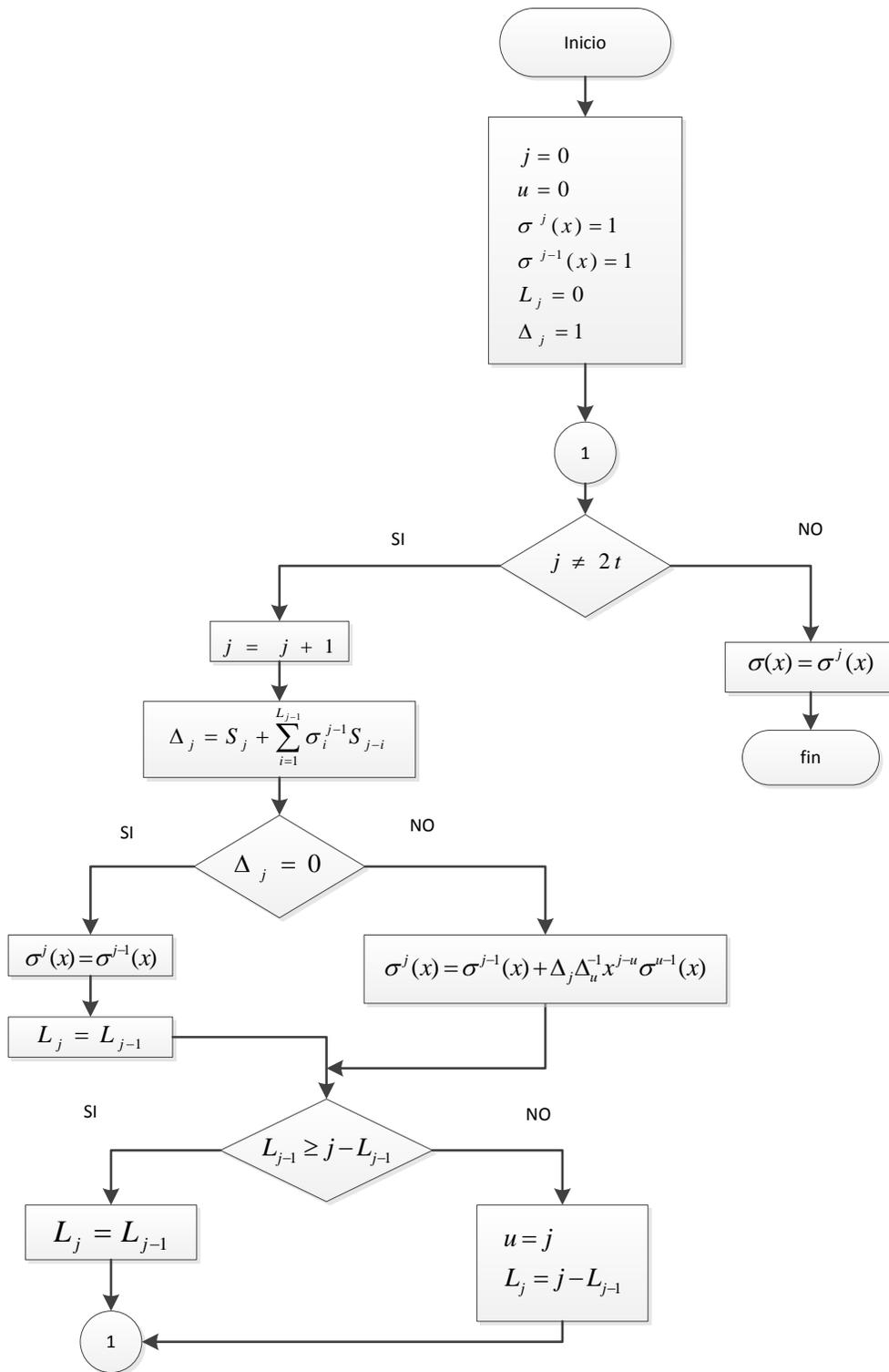


Figura 2.8. Algoritmo Berlekamp Masey [13]

2.3.2. Modelo del Decodificador RS(n,k) que Utiliza el Algoritmo Berlekamp Masey

El software de simulación Matlab R2010.a, utilizado para la evaluación inicial de los decodificadores RS, implementa mediante funciones los procesos de codificación y decodificación RS(n,k) que incluyen el algoritmo Berlekamp Masey [14], por tanto la implementación del código RS que incluye el algoritmo Berlekamp, en este proyecto de investigación, se reduce al uso de funciones generales dadas por Matlab, para la codificación, el canal AWGN y la decodificación, como se muestra en el anexo H.

El proceso de análisis de desempeño consiste en analizar la BER frente a los cambios en las condiciones del canal de comunicaciones. El tiempo no se evalúa debido a que no se conocen las funciones ni ciclos internos utilizados para implementar los procesos de codificación y decodificación.

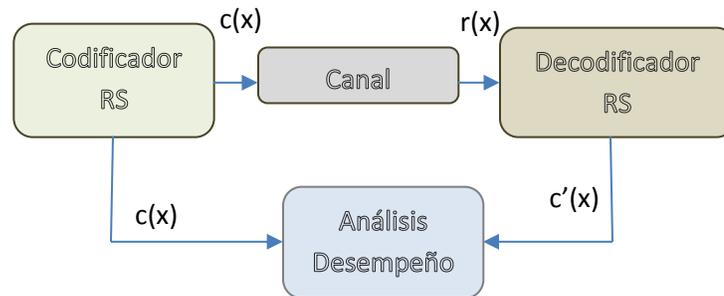


Figura 2.9 Modelo del codificador RS que utiliza el algoritmo Berlekamp Masey [propia autoría]

2.4. DECODIFICACIÓN RS QUE INCLUYE INFORMACIÓN ERASURE

Un decodificador que incluye información *erasure* se apoya en los datos entregados por el demodulador para realizar las fases de detección y corrección de errores. Un demodulador recibe la señal modulada que ha sido afectada por el canal de comunicaciones, cuando el demodulador detecta que la señal es poco fiable, entrega esta información al decodificador RS, y es manejada como información *erasure* [6-7].

Las constelaciones dan información de amplitud y fase al demodulador, el transmisor modula la señal y esta puede ser interpretada mediante el diagrama de constelaciones como se indica en la figura 2.10 a, el canal de comunicaciones afecta la señal y en el diagrama de constelaciones del demodulador se interpreta esta incidencia en los cambios de magnitud y fase de la señal original, como se observa en la figura 2.10 b [15].

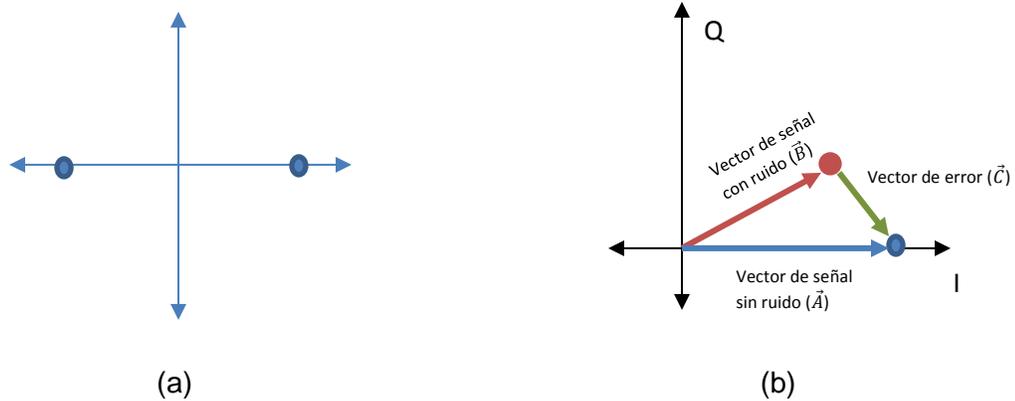


Figura 2.10. (a) Constelación a la salida transmisor. (b) Constelación afectada por el canal de comunicaciones [15].

Se aprovechan las ventajas de la teoría de vectores para entender el proceso de recuperación de la señal original en el receptor. Teniendo el vector de la señal recibida con ruido \vec{B} , se puede obtener la información de error \vec{C} mediante el proceso de decodificación RS(n,k), al tener \vec{B} y \vec{C} se recupera la señal original \vec{A} , según la expresión (2.17).

$$\vec{A} = \vec{B} + \vec{C} \quad (2.17)$$

Todas las señales pueden ser afectadas por el canal de comunicaciones, pero las señales que están por fuera del área de detección del demodulador pueden ser tomadas como señales no fiables, y estas son las que se clasifican como información *erasure*. El criterio denominado tasa de error de modulación (*MER, modulation error rate*) es tenido en cuenta en el proceso de detección y corrección de errores [15].

La MER es una medida de la capacidad de demodulación del receptor y consiste en la relación de potencias de la señal ideal \vec{A} y de la señal de error \vec{C} , como se indica en (2.18). La potencia de las señales es medida como la suma de la magnitud al cuadrado de las componentes I y Q de los vectores, y puede ser también interpretada como una medida de la SNR [15].

$$MER = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n A_{I_i}^2 + A_{Q_i}^2}{\sum_{i=1}^n C_{I_i}^2 + C_{Q_i}^2} \right) \quad (2.18)$$

Según [6], si en un sistema de comunicaciones se presentan v errores y f datos *erasure*, el decodificador puede corregir hasta $2t$ elementos si se cumple la condición (2.19):

$$2v + f \leq 2t \quad (2.19)$$

El procedimiento de detección y corrección de errores y datos *erasure*, consiste en los siguientes pasos, según [6-9]:

1. Obtener el polinomio localizador de datos erasure $\tau(x)$, a partir de la información dada por el demodulador. Por ejemplo, si el decodificador recibe la información que existen $f=2$ datos no fiables correspondientes a las posiciones x^n y x^m , a partir de la raíz ó elemento primitivo α del GF(q), se conforman los valores $Y_1 = \alpha^n$ y $Y_2 = \alpha^m$, con los cuales se obtiene el polinomio $\tau(x)$, como se indica en (2.20).

$$\tau(x) = \prod_{i=1}^f (1 - Y_i x) \quad (2.20)$$

2. Conformar la nueva palabra recibida $\tilde{r}(x)$, eliminando las posiciones de elementos erasure, colocando los valores de las posiciones n y m en cero.
3. Determinar el síndrome sobre $\tilde{r}(x)$, evaluando las raíces del polinomio generador $g(x)$ y se conforma el polinomio $S(x)$ de acuerdo con (2.11).
4. Conformar el polinomio síndrome modificado $\tilde{S}(x)$, a partir de (2.21), que contiene la información de posiciones de datos no fiables.

$$\tilde{S}(x) = \tau(x)S(x) \text{ mod } x^{2t} \quad (2.21)$$

5. Utilizar el algoritmo Euclidiano para encontrar los polinomio de posición y de magnitud de error $\sigma(x)$ y $w(x)$, respectivamente. Para este algoritmo, la condición inicial r_0 se establece con el síndrome modificado, $r_0 = \tilde{S}(x)$ y las condiciones de finalización del ciclo interno del algoritmo están dadas por (2.22):

$$\text{grado}[r_j(X)] \leq \left\{ \begin{array}{l} t + \frac{f}{2}, \quad \text{si } f \text{ es par} \\ t + \frac{f-1}{2}, \quad \text{si } f \text{ es impar} \end{array} \right\} \quad (2.22)$$

6. Obtener las raíces del polinomio de posición mediante el algoritmo Chien y las posiciones de errores, a partir del inverso de las raíces del polinomio $\sigma(x)$. Hasta el momento se tiene información de las v posiciones de los errores dadas por X_v^{-1} y de las f posiciones de datos erasure, dadas por Y_f .

7. Determinar los valores de cada uno de estos elementos, mediante los siguientes pasos:

- Se conforma el polinomio que da información de las posiciones de error y de datos erasure (2e) como se indica en la expresión (2.23), aunque en el algoritmo Forney se utiliza la derivada de este polinomio.

$$\sigma_{2e} = \tau(x)\sigma(x) \quad (2.23)$$

- Se consideran estos datos para encontrar las magnitudes de los errores E y de los datos *erasure* F , mediante el algoritmo Forney modificado, como se indica en (2.24) y (2.25)

$$E_v = \frac{W(X_v^{-1})}{\sigma'_{2e}(X_v^{-1})} \quad (2.24)$$

$$F_f = \frac{W(Y_f)}{\sigma'_{2e}(Y_f)} \quad (2.25)$$

8. Encontrar el vector de error, el cual está dado por (2.26), teniendo en cuenta la información de posición y magnitud de los errores y de los datos *erasure*.

$$e(x) = E_v X_v^{-1} + F_f Y_f \quad (2.26)$$

9. La señal que estima el decodificador RS con información *erasure* está dada por el polinomio $c_e(x)$, aplicando (2.27).

$$c_e(x) = \tilde{r}(x) + e(x) \quad (2.27)$$

La figura 2.11 presenta el esquema del modelo de codificación y decodificación RS(n,k) con información *erasure* que incluye el algoritmo Euclidiano [6-9].

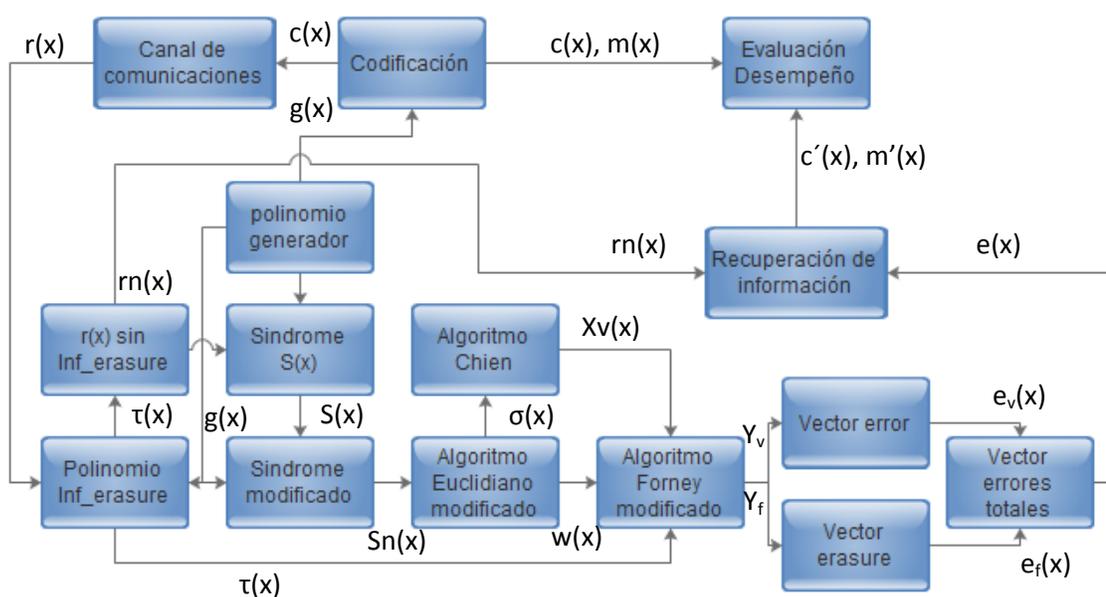


Figura 2.11. Modelo general del proceso de codificación y decodificación RS(n,k) con información *erasure* que incluye el algoritmo Euclidiano [autoría propia]

En el anexo I se detalla el modelo del decodificador RS que utiliza el algoritmo Euclidiano e información *erasure*. También se presenta el código de implementación del software desarrollado.

2.5 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

La evaluación del desempeño de los sistemas de comunicaciones que incluyen los esquemas de codificación RS se realiza mediante el análisis de diferentes parámetros que permiten observar su comportamiento, en este trabajo de investigación se analiza la incidencia de los esquemas de decodificación RS mediante el planteamiento de diferentes escenarios de simulación, que consiste en establecer parámetros tanto del sistema de comunicaciones como de los esquemas de decodificación. En la tabla 2.3 se listan los parámetros que inciden en el comportamiento de un sistema de comunicaciones que integra el esquema de codificación RS.

Tabla 2.3. Parámetros de análisis de desempeño

Signo	Descripción	Sistema	Codificación
n	Longitud de la palabra codificada, incide en la capacidad de corrección de errores		X
k	Longitud de la palabra de información. Incide en la capacidad de corrección de errores		X
$R=k/n$	Tasa de codificación, da una idea de cuánto overhead se está manejando, entre mayor es el valor de R menos información de redundancia maneja el sistema.		X
$t=(n-k)/2$	Capacidad de corrección de errores. Tiene un límite y depende de la información de redundancia.		X
E_b/N_0	Relación de potencia de la señal y la potencia de ruido, en términos de energía de bit y densidad espectral de ruido.	X	
BER	Tasa de error de bit, da información sobre los bits no recuperados frente a los enviados.	X	
R_b	Velocidad de transmisión, incide en el ancho de banda	X	
M	Esquema de modulación. Permite diferenciar las características de los esquemas de modulación. Caracteriza de esta manera el transmisor.	X	
D_n	Algoritmo de Decodificación. Diferentes esquemas de decodificación RS		X
T	Tiempo de ejecución, se hace énfasis en el tiempo que utiliza en decodificador para realizar las tareas de detección y corrección de errores.		X
G	Ganancia de Codificación. Permite observar la potencia en que deben operar los transmisores para un ruido y BER determinados, al trabajar con codificadores RS distintos.		X

La combinación estratégica de estos parámetros, permite observar el desempeño del sistema de comunicaciones e identificar cuáles permiten mejores condiciones de operación.

En la figura 2.12 se presenta el comportamiento de los códigos RS(31,17) que incluyen el algoritmo Euclidiano y también de los códigos RS que además incluyen información *erasure* que representa el 60% y 80% de la información con errores que llega al receptor. Se puede observar que entre más información *erasure* se establezca, menos nivel de Eb/No se requiere, el código RS (31,17) con 85% de información *erasure* tiene una ganancia de codificación de 0,6 dB respecto al código RS(31,17) con 60% de información *erasure*, para una BER= 10^{-3} . Además, se puede observar que el código con un 80% de información *erasure* tiene un comportamiento semejante al código RS que incluye únicamente el algoritmo Euclidiano.

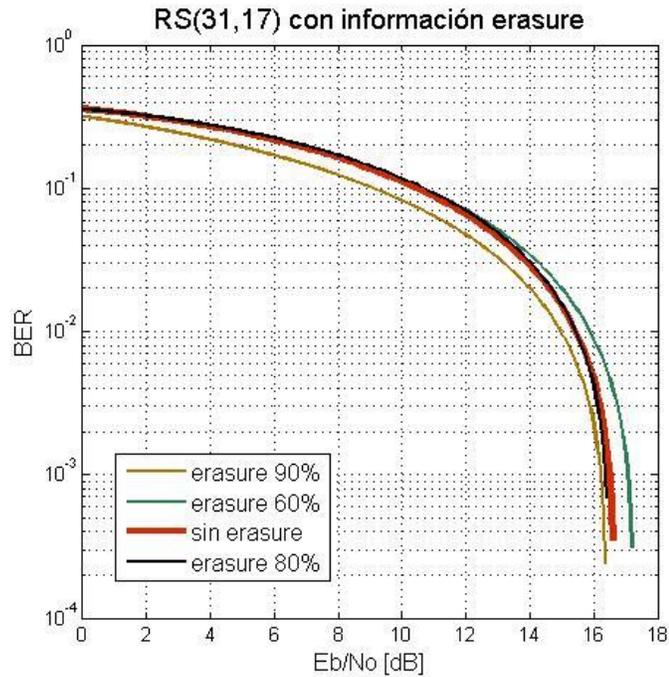


Figura 2.12. Comportamiento del código RS(31,17) que incluye algoritmo Euclidiano con y sin información *erasure*

Debido a los resultados anteriores, se puede afirmar que un sistema de comunicaciones bajo ruido AWGN requiere un modulador que pueda establecer información *erasure* con más del 80% de los símbolos errados para poder obtener ganancias de codificación mayores y justificar así el uso del código RS con información *erasure*.

También el tiempo de decodificación es un aspecto importante dentro del análisis del desempeño de los códigos RS, debido a que está muy relacionado con los recursos computacionales requeridos. Según la tabla 2.4 el código RS(31,17) que incluye el algoritmo Euclidiano utiliza menos tiempo para realizar el proceso de decodificación frente a los códigos RS(31,17) que incluyen información *erasure*, se puede observar que entre más información *erasure* utilizada, más tiempo se requiere en el proceso de decodificación.

Tabla 2.4. Tiempo de decodificación para RS(31,17) que incluye algoritmo Euclidiano con y sin información *erasure*.

RS(31,17)	Euclidiano	<i>Erase</i> 60%	<i>Erase</i> 80%
Tiempo [ms]	0,2642	0,3596	0,3936

A continuación, mediante la tabla 2.5 y la figura 2.13 se observa el comportamiento de un sistema de comunicaciones que incluye el codificador RS con los algoritmos de decodificación Berlekamp y Euclidiano con y sin información *erasure* bajo diferentes tasas de codificación y la incidencia del esquema de modulación BPSK y el canal con AWGN. El decodificador *erasure* opera con un 85% de información *de borrado*, se toman los datos para una BER=10⁻³.

Tabla 2.5. Eb/No para diferentes tasas de codificación y algoritmos de decodificación RS(31,k)

RS(n,k)	RS(31,7)	RS(31,11)	RS(31,15)	RS(31,19)	RS(31,23)	RS(31,27)
k/n	0,225806	0,354838	0,48387097	0,61290323	0,74193548	0,87096774
<i>Erase</i>	6,750	6,035	5,649	5,540	5,540	5,790
Berlekamp	6,860	6,160	5,750	5,460	5,460	5,920
Euclidiano	6,790	6,500	6,300	6,190	6,190	6,500

Se puede observar que el decodificador Berlekamp para diferentes tasas de codificación tiene una ganancia de codificación promedio de 0,53 dB respecto al decodificador Euclidiano, es decir, requiere menos relación Eb/No para alcanzar la misma BER=10⁻³.

También se puede observar que el sistema de comunicaciones que incluye el decodificador Euclidiano con información *erasure* requiere menos Eb/No que el sistema que incluye el decodificador Euclidiano sin información *erasure*, alcanzando una ganancia de decodificación promedio de 0,63 dB.

También se podría afirmar que, el decodificador Euclidiano con un 85% de información *erasure* se comporta de manera semejante al decodificador Berlekamp, se puede notar que su capacidad de corrección de errores es mayor que la presentada en el esquema RS-Euclidiano.

Es importante resaltar que para los tres decodificadores se requiere menos nivel de Eb/No cuando los esquemas de codificación RS operan con las tasas de codificación $\frac{k}{n} = 0,61$ y $\frac{k}{n} = 0,74$.

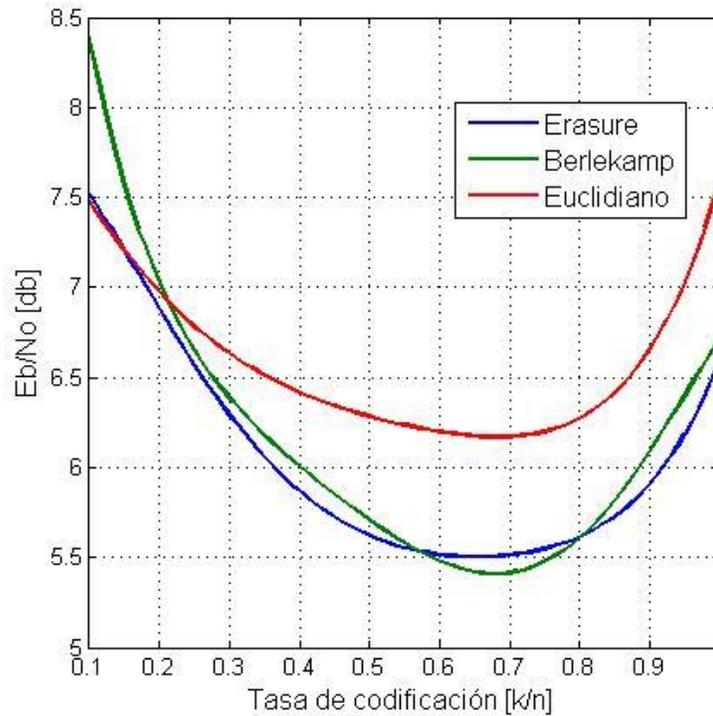


Figura 2.13. Comparación de los código RS(31,k) que incluyen los algoritmos Berlekamp, Euclidiano con y sin información *erasure*, para diferentes tasas de codificación

2.6. MODELO ESTADÍSTICO DE ANÁLISIS

El modelo de análisis del sistema banda base con codificador RS se caracteriza por una serie de factores que inciden sobre las señales de entrada, la respuesta de este sistema puede analizarse mediante las señales de salida, como se indica en la figura 2.14, teniendo en cuenta algunos parámetros estadísticos.

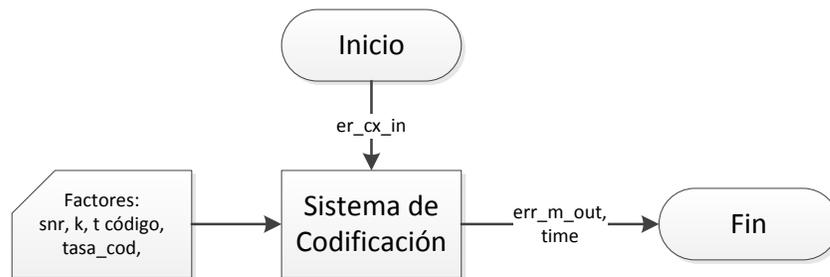


Figura 2.14. Modelo del sistema banda base con codificación [propia autoría]

El sistema evalúa las palabras codificadas que han sido modificadas por el ruido del canal (err_cx_in), debido a que la palabra de información (mx) es constante para cada caso de análisis. Los factores del sistema que inciden sobre la señal de información son relación señal a ruido (snr), clase de codificador (cod), longitud de palabra de información (k), tasa de codificación ($tasa_cod$) y capacidad de corrección de errores (t). Las señales a la salida que permiten evaluar el desempeño del sistema de codificación son tiempo de decodificación ($time$), errores en la palabra codificada (c_err_out) y errores en la palabra de información a la salida (m_err_out).

En la tabla 2.6 se muestran los valores que se tuvieron en cuenta para el modelo de análisis.

Tabla 2.6. Valores establecidos para el modelo de análisis

Parámetros	Valores establecidos
Codificador	Euclidiano Euclidiano con <i>erasure</i> Berlekamp
snr [dB]	10 – 12 - 14 - 16 - 18
Longitud palabra codificada n	255
Longitud de palabra de información k	247 – 239 – 223
Repeticiones por escenario	5 para cada escenario ¹²
Capacidad de corrección de errores t	$n-k/2$
Tasa de codificación $tasa_cod$	k/n

De acuerdo con el análisis estadístico multivariable MANOVA que Statgraphics ha arrojado sobre el modelo planteado, el comportamiento de la variable tiempo está estadísticamente relacionado con los factores tasa de codificación, clase de codificador y la relación señal a ruido, esta afirmación se basa en el indicador de probabilidad menor a 0.5 para una confianza del 95%, como se muestra en la figura 2.15, obtenida a través de Statgraphics.

¹² Este número se debe a que para este número de repeticiones y superiores empieza a estabilizarse la tendencia del modelo.

Análisis de Varianza para ntime

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,06459	8	0,133074	17,15	0,0000
Residuo	2,02521	261	0,00775941		
Total (Corr.)	3,08979	269			

Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
snr	0,549107	4	0,137277	17,69	0,0000
codificador	0,132629	2	0,0663145	8,55	0,0003
k	0,382853	2	0,191426	24,67	0,0000
Residuo	2,02521	261	0,00775941		
Total (corregido)	3,08979	269			

Figura 2.15. MANOVA para la variable time

El comportamiento de la variable cantidad de errores encontrados en la palabra de información está estadísticamente relacionada con los factores clase de codificador y la relación señal a ruido, como lo indica MANOVA por la probabilidad menor a 0.5, con un 95% de confianza, como se muestra en la figura 2.16.

Análisis de Varianza para error m_out

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	33415,7	6	5569,29	61,41	0,0000
Residuo	23852,0	263	90,692		
Total (Corr.)	57267,7	269			

Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
snr	32010,7	4	8002,67	88,24	0,0000
codificador	1405,03	2	702,515	7,75	0,0005
Residuo	23852,0	263	90,692		
Total (corregido)	57267,7	269			

Figura 2.16. MANOVA para la variable err_m_out

En el anexo J de este capítulo se presentan los resultados generados por la herramienta de análisis Statgraphics para el modelo estadístico planteado en esta sección del documento.

2.7. RESUMEN

El desarrollo de este capítulo junto con sus anexos, permite conocer las características de los campos finitos y su aplicación en los procesos de detección y corrección de errores. Adicionalmente, permite conocer las características principales de los decodificadores RS Berlekamp, Euclidiano y Euclidiano que incluye información *erasure*.

Este capítulo permite generar mediante simulación los procesos de codificación y decodificación de los esquemas RS Berlekamp, RS Euclidiano y RS Euclidiano con información erasure.

El proceso de decodificación para cada esquema se evalúa en un sistema banda base con canal AWGN, los datos son analizados mediante el modelo estadístico permitiendo observar que el tiempo de decodificación depende de factores como tasa de codificación, relación señal a ruido y clase de decodificador y que la capacidad de corrección de errores depende del esquema de decodificación utilizado y también de la relación señal a ruido del sistema. El esquema RS-Erasure mejora el desempeño del esquema RS-Euclidiano base, pero no supera el desempeño del decodificador RS-Berlekamp.

Este capítulo y los anexos relacionados dan evidencia del desarrollo de las actividades planteadas para las fases Análisis y Diseño e Implementación propuestas en la metodología para el desarrollo de este proyecto, que aportan al alcance del primer y segundo objetivo específico.

Bibliografía

- [1] T. Mitsui, K. Hara, M. Fujiwara, J. Kani, M. Todokoro y N. Yoshimoto. "Effect of Forward Error Correction on spectral sliced WDM-TDMA PON system". IEICE Electronics Express, Vol 9 No. 8, pág. 739-744. 2012.
- [2] E.M. Popovisi, P. Fitzpatrick. "Reed Solomon Codec for Optical Communications". International Conference on Microelectronics, vol. 2, Yugoslavia. 2012.
- [3] K.Y. Cho, A. Agata, Y. Takushima, Y.C. Chung. "Performance of Forward Error Correction Code in 10Gbps RSOA-Based WDM-PON". IEEE Photonics Technology Letters . Vol 22 No. 1. 2010
- [4] Recomendación UIT-T G.984-1, "Gigabit-capable passive optical networks. General characteristics", Marzo, 2008.
- [5] C, Lung Shih. "Soft IP Generator of Reed Solomon Codec for Communication System". Department of Electrical Engineering, National Central University. Taiwan. [2006]
- [6] J. Guerron, E. Rivera. "Análisis del desempeño a nivel físico del decodificador Reed Solomón que utiliza el algoritmo Euclidiano con capacidad de borradura". Proyecto de grado Universidad del Cauca 2010.
- [7] NASA Technical. "Tutorial on Reed Solomon Error Correction Coding". 1990.
- [8] El Khamy, M. Reed Solomon Related Codes. New Approaches to Performance Analysis and Decoding Algorithms. ISBN: 978-3-639-14948-7. VDM in USA. 2009
- [9] Wicker, S. Bhargava, V. Reed Solomon codes and Their Applications. ISBN: 0-7803-5391-9. IEEE, 1994.

- [10] M. Garcia. Construcción de Operadores Básicos sobre Campos Finitos GF (2). Tesis Doctoral. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México. 2004.
- [11] Lidl, R. Niederreiter Harald. Finite Fields. ISBN: 052139231. Cambridge University Press, 2003.
- [12] Mullen, Gary. Mummert, Carl. Finite Field and Applications. ISBN: 978-0-8218-4418-2. Editorial Board, 2000.
- [13] O. Muñoz, R. Castillo. "Análisis y evaluación del desempeño del decodificador Reed Solomon con el algoritmo Euclidiano". Proyecto de grado. Universidad de Cauca. 2008
- [13] Shparlinski, Igor. Finite Fields: Theory and Computation. The Meeting Point of Number Theory, Computer Science, coding Theory and Cryptography. ISBN:0-7923-5662-4. Lluwer Academics Publishers. 1999.
- [14] Mathworks, "RSDEC" [En línea]. Diponible: <http://www.mathworks.com/help/comm/ref/rsdec.html>
- [15] Mathworks. "MER". [En línea]. Disponible: <http://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.mer-class.html?searchHighlight=MER>.
- [16] B. Sklar. "Reed-Solomon Codes". Publicación. [En Línea]. Disponible: http://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/art_sklar7_reed-solomon/elementLinks/art_sklar7_reed-solomon.pdf. [Consultado enero 10, 2015].

CAPÍTULO 3

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN Y DISEÑO DE EXPERIMENTO

El análisis del desempeño a nivel físico del sistema XG-PON que incluye el código RS se realiza a nivel de simulación, mediante la integración de las aplicaciones desarrolladas en Matlab y VPIphotonics, como se muestra en la figura 3.1, este esquema sigue el modelo de sistema de comunicaciones punto a punto para los enlaces con dirección *downstream* y *upstream*, propuesto en el capítulo 1 de este documento.

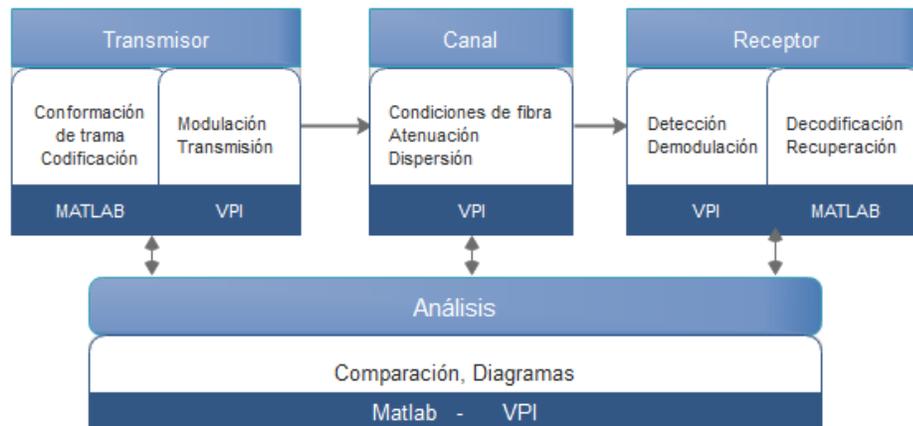


Figura 3.1. Modelo general de simulación del nivel físico de XG-PON

Las funciones del transmisor XG-PON, se implementan bajo simulación mediante la aplicación que se implementa utilizando el software Matlab, la cual, integra los bloques de conformación de trama, codificación y scrambler, entregando un vector de datos, que representa el formato eléctrico de la información banda base a nivel físico de XG-PON. Esta aplicación se complementa con la fase de transformación de datos al formato óptico mediante la modulación, desarrollada bajo VPIphotonics, con la cual también se puede establecer las condiciones del transmisor como la tasa de transmisión, codificación NRZ, ventana de operación, características del láser, entre otras.

Posteriormente, utilizando las ventajas de VPIphotonics, se implementan bajo simulación las características del canal de comunicaciones y se integra con la aplicación también desarrollada en VPI, que permite simular las funciones del receptor como detección de la señal óptica y demodulación, los datos de esta aplicación los recibe el bloque funcional decodificador RS implementado en Matlab, que está encargado de detectar y corregir los errores y recuperar la información.

La etapa de análisis se realiza aprovechando las capacidades de los paquetes de simulación de VPI y Matlab, debido a que se pueden obtener gráficos como diagramas de ojo y la BER vs longitud, que permiten el análisis del sistema teniendo en cuenta diversos factores que inciden sobre el nivel físico de la tecnología XG-PON.

Los factores del sistema de comunicaciones que inciden en su desempeño, están relacionados con la clasificación del ODN en N1, N2, E1 y E2 y con la dirección del enlace *upstream* y *downstream*. Esta clasificación incide en los parámetros de potencia del transmisor, sensibilidad del receptor, en la velocidad de transmisión, en la frecuencia de operación, en las condiciones de dispersión y atenuación, como se indicó en la información de la sección 1.4 de este documento. En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan las características de los sistemas de comunicaciones teniendo en cuenta la dirección de enlace y clasificación del ODN.

Tabla 3.1. Características del enlace *downstream* [1]

Red de distribución	N1	N2	E1	E2
Potencia Transmisión [dBm]	2 - 6	4 - 8 10.5 - 12.5	6 - 10	8 - 12 14.5 - 16.5
Perdidas del enlace [dB]	14 - 29	16 - 31	18 - 33	20 - 35
Distancia de la fibra [Km]	20 - 40			
Sensibilidad Receptor [dBm]	-28	-28 -21	-28	-28 -21
Factor de atenuación de fibra [dB/Km]	0.47			
Banda de operación [nm]	1575 - 1580			
Tasa de Bit [Gbps]	9.95328			
Pendiente de dispersión cromática [ps/nm ² × km]	0.0092			

Tabla 3.2. Características del enlace *upstream*[1]

Red de distribución	N1	N2	E1	E2
Potencia Transmisión [dBm]	2 - 7			
Perdidas del enlace [dB]	14 - 29	16 - 31	18 - 33	20 - 35
Distancia de la fibra [Km]	20 - 40			
Sensibilidad Receptor [dBm]	-27.5	-29.5	-31.5	-33.5
Factor de atenuación de fibra [dB/Km]	0.47			
Banda de operación [nm]	1260 - 1280			
Tasa de Bit [Gbps]	2.48832			
Pendiente de dispersión cromática [ps/nm ² × km]	0.0092			

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS PARA EL ANÁLISIS DE XG-PON

En esta sección, se describen los escenarios planteados para el análisis a nivel físico de la tecnología XG-PON, teniendo en cuenta la variación de los diferentes parámetros que inciden en su comportamiento.

1. **Escenario Básico.** Se define un escenario base *downstream* y un escenario base *upstream*, de XG-PON donde se evalúa el comportamiento del sistema sin la incidencia del esquema de codificación y decodificación RS.
2. **Escenario de Análisis de la Incidencia de la Longitud del Enlace.** La variación de la longitud es el aspecto que caracteriza este escenario. Inicialmente se toma como referencia el escenario básico, para cada uno de los enlaces con dirección *upstream* y *downstream*, en este escenario se mantiene constantes la potencia y la modulación del transmisor y sensibilidad del receptor y se modifican las características de longitud del enlace entre 20 - 40 km Para cada variación se evalúa la incidencia en el comportamiento de los tres decodificadores RS- Berlekamp, RS- Euclidiano y RS-*Erasure*. Las observaciones se centran en parámetros de BER y diagramas de ojo
3. **Escenario de Análisis de la Incidencia de la ODN.** En este escenario tanto para los enlaces con dirección *upstream* como *downstream* se analiza las condiciones de variación de la red de distribución, que implica también variaciones en condiciones de potencia del transmisor. Se mantiene la distancia fija en 20 km en el escenario básico y se modifican las pérdidas debidas a la red de distribución según las condiciones de ODN dadas en N1, N2, E1 y E2 en las tablas 3.2 y 3.3. de este documento. Para cada uno de los cuatro escenarios se analizan el desempeño teniendo en cuenta la BER y diagrama de ojo, al incluir en el sistema los decodificadores RS- Berlekamp, RS- Euclidiano y RS- *Erasure*.
4. **Escenario de Análisis de Dispersión Cromática.** En este escenario modifica sobre los escenarios básicos de *downstream* y *upstream*, el parámetro de tasa de transmisión de los enlaces. También se tiene en el transmisor un láser con gran ancho línea y un ancho de línea angosto, se analiza para cada caso la incidencia de tres esquemas de codificación nombrados anteriormente. Una variante de este escenario es al tener un transmisor con un láser de un gran ancho de línea se modifiquen las tasas de transmisión. Se analizará la incidencia de los tres esquemas de codificación RS, en este escenario.

5. **Escenario de Análisis de Modulación.** En este escenario se modifica el esquema de modulación definido para la tecnología XG-PON el cual es NRZ con modulación de amplitud por el esquema de modulación NRZ con DPSK. La comparación se realiza entre los sistemas con modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK con y sin la incidencia del sistema de codificación RS que incluye el algoritmo Euclidiano e información erasure.

En resumen se encuentran en esta propuesta de análisis dos escenarios generales: Escenario sin esquema de detección y corrección de errores y Escenario con esquema de detección y corrección de errores, donde se variarían aspectos como longitud del trayecto, parámetros de la ODN y parámetros de dispersión cromática, como se indica en la tabla 3.3. Los escenarios que incluyen codificación RS(n,k), se evaluarán con los esquemas que incluyen los algoritmos Berlekamp, Euclidiano y Euclidiano+Erasure.

Tabla 3.3. Escenarios seleccionados para el análisis de XG-PON

Escenario	General	Variaciones	Esquema RS(n,k)
1	Escenario XG-PON sin esquema de codificación – decodificación RS	Longitud - Modulación	
2		Variaciones de ODN	
3		Dispersión	
4	Escenario XG-PON con esquema de codificación – decodificación RS	Longitud - Modulación	Berlekamp Euclidiano Euclidiano + Erasure
5		Variaciones de ODN	
6		Dispersión	

A continuación se describen los escenarios planteados anteriormente, mediante bloques funcionales, de acuerdo con la metodología de investigación de Sistemas de Telecomunicaciones.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO BASE XG-PON SIN CODIFICACIÓN RS

3.2.1. Escenario Base XG-PON *Downstream* sin Codificación RS

Este escenario permite observar el comportamiento a nivel físico del enlace de comunicación que se establece entre el servidor (OLT) y el usuario (ONU), se caracteriza por no incluir la detección y corrección de errores en el enlace. En la tabla 3.4 se presentan las principales características seleccionadas para el nivel físico de este escenario.

Tabla 3.4. Características del enlace *downstream* [1]

Red de distribución	N1
Potencia Transmisión [dBm]	2
Perdidas del enlace [dB]	14
Distancia de la fibra [Km]	20
Sensitividad Receptor [dBm]	-28

Factor de atenuación de fibra [dB/Km]	0.47
Banda de operación [nm]	1575 – 1580
Tasa de Bit [Gbps]	9.95328
Pendiente de dispersión cromática [ps/nm ² × km]	0.0092

3.2.1.1. Transmisor

En esta sección se describen las características de los tres bloques principales que permiten establecer el transmisor sin codificación RS a nivel de simulación, para un enlace XG-PON downlink.

Bloque	Banda base Tiene como función generar la señal de información banda base del sistema <i>downstream</i> . Esta señal es conformada por medio de TDM a nivel eléctrico. Módulo implementado en Matlab.
Señal de entrada	Ninguna
Señal de salida	Señal banda base (sbb): vector (1,m) donde $m = \frac{1244160}{20} = 62208$ es el número bits que conforman la señal banda base. ¹³

Bloque	Scrambler Tiene como función aleatorizar la señal banda base. Módulo implementado en Matlab.
Señal de entrada	Sbb
Señal de salida	Señal banda base aleatorizada (sbba). Consiste en la señal banda base con aleatorización de acuerdo con el polinomio $x^{58} + x^{39} + 1$

Bloque	Transmisor NRZ Tiene como función generar la señal pasa banda del sistema XG-PON y adaptarla al canal óptico a partir de la señal NRZ. codificación: NRZ velocidad de 9,95328 Gbps potencia de salida: 2dBm banda de operación: 1575-1580 nm frecuencia central: 190,1 THz (1577,03 nm) modulación: amplitud tolerancia a la potencia óptica reflejada: >-15 dB rango de dispersión: 0 hasta -140 ps/nm
--------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

¹³ La disminución de la longitud de trama no incide en las características del enlace, debido a que se conserva la proporción del tiempo de trama, manteniendo de esta manera la velocidad del enlace tanto de subida como de bajada. La decodificación se realiza a partes de esta trama y este ejercicio se corre 20 veces para obtener los datos promedios correspondientes.

	Multiplexor WDM.
Señal de entrada	Sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasa banda con formato óptico.

El enlace *upstream* permite establecer la señal en el rango de longitud de onda dado entre 1575 - 1580 nm, de acuerdo con las condiciones de nivel físico. Además, una trama del enlace *upstream* tiene una duración de 125 μs y si la velocidad de transmisión es de 9,95328 *Gbps* se manejan 1244160 bits por trama, se establece para este escenario una tasa de muestreo de 4 muestras por bit. En la expresión (3.1), se obtiene el ancho de banda de la señal pasa banda, de acuerdo con las condiciones anteriores.

$$Bw = 4 \frac{\text{muestras}}{\text{bit}} * \frac{1244160 \text{ bit}}{125 \cdot 10^{-6} s} = 40.18 \text{ GHz} \quad (3.1)$$

Al implementar estas condiciones en la herramienta de simulación VPI, se encontró la limitación en el manejo de cantidad de muestras por bit, debido al tamaño del vector. Ante esta condición, se decide disminuir el tiempo de la ventana de 125 μs a 6.25 μs , esto implica que el vector de información sea reducido de 1244160 bits a 62208 bits, y establecer como tasa de muestreo 4 muestras por bit, como se indica en la expresión (3.2).

$$Bw = 4 * 9.95328 * 10^9 = 40.18 \text{ GHz} \quad (3.2)$$

En la figura 3.2 se presenta el esquema general del sistema transmisor para el enlace *downlink* del sistema XG-PON.

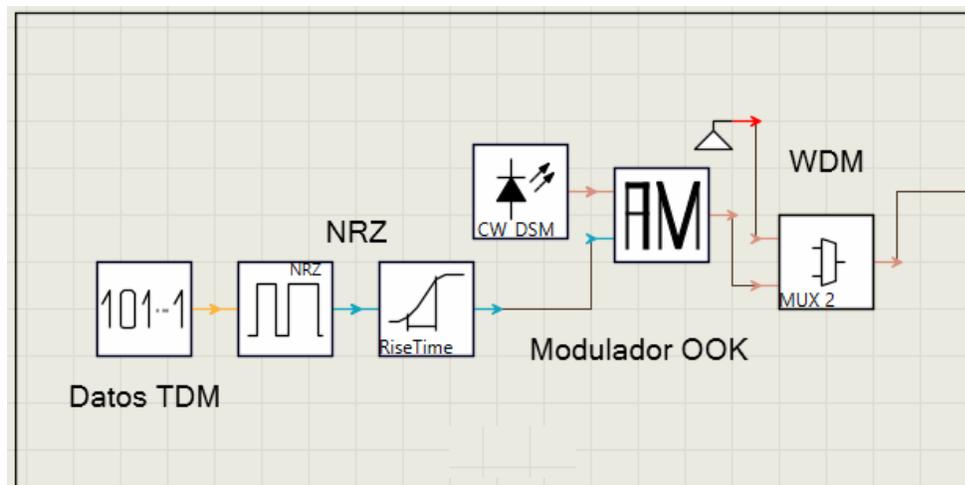


Figura 3.2. Esquema de Transmisión para el enlace Downlink de XG-PON [2][4]

3.2.1.2. Canal

Bloque	ODN Tiene como función representar las características de la red de distribución óptica. Longitud enlace: 20 km Red de distribución: 1: 64 Atenuación: 0,47 dB/Km Pérdidas de enlace: 14 dB Pendiente de dispersión cromática: 0.0092 [ps/nm ² ×km] Pérdidas de inserción en splitter: 2 dB
Señal de entrada	Sm
Señal de salida	Señal pasabanda afectada por el canal (sma).

La figura 3.3 presenta la ODN que está conformada por la fibra óptica, un módulo que representa las pérdidas del medio y la distribución mediante *splitters*.

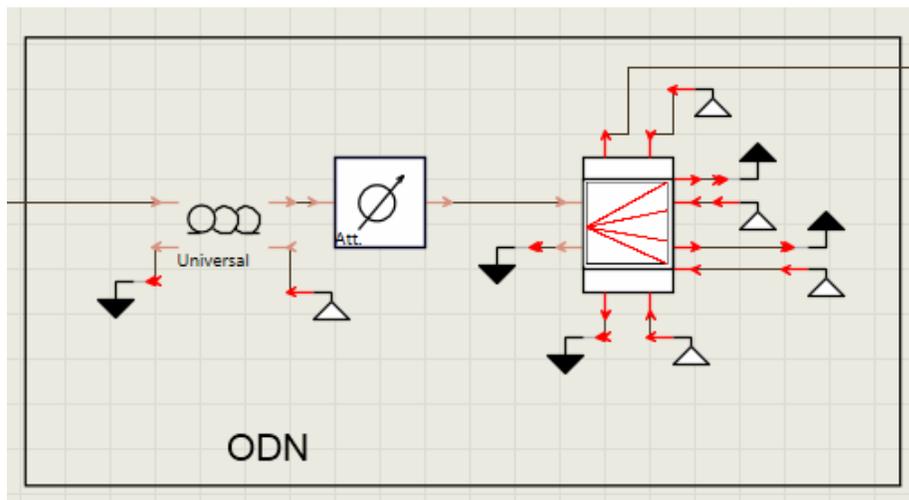


Figura 3.3. Esquema de la ODN en un sistema XG-PON para el enlace downlink[4]

3.2.1.3. Receptor

Bloque	Recepción NRZ Tiene como función obtener la señal banda base en la ONU del sistema XG-PON. Sensitividad: -28 dBm frecuencia central: 190,1 THz (1577,03 nm) demodulación: amplitud decodificación NRZ
Señal de entrada	Sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasabanda con formato óptico.

Bloque	Desaleatorizador Tiene como función aleatorizar la señal banda base
--------	-------------------------------------------------------------------------------

	recuperada.
Señal de entrada	Sbbar
Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbr): señal banda base recuperada sin el efecto del módulo scrambler. Vector de tamaño (1,m).

La configuración de los parámetros del receptor en la herramienta VPI, como el nivel de sensibilidad (P_s), tuvo en cuenta el ruido térmico (N_T), que relaciona según [3], los parámetros de responsividad (r), factor de calidad (Q), tasa de error de bit (BER), ancho de banda efectivo, en la expresión dada en (3.3).

$$N_T = \frac{rq}{\sqrt{B_{eff}Q}} P_s \quad (3.3)$$

En la figura 3.4 se presenta la implementación del receptor mediante simulación en VPI.

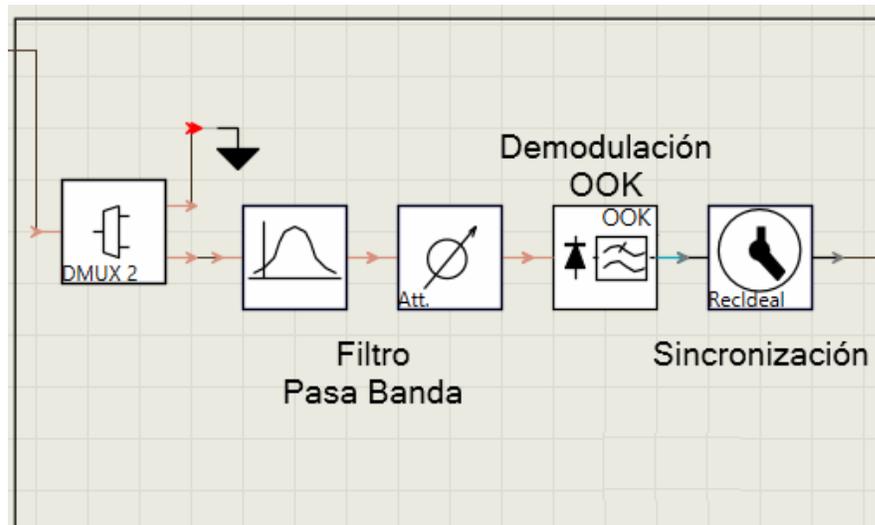


Figura 3.4. Esquema del receptor para XG-PON en el enlace downlink [3][4]

3.2.2. Escenario Base XG-PON *Upstream* sin Codificación RS

Este escenario permite observar el comportamiento a nivel físico del enlace de comunicación que se establece entre el cliente (ONU) y el servidor (OLT), se caracteriza por no incluir la detección y corrección de errores en el enlace. En la tabla 3.5 se presentan las principales características seleccionadas para el nivel físico de este escenario.

Tabla 3.5. Características del enlace *upstream* [1]

Red de distribución	N1
Potencia Transmisión [dBm]	2
Perdidas del enlace [dB]	14
Distancia de la fibra [Km]	20
Sensitividad Receptor [dBm]	-27.5
Factor de atenuación de fibra [dB/Km]	0.47

Banda de operación [nm]	1260 – 1280
Tasa de Bit [Gbps]	2.48832
Pendiente de dispersión cromática [ps/nm ² × km]	0.0092

A continuación, en la figura 3.5 se presenta el esquema del sistema *upstream* implementado en la herramienta VPI. Los módulos de generación de flujo de bits y *scrambler* y sus módulos complementarios en el receptor se implementan en Matlab, los cuales son descritos en el anexo 3.1.

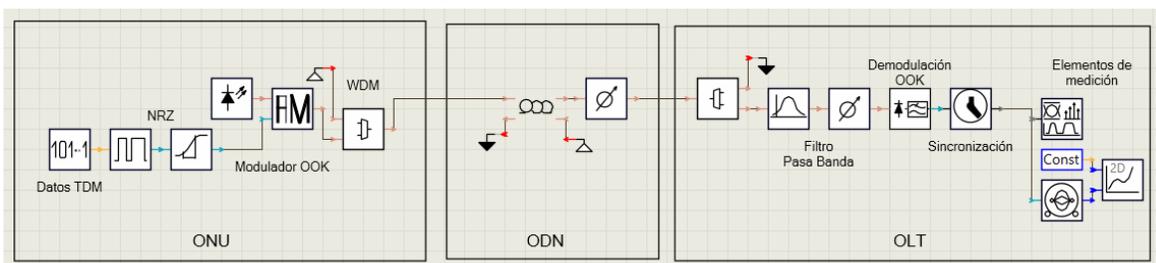


Figura 3.5. Esquema del enlace *upstream* de XG-PON implementado en VPI.

3.2.2.1. Transmisor

En esta sección se describen las características de los tres bloques principales que permiten establecer el transmisor sin codificación RS a nivel de simulación.

Bloque	<p>Banda base</p> <p>Tiene como función generar la señal de información banda base del sistema con comunicación <i>upstream</i>. Este módulo está implementado en Matlab, el cual genera de forma aleatoria una serie de bits uniformemente distribuidos¹⁴, conformando un vector de tamaño $n = \frac{311040}{20} = 15552$, debido a que la trama tiene un tiempo de duración de $125\mu s$ y la velocidad de transmisión corresponde a 2.48832Gbps, pero existen restricciones de tamaño de vector en VPI y por tanto se reduce la trama como se indica anteriormente y se transmite en 6.25us.</p> <p>La salida de este bloque es un vector de 15552 bits debido a las limitaciones de VPI.</p>
Señal de entrada	Ninguna
Señal de salida	Señal banda base (sbb): vector (1,n) donde $n = \frac{311040}{20} = 15552$, es el número bits que conforman la señal banda base en simulación.

¹⁴ La palabra banda base de bits se genera con el módulo randi de matlab que utiliza la distribución uniforme para generar el vector, pero esta misma palabra es utilizada en todos los escenarios, por tanto esta distribución probabilística no incide en el comportamiento del sistema.

Bloque	Scrambler Tiene como función aleatorizar la señal banda base. Este bloque funcional se implementa en Matlab. Simula la Interacción de flip-flop en cascada, distribuidos de acuerdo con el polinomio $x^{58} + x^{39} + 1$ y con vector inicial de 58 posiciones, donde las primeras siete están conformadas por bits establecidos en '1' y las restantes en '0'
Señal de entrada	Sbb
Señal de salida	Señal banda base aleatorizada (sbba). Consiste en la señal banda base con aleatorización de acuerdo con el polinomio $x^{58} + x^{39} + 1$. Esta señal se representa mediante el vector de dimensiones (1,15552).

Bloque	Transmisor NRZ Tiene como función generar la señal pasa banda del sistema XG-PON y adaptarla al canal de transmisión mediante el multiplexor WDM. codificación: NRZ velocidad de 2.48832 Gbps potencia de salida: 2dBm banda de operación: 1260 – 1280 nm frecuencia central: 236,22 THz (1270 nm) modulación: Amplitud tolerancia a la potencia óptica reflejada: >-15 dB rango de dispersión: 0 hasta -140 ps/nm Ancho de línea 100 MHz dado en [3]
Señal de entrada	Sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasabanda con formato óptico.

El enlace *upstream* permite establecer la señal pasa banda del enlace entre 1260 -1280 nm, según las condiciones de nivel físico. Además, una trama del enlace *upstream* tiene una duración de 125 μ s y si la velocidad de transmisión es de 2.48832 Gbps se manejan 311040 bits por trama, se tomaron para este enlace 4 muestras por bit. En la expresión (3.4), se obtiene el ancho de banda de la señal pasa banda, según las condiciones anteriores.

$$Bw = 4 \frac{\text{muestras}}{\text{bit}} * \frac{311040 \text{ bit}}{125 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 9.95 \text{ GHz} \quad (3.4)$$

Al implementar estas condiciones en la herramienta de simulación VPI, se encontró la limitación en el manejo de cantidad de muestras por bit, debido al tamaño del vector. Ante esta condición, se decide disminuir el tiempo de la ventana de 125 μ s a 6.25 μ s, esto implica que el vector de información sea reducido de 311040 bits a 15552 bits, y al

establecer como tasa de muestreo 4 muestras por bit, se obtiene el siguiente ancho de banda

$$B_w = 4 * 2.48832 \times 10^9 = 9.95 \text{ GHz} \quad (3.5)$$

3.2.2.2. Canal

Bloque	ODN Tiene como función representar las características de la red de distribución óptica. Longitud enlace: 20 km Atenuación: 0,47 dB/Km Pérdidas de enlace: 14 dB Pendiente de dispersión cromática: 0.0092 [ps/nm ² × km]
Señal de entrada	Sm
Señal de salida	Señal pasabanda afectada por el canal (sma).

3.2.2.3. Receptor

Bloque	Recepción NRZ Tiene como función recibir la señal pasa banda del demultiplexor WDM y obtener la señal banda base en la ONU del sistema XG-PON. Sensitividad: -27.5 dBm frecuencia central: 236,22 THz (1270 nm) demodulación: amplitud decodificación NRZ
Señal de entrada	Sma
Señal de salida	Señal modulada (sbbar): señal banda base aleatorizada afectada por el canal óptico. Vector de tamaño (1,n)

La configuración de los parámetros del receptor en la herramienta VPI, se establece de igual manera que en el enlace base *downstream* de XG-PON.

Bloque	Desaleatorizador Tiene como función aleatorizar la señal banda base recuperada. Módulo implementado en Matlab
Señal de entrada	Sbbar
Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbr): señal banda base recuperada sin el efecto del módulo scrambler. Vector de tamaño (1,n).

3.3. ESCENARIOS XG-PON QUE INCLUYEN EL ESQUEMA RS

3.3.1. Escenario Base XG-PON Downstream con Codificación RS

Este escenario permite observar el comportamiento a nivel físico del enlace de comunicación que se establece entre el servidor (OLT) y el usuario (ONU), incluyendo el esquema de detección y corrección de errores RS. El nivel físico de este escenario cumple con los requerimientos dados anteriormente, en la tabla 3.4. La diferencia principal dada con el escenario *downstream* base descrito en la sección 3.2.1 consiste en la conformación de la trama con información codificada por el código RS(248,216) e incluir en el receptor el proceso de decodificación para recuperar la señal, estos procesos se implementan bajo Matlab.

3.3.1.1. Transmisor

Bloque	Banda base Tiene como función generar la señal de información banda base del sistema que enviará la OLT a las ONUs de los usuarios.
Señal de entrada	Ninguna
Señal de salida	Señal banda base (sbb): vector (31,216), corresponde a 31 tramas de 216 bytes.

Bloque	Banda base codificada Tiene como función generar la señal de información banda base codificada del sistema, que enviará la OLT a las ONUs de los usuarios.
Señal de entrada	Sbb
Señal de salida	Señal banda base codificada (sbbc): vector (31,248), corresponde a la señal sbb codificada con el código RS(248,216).

Bloque	TDM Tiene como función multiplexar en una sola trama la información de las 31 tramas codificadas de 248 bytes y agregar la PDU de 704 bits
Señal de entrada	Sbbc
Señal de salida	Señal banda base multiplexada (sbbm): vector (1,62208), corresponde a la señal sbbc multiplexada con información PDU.

Bloque	Información Tiene como función generar la señal de información banda base codificada del sistema, que enviará la OLT a las ONUs de los usuarios, <i>en forma de bits</i>
--------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Señal de entrada	Sbbm
Señal de salida	Señal banda base información (ibb): vector (1,62208), corresponde a la señal sbbm en su formato binario.

Bloque	Scrambler Tiene como función aleatorizar la señal de información banda base.
Señal de entrada	lbb
Señal de salida	Señal banda base aleatorizada (sbba). Vector (1,62208), Consiste en la señal banda base multiplexada en su formato de binario, con aleatorización de acuerdo con el polinomio $x^{58} + x^{39} + 1$

Bloque	Transmisor NRZ Tiene como función generar la señal pasa banda del sistema XG-PON. La señal recibida se divide en grupos de 20 y se reduce la ventana de tiempo también en la misma proporción, para mantener la velocidad de transmisión. Se muestrea la señal con los parámetros dados en la sección 3.2.1. codificación: NRZ velocidad de 9,95328 Gbps potencia de salida: 2dBm banda de operación: 1575-1580 nm frecuencia central: 190,1 THz (1577,03 nm) modulación: amplitud tolerancia a la potencia óptica reflejada: >-15 dB rango de dispersión: 0 hasta -140 ps/nm
Señal de entrada	Sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasabanda con formato óptico.

3.3.1.2. Canal

Bloque	ODN Tiene como función representar las características de la red de distribución óptica. Longitud enlace: 20 km Red de distribución: 1: 64 Atenuación: 0,47 dB/Km Pérdidas de enlace: 14 dB Pendiente de dispersión cromática: 0.0092 [ps/nm ² × km]
Señal de entrada	Sm
Señal de salida	Señal pasabanda afectada por el canal (sma).

3.3.1.3. Receptor

Bloque	Demod NRZ Tiene como función obtener la señal banda base en la ONU del sistema XG-PON. Sensitividad: -28 dBm frecuencia central: 190,1 THz (1577,03 nm) demodulación: amplitud decodificación NRZ
Señal de entrada	Sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasabanda con formato óptico.

Bloque	Desaleatorizador Tiene como función aleatorizar la señal banda base recuperada.
Señal de entrada	Sbbar
Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbr): señal banda base recuperada sin el efecto del módulo scrambler. Vector de tamaño (1,62208),

Bloque	Demultiplexor Tiene como funciones: <ul style="list-style-type: none"> • Llevar de formato bit a formato byte. • Quitar encabezado PDU • Demultiplexar la información en las 31 tramas.
Señal de entrada	Sbbr
Señal de salida	Señal banda base demux (sbbd): señal banda base demultiplexada. Es representada por el vector de tamaño (31,248),

Bloque	Decodificador Tiene como función detectar y corregir errores con el decodificador RS(248,216)
Señal de entrada	Sbbd
Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbd): señal banda base recuperada procesada por el decodificador. Representada por el vector (31,216).

3.3.2. Escenario Base XG-PON Upstream que Incluye Codificación RS

Este escenario permite observar el comportamiento a nivel físico del enlace de comunicación que se establece entre el cliente (ONU) y el servidor (OLT), se caracteriza por incluir el proceso de detección y corrección de errores en el enlace, mediante el esquema RS(248,232). El nivel físico de este escenario cumple con los requerimientos dados anteriormente, en la tabla 3.5. En este escenario se mantienen las condiciones

físicas del escenario base upstream de XG-PON, las cuales se describen en la sección 3.2.2.

3.3.2.1. Transmisor

Bloque	Banda base Tiene como función generar la señal de información banda base del sistema que enviará la OLT a las ONUs de los usuarios.
Señal de entrada	Ninguna
Señal de salida	Señal banda base (sbb): vector (7,232), corresponde a 7 tramas de 232 bytes.

Bloque	Banda base codificada Tiene como función generar la señal de información banda base codificada del sistema.
Señal de entrada	Sbb
Señal de salida	Señal banda base codificada (sbbc): vector (7,248), Corresponde a la señal sbb codificada mediante el esquema RS(248,232). Incluye dos procedimientos:

Bloque	TDM Tiene como función multiplexar en una sola trama la información de las 7 tramas codificadas y agregar la PDU de 208 bytes adicionales en 0.
Señal de entrada	Sbbc
Señal de salida	Señal banda base multiplexada (sbbm): vector (1,15552), corresponde a la señal sbbc multiplexada con información PDU.

Bloque	Información Tiene como función generar la señal de información banda base codificada del sistema, que enviará la OLT a las ONUs de los usuarios, <i>en forma de bits</i>
Señal de entrada	Sbbm
Señal de salida	Señal banda base información (ibb): vector (1,15552), corresponde a la señal sbbm en su formato binario.

Bloque	Scrambler Tiene como función aleatorizar la señal de información banda base.
Señal de entrada	Ibb
Señal de salida	Señal banda base aleatorizada (sbba). Vector (1,15552), Consiste en la señal banda base multiplexada en su formato de binario, con aleatorización de acuerdo con el polinomio $x^{58} + x^{39} + 1$

Bloque	Modulador NRZ – DPSK Tiene como función generar la señal pasa banda del sistema XG-PON. codificación: NRZ velocidad de 2.48832 <i>Gbps</i> potencia de salida: 2dBm banda de operación: 1260 – 1280 nm frecuencia central: 236,22 THz (1270 nm) modulación: DPSK tolerancia a la potencia óptica reflejada: >-15 dB rango de dispersión: 0 hasta -140 ps/nm radio de extinción mínima: 8.2 dB
Señal de entrada	sbba
Señal de salida	Señal modulada (sm): señal pasabanda con formato óptico.

3.3.2.2. Canal

Bloque	ODN Tiene como función representar las características de la red de distribución óptica. Longitud enlace: 20 km Red de distribución: 1: 64 Atenuación: 0,47 dB/Km Pérdidas de enlace: 14 dB Pendiente de dispersión cromática: 0.0092 [ps/nm ² × km]
Señal de entrada	Sm
Señal de salida	Señal pasabanda afectada por el canal (sma).

3.3.2.3. Receptor

Bloque	Demod NRZ – DPSK Tiene como función obtener la señal banda base en la ONU del sistema XG-PON. Sensitividad: -27.5 dBm frecuencia central: 236,22 THz (1270 nm) demodulación: DPSK decodificación NRZ
Señal de entrada	Sma
Señal de salida	Señal modulada (sbbar): señal banda base aleatorizada afectada por el canal óptico. Vector de tamaño (1,n)

Bloque	Desaleatorizador Tiene como función aleatorizar la señal banda base recuperada.
Señal de entrada	Sbbar

Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbr): señal banda base recuperada sin el efecto del módulo scrambler. Vector de tamaño (1,1552).
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bloque	Demultiplexor Tiene como funciones: <ul style="list-style-type: none"> • Llevar de formato bit a formato byte. • Quitar encabezado PDU • Demultiplexar la información en las 7 tramas.
Señal de entrada	Sbbr
Señal de salida	Señal banda base demux (sbbd): señal banda base demultiplexada. Es representada por el vector de tamaño (7,248)+204 bytes

Bloque	Decodificador Tiene como función detectar y corregir errores con el decodificador RS(248,216)
Señal de entrada	Sbbd
Señal de salida	Señal banda base recuperada (sbbd): señal banda base recuperada procesada por el decodificador. Representada por el vector (7,216)

3.4. ESQUEMA DE MEDICIÓN

Las mediciones se realizan teniendo en cuenta los parámetros de nivel físico y facilidades de las herramientas de simulación, que se indican en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Aspectos de medición del desempeño del sistema XG-PON [2][4]

Aspecto	Descripción	Herramienta de Simulación	Parámetros
Diagrama de Ojo	Permite observar la incidencia del canal en cuanto a ruido y dispersión.	VPI	Ancho y alto del ojo de acuerdo con la norma UIT-T
Diagramas de BER vs Longitud	Permite observar la incidencia de la longitud	Matlab	Se mide la tasa de error de bit frente a la longitud del trayecto.
Q	Parámetro relacionado con la calidad del sistema	VPI	Relacionado con la BER del sistema.
Tiempo	Tiempo de decodificación	Matlab	Permite relacionar los aspectos de complejidad computacional de los algoritmos de decodificación.
Ganancia de Codificación	Permite analizar la incidencia de la	Matlab	

	codificación en los sistemas de comunicaciones		
--	------------------------------------------------	--	--

El proceso de decodificación se realiza sobre una máquina computacional con las siguientes características: Procesador Intel Pentium Dual de 2GHz, memoria RAM de 3GB, sistema operativo de 32 bits Windows Vista.

3.5. RESUMEN

En este capítulo se describen los escenarios de simulación planteados para el análisis del desempeño del sistema XG-PON a nivel físico, los cuales se establecieron teniendo en cuenta las fases que propone la metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones planteada en el anteproyecto. De acuerdo con la metodología y a las características del nivel físico de la tecnología XG-PON presentadas en el capítulo 1, se detectaron dos escenarios principales: XG-PON en la dirección *downlink* y XG-PON en la dirección *uplink*, el análisis comparativo se realizará en el siguiente capítulo teniendo en cuenta aspectos como: esquema de modulación, longitud de trayecto, algoritmos de decodificación. Para la conformación de los escenarios se integran las herramientas de simulación VPI y Matlab, también se describe en este capítulo las limitaciones de las herramientas de simulación y la forma como se abordan estas situaciones.

Finalmente, se propone analizar los parámetros BER, Q, longitud de trayecto, ganancia de decodificación, para realizar el análisis comparativo del nivel físico de la tecnología XG-PON. Con el diseño e implementación de los escenarios se establece la base para el cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto.

Bibliografía

- [1] Recomendación UIT-T G.987-2, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification", febrero, 2016.
- [2] VPIPhotonics, "Photonic Module. Optical Sources". Forums VPI Photonics 2016.
- [3] VPIPhotonics, "Photonic Module. Receivers". Forums VPI Photonics 2016.
- [4] G.Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, (Jhon Wiley & Sons, NY, 1997).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el trabajo de investigación y su análisis. Inicialmente la presentación de los escenarios base, es decir, los escenarios con características de los enlaces *downstream* y *upstream* de XG-PON definidas en la UIT-T, permite comprobar que su comportamiento es similar al estándar, debido a que se obtiene una $BER=10^{-4}$ sin incluir el esquema de codificación RS, además los parámetros como ancho de banda, y las medidas del diagrama de ojo permiten demostrar la implementación correcta del sistema XG-PON.

Posteriormente, en este escenario se realizan modificaciones de nivel físico como incluir el esquema de modulación DPSK, realizar variaciones en la distancia del enlace y en la potencia del transmisor. También se incluye en el nivel de conformación de trama los esquemas de codificación RS-Berlekamp, RS-Euclidiano y RS-Euclidiano-*erasure* y se realiza el análisis de los datos en tiempo y capacidad de corrección de errores en cada uno de los enlaces *downstream* y *upstream*, manteniendo la tendencia obtenida en el capítulo 2 en estos tres decodificadores, donde el decodificador con información *erasure* ocupa más tiempo que los decodificadores RS-Euclidiano y RS-Berlekamp. En la operación de detección y corrección de errores se disminuye para los tres decodificadores la BER, pasando de niveles de 10^{-4} a 10^{-12} , pero no se puede diferenciar quien es más robusto, debido a que es muy similar su comportamiento en XG-PON.

4.1. ESCENARIOS BASE PARA XG-PON

En esta sección se describen los resultados de evaluar los escenarios base planteados para XG_PON, teniendo en cuenta su comportamiento en el dominio de la frecuencia, el diagrama de ojo y la BER.

4.1.1. Escenario Downstream de XG-PON con modulación OOK

En este escenario se presentan los aspectos más relevantes de las señales banda base y pasa banda tanto en el transmisor como en el receptor del sistema XG-PON con enlace downstream, observando el cumplimiento de las restricciones técnicas del nivel físico descritas de forma general en los capítulos 1 y 3 de este documento, para el sistema XG-PON.

En la figura 4.1, se muestra la señal banda base NRZ de 9.95328 GHz en el dominio de la frecuencia, la cual tiene una potencia total de 2dBm, establecida para cumplir las

condiciones de operación de XG-PON en el enlace downstream. En la figura 4.1 se observa el lóbulo principal y cuatro armónicos de la señal NRZ o señal banda base.

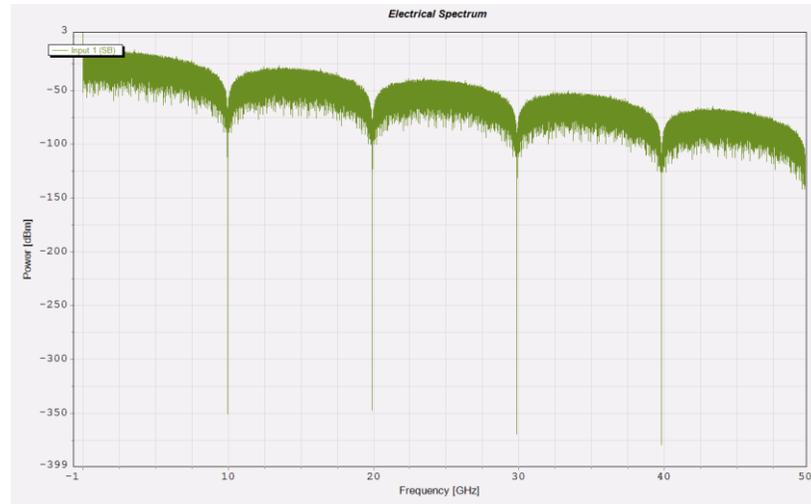


Figura 4.1. Señal de información NRZ en el dominio de frecuencia

El sistema XG-PON establece como condición de operación una distancia entre la OLT y la ONU en el rango entre 20 Km y 40 Km, en las figuras 4.2 y 4.3 se presentan las señales pasa banda a la salida del transmisor y a la entrada del receptor respectivamente, manejando el sistema XG-PON con una distancia entre OLT y ONU de 20 Km como está establecida en [1]. La señal pasa banda opera en la longitud de onda de 1577 nm, es decir, en la frecuencia de 190.17 THz, como se indica en la recomendación técnica [1], donde el lóbulo principal ocupa un ancho de banda de aproximadamente 20 GHz.

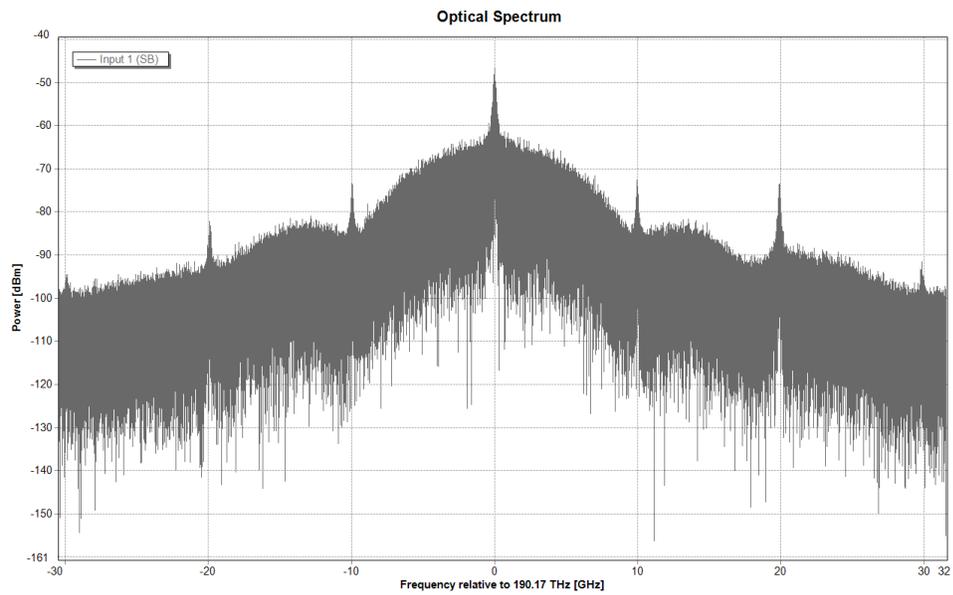


Figura 4.2 Señal de información pasa banda a la salida del transmisor en el dominio de frecuencia, para el enlace downstream XG-PON

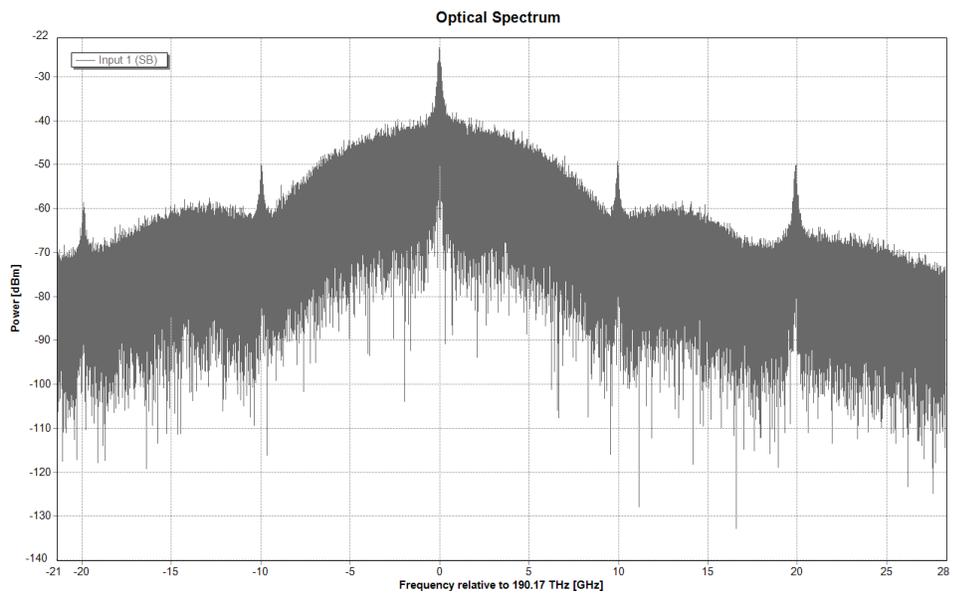


Figura 4.3. Señal pasa banda a la entrada del receptor en el dominio de frecuencia, para el enlace downstream XG-PON

En las figura 4.4 y figura 4.5 se muestra en el dominio de frecuencia la señal recuperada después de pasar por el proceso de demodulación y el diagrama de ojo correspondiente.

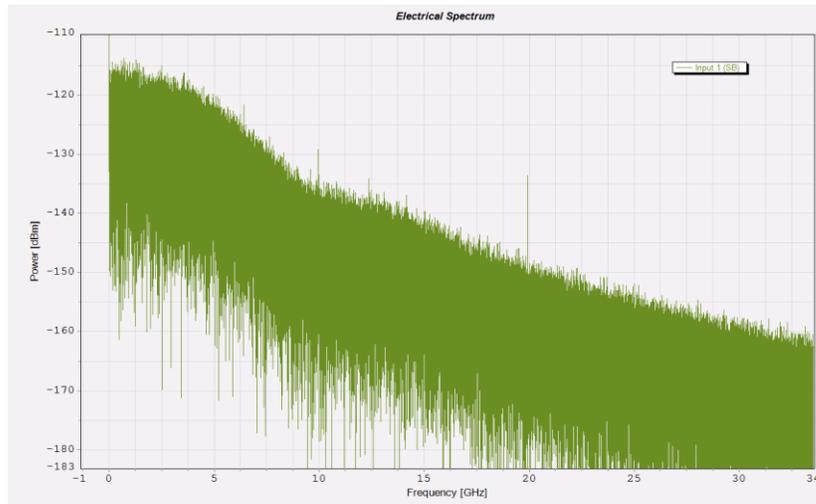


Figura 4.4. Señal banda base recuperada en el receptor para downstream XG-PON

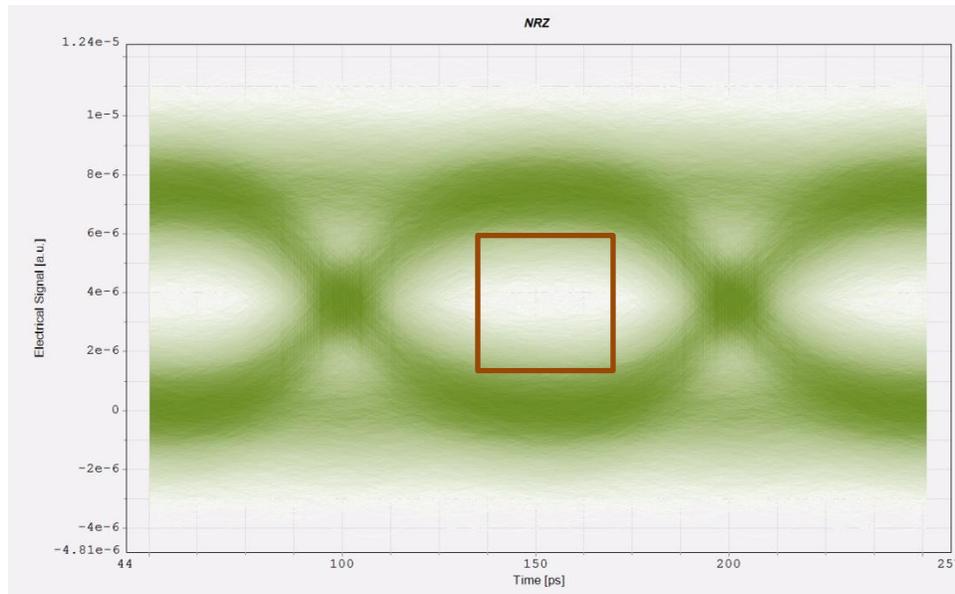


Figura 4.5. Diagrama de ojo de la señal pasa banda recuperada en el enlace downstream XG-PON, con 20 Km

El diagrama de ojo tiene como medida teórica $x_2 - x_3 = 0.2$ y $y_2 - y_1 = 0.5$ según [3] y las medidas realizadas de estos aspectos son 0.25 y 0.44 respectivamente. Valores muy cercanos a los datos establecidos.

Se realizó este proceso para diferentes distancias en el rango entre [20 – 40] Km midiendo adicionalmente el parámetro Q en el receptor, con esta información se obtuvo la BER para cada distancia seleccionada dentro del rango, teniendo en cuenta la expresión (4.1) dada en [2]. En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran los resultados obtenidos para cada distancia establecida en el enlace downstream de XG-PON, sin la incidencia de la codificación RS.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2\pi}} \right) \quad (4.1)$$

Según los resultados presentados en la figura 4.7, el sistema establecido como base para el enlace downstream se acerca al comportamiento dado en la UIT-T G según [1] y [3], dado que a los 20 Km la BER obtenida tiene un valor de 1.47×10^{-4} , y a esta distancia sin incluir esquemas FEC, el sistema debe manejar según [1] una $BER=10^{-4}$.

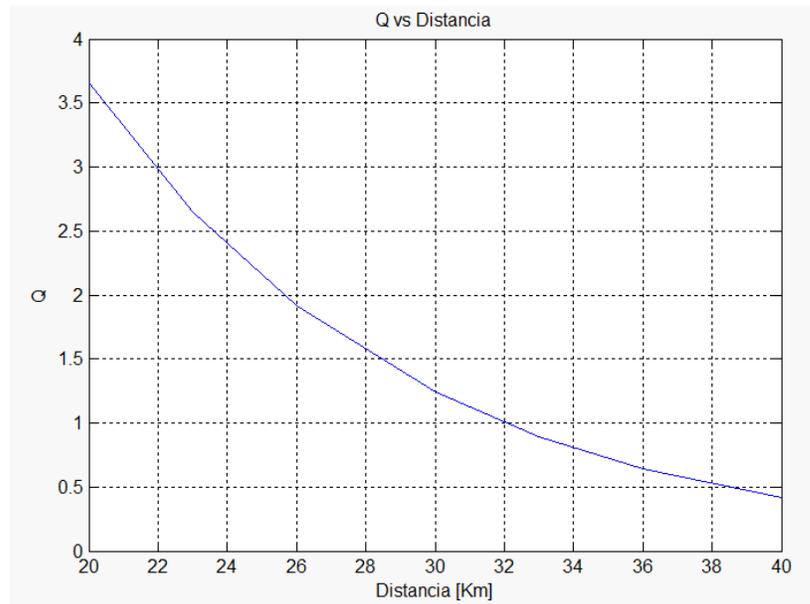


Figura 4.6. Variación de Q vs Distancia en enlace Downstream de XG-PON

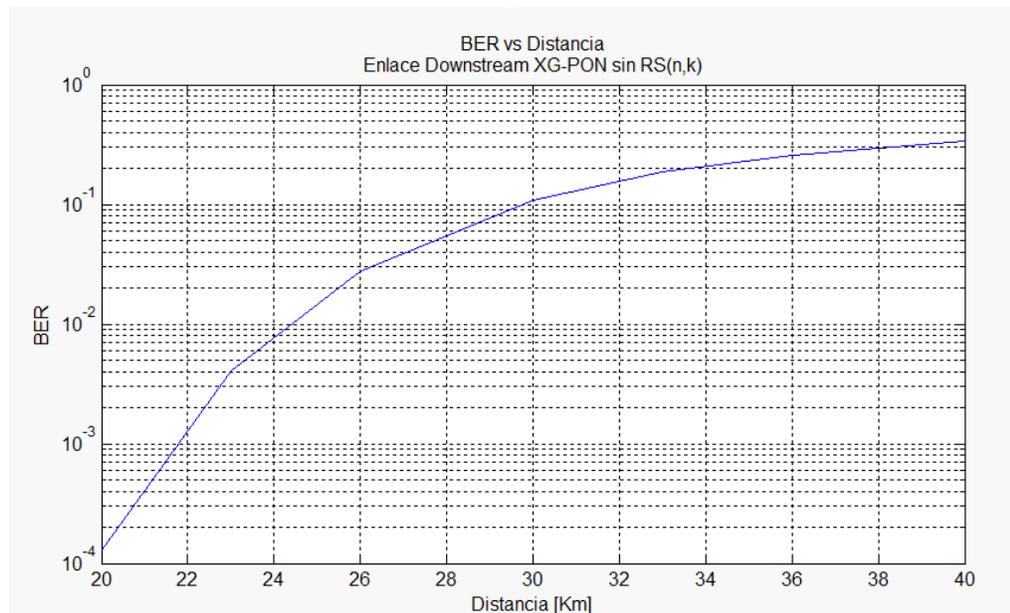


Figura 4.7. Variación de BER vs distancia en el enlace *downstream* de XG-PON

Los datos mostrados anteriormente mediante gráficas y las comparaciones realizadas con las recomendaciones UIT-T son las razones, por las cuales se acepta este escenario como base para evaluar el sistema XG-PON en el enlace *downstream*.

4.1.2. Enlace *Upstream* de XG-PON con Modulación OOK

En este escenario se presentan los aspectos más relevantes de las señales banda base y pasa banda tanto en el transmisor como en el receptor del sistema XG-PON con enlace *upstream*, observando el cumplimiento de las restricciones técnicas del nivel físico descritas de forma general en los capítulos 1 y 3 de este documento, para el sistema XG-PON.

En la figura 4.8, se muestra la señal banda base NRZ en el dominio de la frecuencia con ancho de banda de 2.48832 GHz, la cual tiene una potencia total de 2dBm, establecida para cumplir las condiciones de operación de XG-PON en el enlace *upstream*. En la figura 4.8 se observa el lóbulo principal y cuatro armónicos de la señal NRZ o señal banda base.

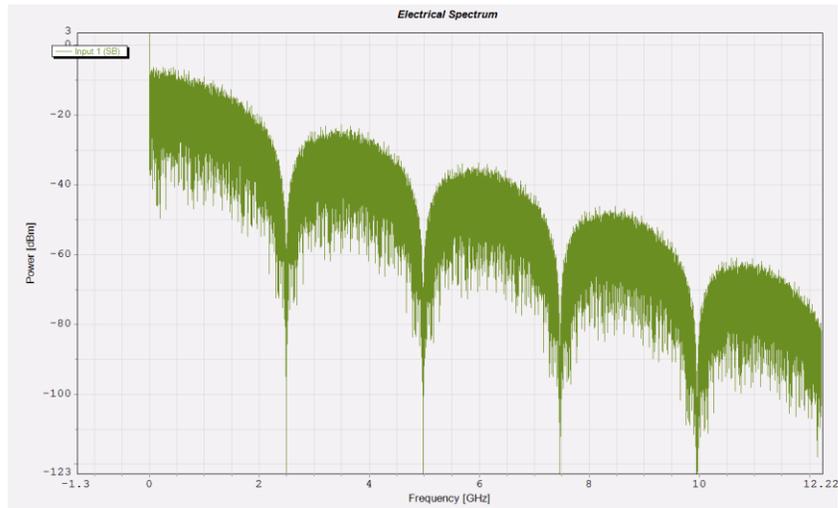


Figura 4.8. Señal de información NRZ en el dominio de frecuencia

En la figura 4.9 se muestra la señal a la salida del transmisor en el dominio de la frecuencia, la cual opera en la longitud de onda de 1270 nm que equivale a 236.22 THz, como recomienda la UIT-T, el lóbulo principal de esta señal maneja un ancho de banda de 4.8 GHz.

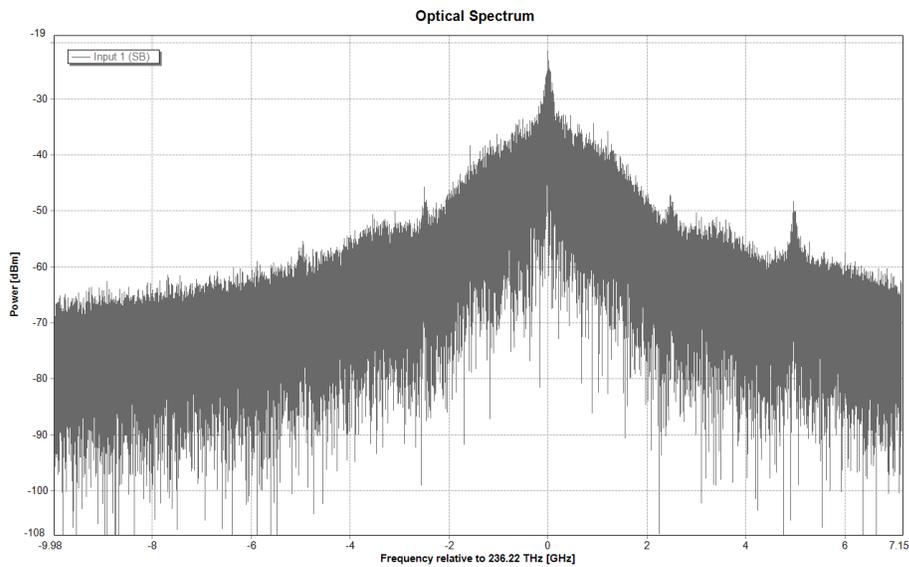


Figura 4.9. Señal pasa banda a la salida del transmisor, en el dominio de frecuencia

En la figura 4.10 se cumplen los parámetros horizontales y verticales del diagrama de ojo dados en [3] para el sistema XG-PON *upstream*, de 0.2 y 0.5 respectivamente.

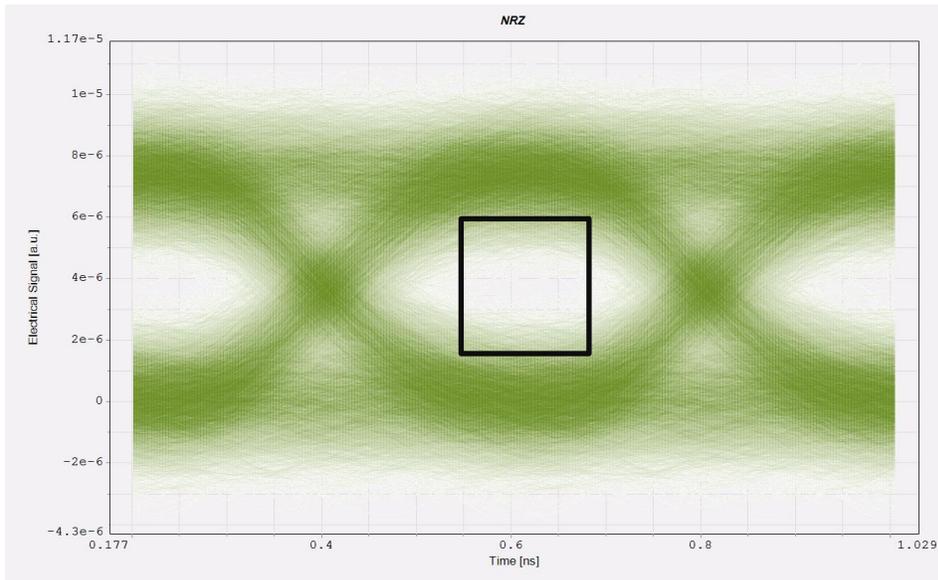


Figura 4.10 Diagrama de ojo de la señal banda base recuperada

En la figura 4.11 se presenta el comportamiento de la Q frente a la distancia, se realizaron variaciones de esta última variable entre [20 – 40] Km de acuerdo a la descripción técnica dada en [2]. Los resultados de la variable BER dada en la figura 4.12 se obtuvieron mediante la expresión (4.1) dada anteriormente.

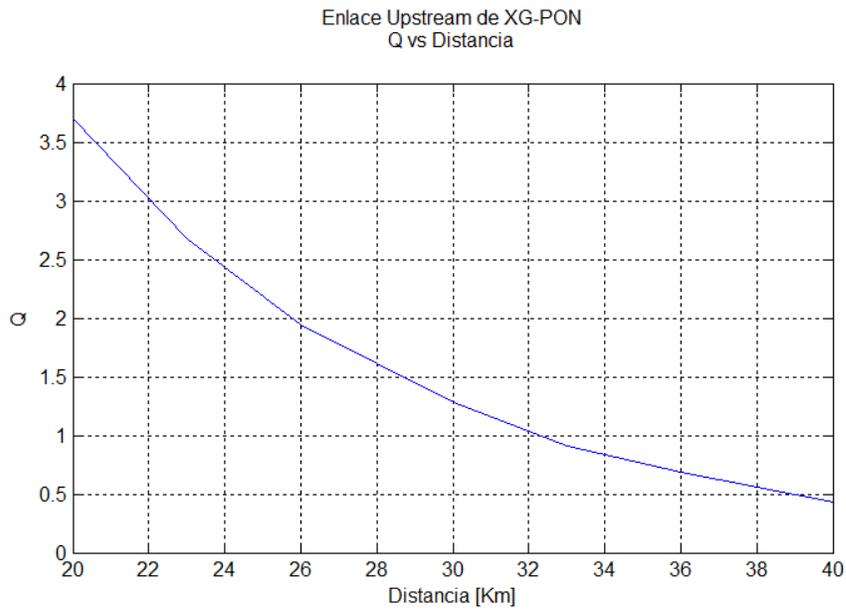


Figura 4.11. Q vs Distancia enlace *upstream* base

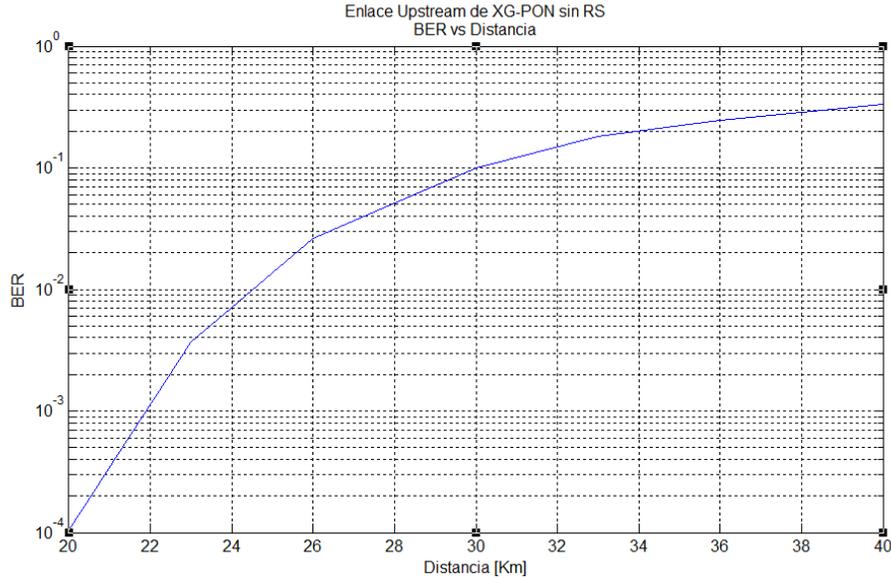


Figura 4.12. BER vs Distancia enlace *upstream* base

Como se puede observar en las dos figuras anteriores se obtiene para una distancia de 20 Km una BER= 10^{-4} cumpliendo con el requerimiento de [1] y [3] donde se opera con esta tasa de error para un enlace upstream sin incluir el proceso de decodificación RS. Para esta distancia se obtiene una Q de 3.7.

El desempeño del nivel físico del enlace *upstream* XG-PON descrito anteriormente bajo los parámetros del enlace como longitud, BER y medidas del diagrama de ojo, cumple con los requerimientos definidos en [1] y [3] para XG-PON, por tanto, se acepta este escenario como base para evaluar la incidencia del proceso de codificación y decodificación RS en esta tecnología.

4.2. INCIDENCIA DEL PROCESO DE MODULACIÓN DPSK

Este escenario se caracteriza por el cambio en los procesos de modulación y demodulación del esquema OOK al esquema DPSK manteniendo las características a nivel físico en la codificación de fuente NRZ, en el *scrambler*, en la ODN y en el receptor, descritas en el capítulo 1 y en el capítulo 3 de este documento, debido a que no existe definición de XG-PON incluyendo este esquema en las recomendaciones de la UIT-T.

A continuación, en la figura 4.13 se presenta el modelo transmisor canal y receptor que permite analizar tanto los escenarios XG-PON *downtream* como *upstream* incluyendo la modulación DPSK.

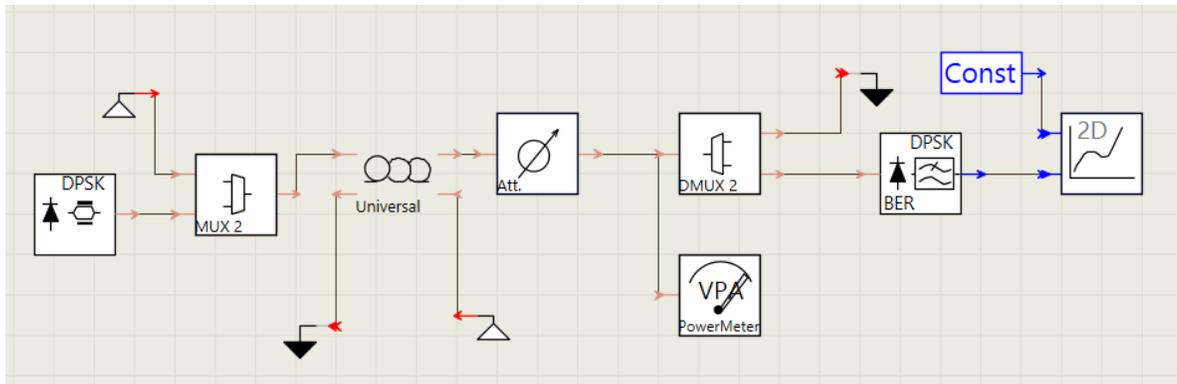


Figura 4.13. Esquema XG_PON que incluye el esquema DPSK

4.2.1. Escenario XG_PON *downstream* con DPSK

El transmisor en el escenario *downstream*, representa las funciones del OLT, el cual entrega información y servicios a los usuarios, que en este caso son representados por la ONU del sistema. Se adapta la simulación a las condiciones de capacidad de procesamiento de VPI como se indicó en el capítulo 3, para conservar las características de este enlace respecto a la tasa de transmisión de 9.95328 Gbps, tiempo de trama 125 μ s, potencia de salida de 2dBm, esté módulo también es evaluado sin codificación RS.

Los procesos que se desarrollan en la herramienta Matlab son: generación del vector de bits sin codificación RS y aleatorización de este vector mediante el proceso *scrambler*. En la herramienta VPI se implementa la recepción del vector de información, la codificación NRZ, la modulación DPSK y la multiplexación CWDM. También en VPI se representan las características de la ODN y el receptor con demodulación DPSK. En este escenario las mediciones de la BER se realizan mediante las utilidades de la herramienta VPI. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al evaluar este escenario.

En el transmisor, la señal modulada con el esquema DPSK ocupa un ancho banda de 19.90 GHz centrada en la portadora de 190.1745 THz., como se muestra en la figura 4.14.

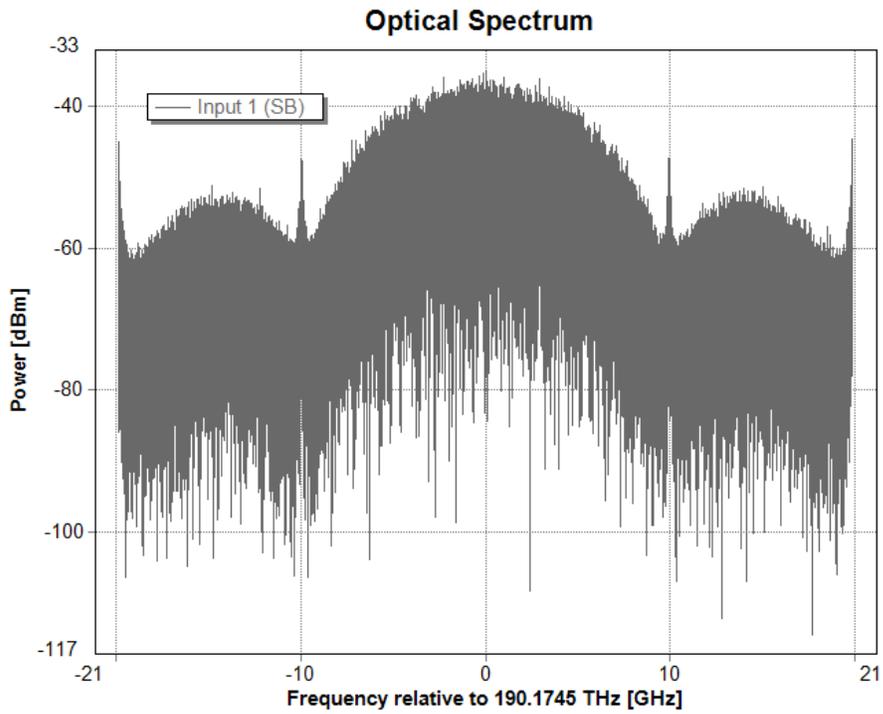


Figura 4.14. Señal modulada mediante el esquema DPSK

Al recibir la señal pasa banda en la ONU, se recupera la señal de información o señal banda base que tiene un ancho de banda de 9.9532 GHz, como se muestra en la figura 4.15.

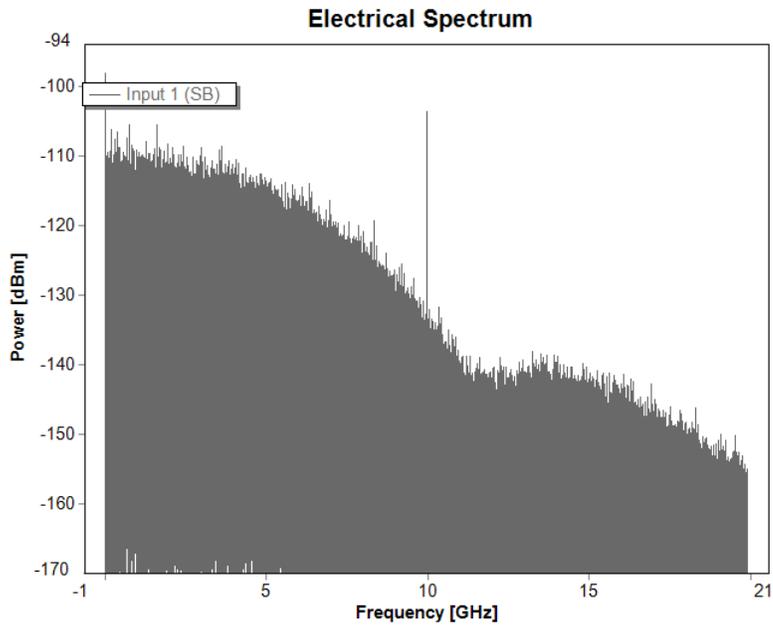


Figura 4.15. Señal banda base recuperada en la OLT de XG-PON

En la figura 4.16 se presentan los resultados de la BER de este escenario, al modificar la distancia del enlace entre 20 y 40 Km, rango que es especificado en las recomendaciones de XG-PON [1]

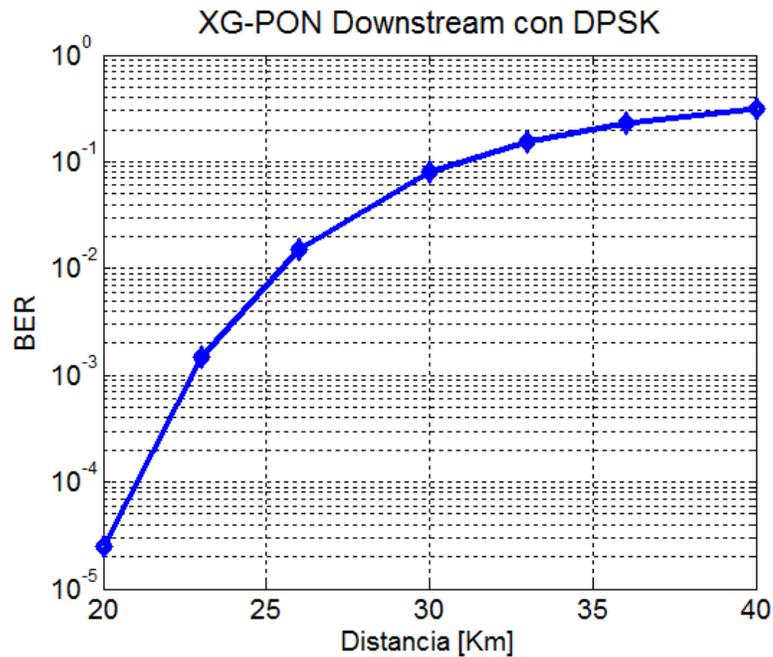


Figura 4.16. BER variando las longitudes del enlace downstream de XG_PON
En la figura anterior las tasas de error de bit toman valores entre $[2.5 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}]$, para los enlaces entre $[20 - 40]$ Km.

4.2.2. Escenario XG_PON *upstream* con DPSK

Este escenario tiene como transmisor la ONU y como receptor la OLT, con el objetivo de trasladar la información del usuario al lado del proveedor de servicios. Se mantienen las características a nivel físico de velocidad de transmisión en 2.48832 Gbps, frecuencia de transmisión 236.22 THz, potencia de transmisión de 2 dBm, se diferencia del escenario 4.1.2 en el esquema de modulación utilizado. A continuación, en la figura 4.17 se presenta la señal pasa banda, a la salida de la ONU, se caracteriza por un ancho de banda de 4.97664 GHz, centrada en la frecuencia de 236.22 THz.

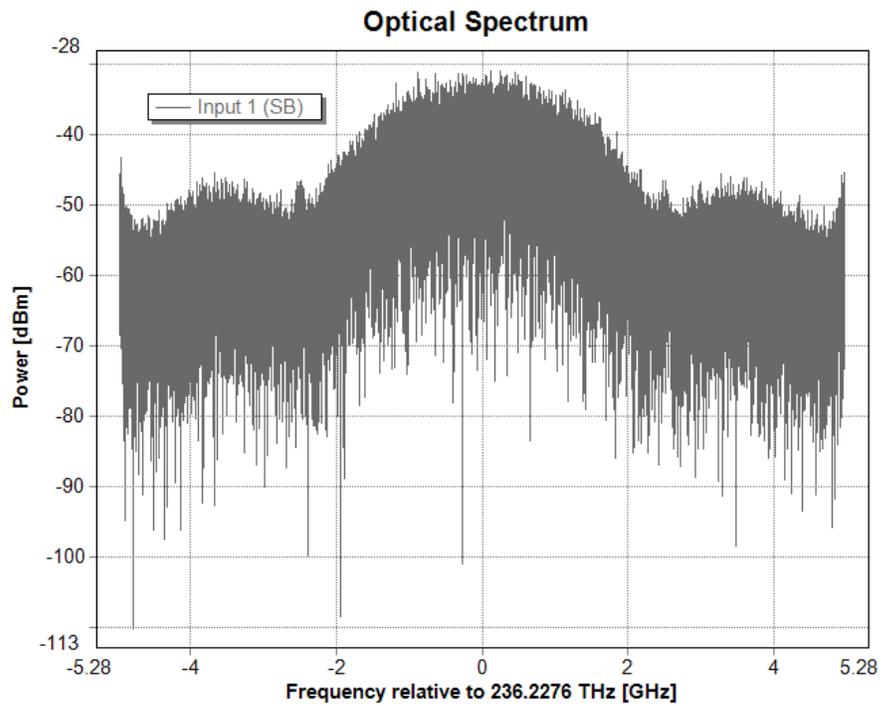


Figura 4.17. Señal banda base para enlace *upstream* de XG-PON

En el receptor se observa la señal recuperada en el dominio de la frecuencia, la cual tiene un ancho de banda de 2.48832 GHz.

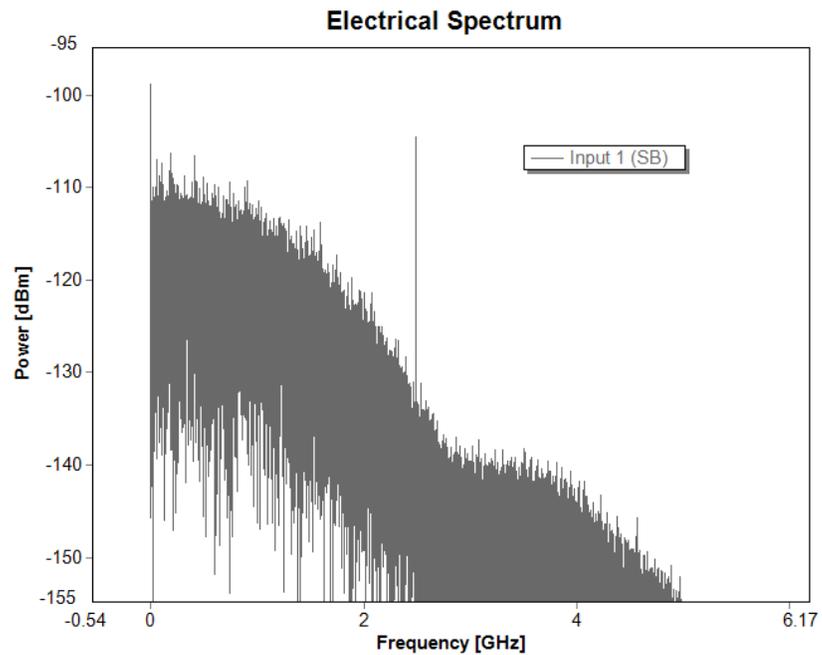


Figura 4.18 Espectro de la señal banda base en la OLT

Para una sensibilidad en el receptor de -28 dBm, las variaciones de la BER se encuentra entre los valores de rango $[1.9 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-1}]$ si la distancia se modifica entre [20 – 40] Km. Este comportamiento se muestra en la figura 4.19.

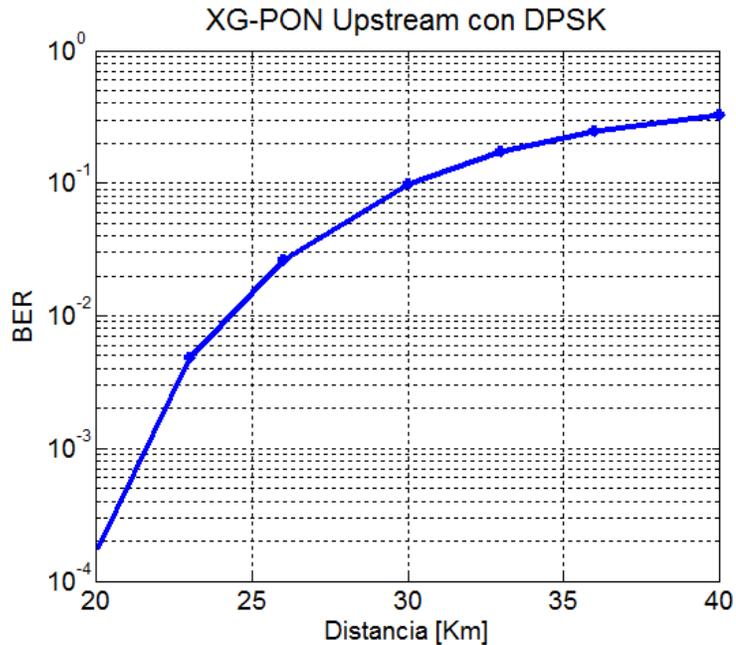


Figura 4.19. BER vs Distancia en sistema XG-PON *Upstream*

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS ESCENARIOS XG-PON BASE Y LOS ESCENARIOS XG-PON QUE INCLUYEN EL ESQUEMA DPSK

Condiciones Espectrales. En los cuatro escenarios los datos fueron muestreados con una tasa de 4 muestras por bit y con un tiempo de trama de $6.25 \mu\text{s}$, disminuyendo también la cantidad de bits de la trama a su veinteaava parte, para conservar la velocidad de transmisión. Se observa en los diagramas de frecuencia de la señal banda base para los cuatro escenarios, que esta señal mantiene el ancho de banda de acuerdo a la velocidad de transmisión. La tasa de muestreo aplicada incide en la cantidad de armónicos que se presentan en la señal, pero el sistema tiene filtros que dejan pasar la señal conformada con el armónico principal.

Esquemas de Modulación. La figura 4.20 presenta el comportamiento de la señal recuperada en el receptor en términos de la BER, al modificar la distancia del enlace *downstream*, comparando los esquemas de modulación escogidos para el análisis, con sensibilidad -28 dBm, potencia de transmisión 2 dBm y pérdidas de enlace de 17.6 dB.

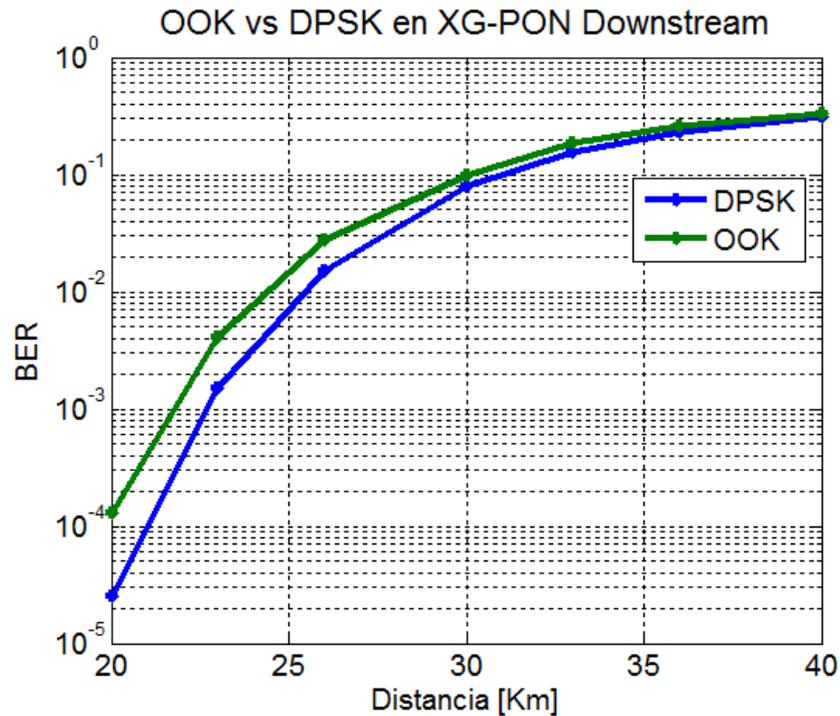


Figura 4.20. BER vs Distancia en XG-PON downstream

En la figura anterior se observa que el desempeño en términos de la BER para una misma distancia es mayor en los sistemas XG-PON que incluye el esquema de modulación DPSK. Por ejemplo, el sistema NRZ-OOK downstream puede establecer una $BER=10^{-4}$ cuando el enlace tiene una distancia de 20 Km, pero el sistema XG-PON con NRZ-DPSK, puede obtener esta tasa con una distancia de enlace de 21 Km. Para distancias mayores la tasa de bit aumenta, estableciéndose estas distancias como límite para la tecnología XG-PON que incluya los esquemas de modulación OOK y DPSK, respectivamente. Existe una ganancia de 1.02 dB entre el sistema XG-PON DPSK y XG-PON OOK.

El comportamiento entre OOK y DPSK para el sistema XG-PON *upstream* se observa en la figura 4.21. Las condiciones de operación para ambos sistemas a nivel físico cumplen con lo descrito en la UIT-T para XG-PON *upstream*, donde la potencia de transmisión es de 2dBm, longitud de enlace 20 Km, sensibilidad -27.5 dBm. No existe una diferencia marcada entre las BER de los dos sistemas como las dadas en el escenario anterior, se considera que se presenta este comportamiento debido a que en la banda de operación de este enlace que es de 1260 - 1280 nm se presenta una menor dispersión, y en estas condiciones la modulación OOK muestra ser mejor que la DPSK, a diferencia de la banda de operación de 1575 - 1580 nm del enlace *downstream*, donde la dispersión es mayor. En los resultados del trabajo de investigación presentado en [5], se identifica el mismo comportamiento de los esquemas de modulación, al tener menor dispersión.

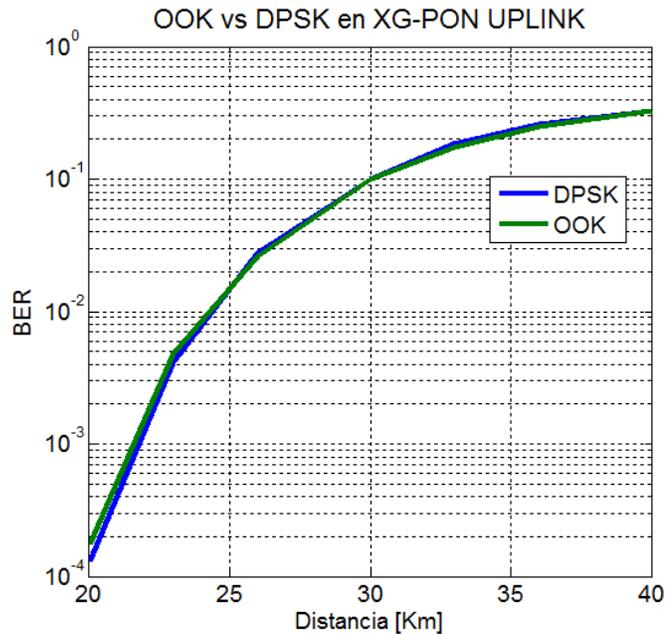


Figura 4.21. BER vs Distancia en XG- PON Upstream, para una dispersión de -3.35 ps/nm.km

Niveles de potencia en el receptor. En la figura 4.22 se presenta el comportamiento del sistema XG-PON para un enlace *downstream*, con una sensibilidad de -28 dBm. Se puede observar que el sistema XG-PON con DPSK presenta mejores tasas de error de bit frente al sistema XG-PON que incluye el esquema de modulación OOK. Se observa que el desempeño de los sistemas XG-PON mejora, al aumentar los niveles de potencia en el receptor y que para sistemas con potencia en el receptor cercana a la Sensibilidad del receptor, se cumple con los requerimientos de $BER=10^{-4}$, presentando una mejora en el desempeño del sistema que incluye el esquema de modulación DPSK.

En la banda de operación de 1260-1280 nm, las condiciones de dispersión cambian la operación de los sistemas, en esta banda este parámetro toma un valor de 3.35 ps/nm.km se observa que el sistema *upstream* de XG-PON que incluye el esquema de modulación OOK mejora su desempeño frente al sistema *upstream* que incluye el esquema DPSK, a medida que aumenta la potencia en el receptor. El sistema con los dos esquemas de modulación presenta una $BER=10^{-4}$ para el nivel de sensibilidad del receptor de -27.5 dBm, exigido en las recomendaciones [1] y [3] de la UIT-T. Observar figura 4.23.

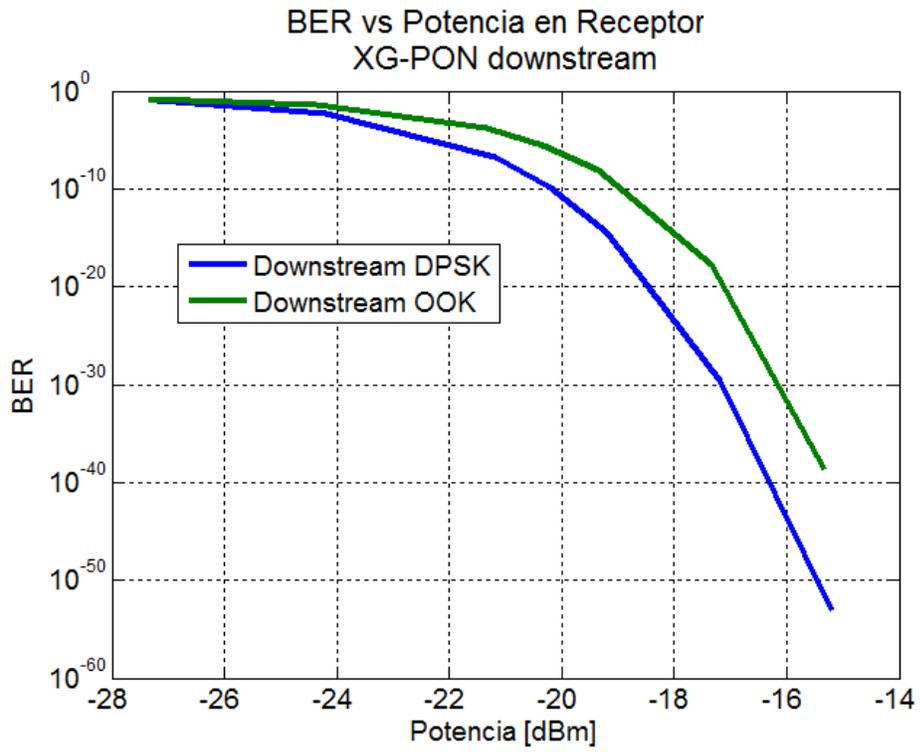


Figura 4.22. BER vs Potencia en enlace downstream de XG-PON

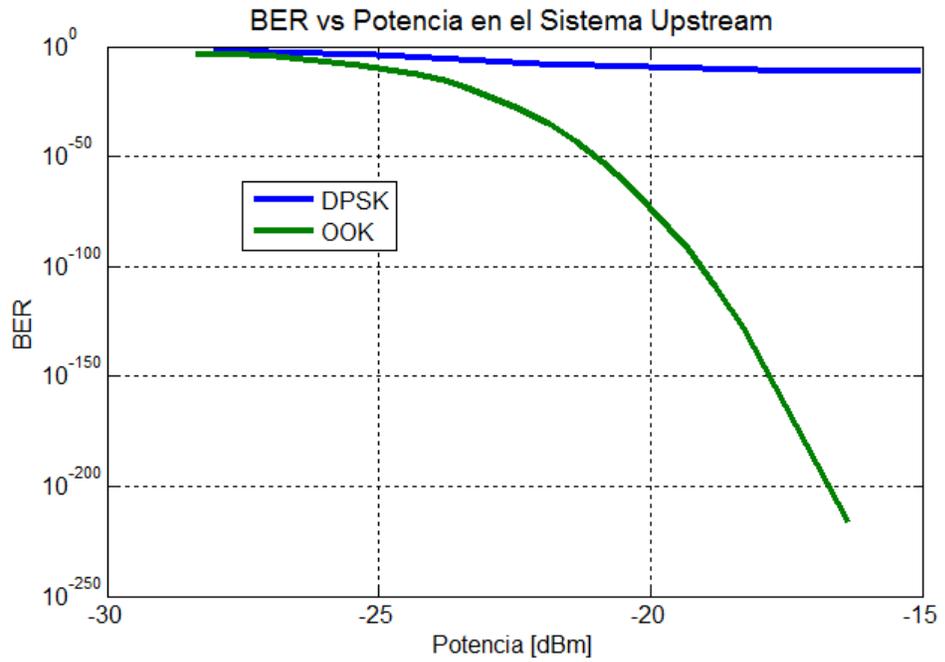


Figura 4.23. BER vs Potencia en enlace *upstream* de XG-PON

Diagrama de ojo. Mediante esta herramienta se pudieron establecer y validar los escenarios base de XG-PON *upstream* y *downstream*, comparando los resultados con el ancho y alto del diagrama de ojo dado por la UIT-T [1-3].

4.4. INCIDENCIA DEL PROCESO DE DECODIFICACIÓN RS EN EL SISTEMA XG- PON

De acuerdo a la recomendación dada en [4], se puede evaluar la calidad intrínseca de corrección de un código RS(n,k), debido a que existe una relación entre la BER de la línea de entrada al módulo FEC, denominada BER_{in} y la BER a la salida del proceso de decodificación denominado BER_s .

Con la hipótesis de que los errores se producen independientes unos de otros y que la probabilidad de decodificación incorrecta es cero, se dan las siguientes relaciones matemáticas entre BER_s y BER_{in} , siendo P_{UE} la probabilidad de error incorregible, P_{SE} la probabilidad de un símbolo con error y n la cantidad de bytes de la palabra codificada.

$$P_{UE} = \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cdot \binom{n}{i} \cdot P_{SE}^i (1 - P_{SE})^{n-i} \quad (4.2)$$

$$BER_{in} = 1 - (1 - P_{SE})^{\frac{1}{8}} \quad (4.3)$$

$$BER_s = 1 - (1 - P_{UE})^{\frac{1}{8}} \quad (4.4)$$

En la figura 4.24, se presenta la relación gráfica entre la BER_{in} y la BER_s .

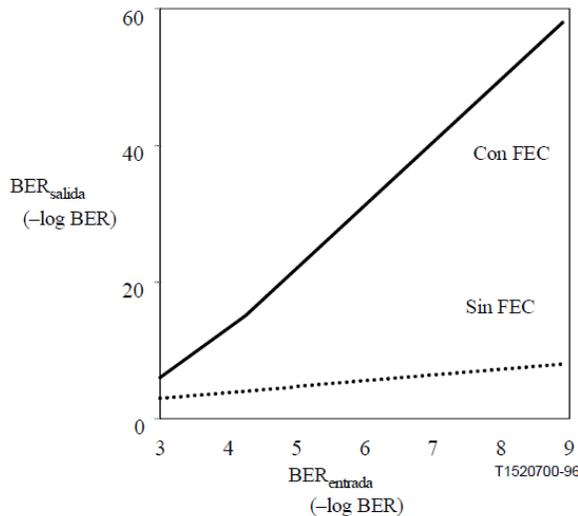


Figura 4.24. Relación de BER a la entrada y salida de un sistema FEC RS(248,216) [4]

Se puede observar que para una $BER_{in}=10^{-4}$ se obtiene una $BERs=10^{-12}$, la cual es la condición de funcionamiento para los enlaces *upstream* y *downstream* de XG-PON, para poder obtener estos valores en la herramienta Matlab se debe contar con un número mayor de bits en la trama evaluada.

También indica la UIT-T en [4], que para valores menores de $BER=10^{-4}$ no es posible llegar a niveles de $BER=10^{-12}$, al implementar el proceso de codificación, es decir, el nivel de $BER=10^{-4}$ es el nivel menor crítico en la trama de entrada del sistema de corrección de errores, para que el sistema FEC pueda empezar a corregir errores.

4.4.1. Evaluación del Esquema RS Bajo las Condiciones VPI

En la herramienta VPI se implementó el sistema XG-PON en su parte óptica y en matlab se implementó la parte del tratamiento de la señal eléctrica, tanto el transmisor como en el receptor. Al evaluar la señal a la salida del VPI se observa que consiste en las muestras de la señal eléctrica banda base recuperada después del proceso de demodulación.

Para incluir el proceso de corrección de errores en XG-PON, se procede en Matlab a convertir la señal muestreada a señal de bits, mediante el proceso *hard decisión*, que consiste en darle valores de 1 lógico ó 0 lógico a las muestras teniendo en cuenta un voltaje de referencia. En el receptor se decodifica la trama bajo los tres algoritmos propuestos para este proyecto.¹⁵

XG-PON OOK downstream con FEC. Para el enlace XG-PON *downstream*, en VPI se conforma la trama con 31 palabras codificadas bajo RS(248,216), esta trama tiene una longitud de 61504 bits codificados + 704 adicionales para conservar la tasa de transmisión al utilizar un tiempo de trama de 6.25 μs . Para una $BER=10^{-4}$ a la entrada del receptor existe una potencia de -27.98 dBm y a la entrada del FEC se tienen 6 bits errados distribuidos en la trama.

En la tabla 4.1 se muestran los tiempos promedio de decodificación bajo estas condiciones de nivel de BER a la entrada del FEC con RS(248,216).

Tabla 4.1. Tiempo promedio utilizado por los diferentes algoritmos de decodificación

	Berlekamp	Euclidiano	Euclidiano + erasure
Tiempo [s]	0,0027	0,0067	0,0128

En la tabla 4.2 se muestran los resultados de simulación ante diferentes tasas de errores a la entrada del decodificador, al evaluarse el decodificador RS(248,216) teniendo en cuenta 500.000 casos y una longitud de trama de 61504 bits.

¹⁵ No se tiene en cuenta el proceso scrambler, debido a que es utilizado en XG-PON para evitar pérdidas de reloj.

Tabla 4.2. Errores encontrados en la palabra decodificada bajo RS(248,216)

Bits errados por palabra codificada	Berlekamp	Euclidiano	Euclidiano + erasure
6	0	0	0
100	0	0	0
200	0	0	0
300	9	9	9
400	70	72	70

Para una trama de 1230080 bits codificados + 14080 bits PDU= 1244160 bits, si existe una BER a la entrada del decodificador de 10^{-4} esta trama debe contener 124 errores. Al tener este número de posiciones erradas en esta trama y después de decodificar, se encontró que hay cero errores en la trama decodificada para 500.000 repeticiones de este escenario. Ante esta situación se puede afirmar que existe una alta probabilidad de encontrar una tasa de 10^{-12} al realizar más mediciones.

XG-PON DPSK downstream con FEC. En el enlace DPSK se observó que para una potencia a la entrada del receptor de -26.96 dBm, se tiene una BER= 10^{-4} , es decir, se tienen 6 errores por trama de tamaño 62208 bits a la entrada del FEC. Al evaluar con 500.000 repeticiones el proceso de decodificación, se encontraron cero errores. Se podría afirmar que existe una alta posibilidad de cumplir el requerimiento teórico de obtener una BER= 10^{-12} , teniendo un nivel de potencia en el receptor 1.02 dB menos que en el escenario XG-PON OOK downstream con FEC. Se obtienen los mismos tiempos de decodificación para ambos casos, como se presenta en la tabla 4.1.

XG-PON OOK upstream con FEC. En este enlace se utiliza el decodificador RS(248,232). Para este caso en VPI se utiliza una trama conformada por 15552 bits, debido a las limitaciones de tamaño de trama se reduce la trama a este tamaño y se utiliza un tiempo de trama de 6,25 μ s, de esta manera se conserva la tasa de transmisión de 2.44832Gbps. Con un tamaño de trama de 15552 bits, a la salida de VPI se encuentra que esta trama contiene 2 errores por trama. Se procede a decodificar con los tres algoritmos de decodificación descritos en el capítulo 2 de este documento, encontrando 0 bits erróneos para 500.000 repeticiones del escenario. El tiempo de decodificación se observa en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Tiempo promedio utilizado por los diferentes algoritmos de decodificación

	Berlekamp	Euclidiano	Euclidiano + erasure
Tiempo [s]	0,0034	0,0089	0,0180

4.5. RESUMEN

En este capítulo se presenta el comportamiento de los escenarios *upstream* y *downstream* base con y sin codificación RS. También se presenta el comportamiento del

sistema XG-PON bajo la incidencia del esquema de modulación DPSK. Se pudo observar que existe una alta posibilidad de pasar de una $BER=10^{-4}$ a una $BER =10^{-12}$ en sistema con XG-PON al incluir FEC bajo los codificadores Reed Solomon. Mediante la evaluación de estos escenarios, se cumple el objetivo general propuesto para este trabajo de investigación que consiste en: *Analizar el desempeño a nivel físico de un sistema punto a punto definido por XG-PON con modulación multinivel¹⁶, que incluye el esquema de decodificación Reed Solomon basado en el algoritmo Euclidiano con información erasure, frente a otros esquemas de corrección de errores implementados en redes ópticas, mediante simulación.*

Bibliografía

- [1] Recomendación UIT-T G.987-1, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, octubre, 2010.
- [2] G. Agrawal. “Fiber – Optic Communication Systems”, Editorial Jhon Wiley & Sons, NY, 1997. Capítulo 4.
- [3] Recomendación UIT-T G.987-2, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, febrero, 2016.
- [4] Recomendación UIT-T G.975. “Corrección de errores en recepción de sistemas submarinos”. 1996.
- [5] Carmona, Claudia. “Comparación de técnicas de modulación eléctrico ópticas en redes de acceso PON”. Tesis para optar al título de magister. Universidad de Antioquia 2013.

¹⁶ En esta propuesta de investigación se hace propone el esquema de modulación multinivel a evaluar DPSK

CONCLUSIONES

Respecto a la incidencia la modulación en XG-PON

- En el enlace *downstream* de XG-PON el cual opera en la banda C, se obtiene mejores prestaciones al incluir el esquema de modulación DPSK respecto al esquema OOK, esto se observa al realizar cambios de longitud, observar que para una $BER = 10^{-4}$ con OOK se alcanzaría una distancia de 20 km y con el esquema DPSK un enlace con 21 km de longitud.
- Respecto a la incidencia de los cambios de potencia en el enlace *downstream*, el desempeño de XG-PON es semejante para los dos esquemas de modulación al operar con una sensibilidad de -28 dBm, que es la recomendada por la UIT-T.
- En el enlace *upstream* el esquema de modulación OOK tiene un comportamiento semejante al obtenido al utilizar el esquema DPSK cuando se modifica la distancia, pero al modificar la potencia el esquema OOK tiene mejores prestaciones respecto a DPSK debido a la dispersión en la banda O.

Respecto a la incidencia de RS en XG-PON

- De acuerdo al análisis multivariable, el tiempo depende del algoritmo seleccionado, de la tasa de codificación y de la relación señal a ruido, con un 95% de confianza.
- También se pudo observar con el mismo porcentaje de confianza que en el análisis estadístico multivariable, que el comportamiento de la BER depende del algoritmo seleccionado y de la SNR.
- Respecto al tiempo de decodificación relacionado con los algoritmos estudiados, el algoritmo Berlekamp utiliza menos tiempo que los algoritmos Euclidiano y Euclidiano con información *erasure* y este último algoritmo es el que utiliza mayor tiempo de decodificación.
- Se pudo observar en el comportamiento de los decodificadores que es una constante de operación que entre mayor capacidad de corrección de errores, mayor es el tiempo utilizado en el proceso de decodificación, también se puede concluir, que entre mayor porcentaje de *overhead* mayor es el tiempo de procesamiento.
- Al obtener una $BER = 10^{-4}$ existe la posibilidad de obtener una $BER = 10^{-12}$, con los procesos de decodificación RS(248,216) y RS(248,232) utilizados en los enlaces downstream y upstream de XG-PON respectivamente.

TRABAJOS FUTUROS

Evaluar los decodificadores RS que contiene los algoritmos Euclidiano, Berlekamp y Euclidiano con *erasure* en un sistema punto a punto óptico experimental.

Evaluar los decodificadores RS que contienen los algoritmos Euclidiano, Berlekamp y Euclidiano con *erasure* en un sistema de acceso óptico E-PON, BPON ó G-PON.

ARTÍCULO PUBLICADO

Artículo aceptado y publicado para el evento denominado VII Congreso Internacional de Computación y Telecomunicaciones. COMTEL 2015. Perú. Título del artículo: "Mejora en la ganancia de codificación Reed Solomon por aplicación de Sistema Gauss Jordan en corrección del error"

ANEXO A

GENERALIDADES DE LAS REDES DE ACCESO PASIVAS

Debido a los nuevos servicios de telecomunicaciones como televisión y video bajo demanda de alta definición en 3D, comunicaciones unificadas y videoconferencia, juegos en red, servicios sobre la nube (*cloud computing*) y la demanda de conexión del número creciente de dispositivos, los requerimientos en capacidad y ancho de banda de las redes de acceso y las redes troncales son mayores. La fibra óptica ofrece beneficios en cuanto a ancho de banda, longitud, calidad, robustez de la señal luminosa frente a efectos del canal, tiempo de respuesta, efectividad operativa y energética, entre otros, convirtiéndose en la opción seleccionada por diferentes operadores y proveedores de tecnologías¹⁷ para dar soporte a las nuevas demandas que tienen estas redes.

Las redes de acceso ópticas pasivas (*PON, Passive Optical Network*) son presentadas como una solución tecnológica a los desafíos de las redes de acceso, que han ido evolucionando para adaptarse a los nuevos requerimientos, cuidando su compatibilidad con las tecnologías predecesoras. En la tabla A.1 se muestran las principales características de las tecnologías PON, las cuales buscan incrementar el ancho de banda y el alcance en las redes de acceso.

Tabla A.1 Principales características de las tecnologías PON [1-5]

Característica	BPON	EPON	GPON	NG-PON 1	NG-PON 2
Estándar	ITU-T G.983-1	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984	ITU-T G.987.1	ITU-T G.989.1
Transmisión	ATM	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM	ATM, Ethernet, TDM- SDH, SONET	ATM, Ethernet, TDM- WDM
Velocidad binaria nominal upstream	155Mbps	1.25 Gbps	Hasta 2.4 Gbps	2.5 Gbps	Hasta 10Gbps
Velocidad binaria nominal downstream	155Mbps 622Mbps	1.25 Gbps	Hasta 2.4 Gbps	Hasta 10 Gbps	Hasta 40Gbps
Longitudes de onda upstream	1260-1360 nm	1295-1320 nm	1290-1330 nm	1260 -1280 nm	1260 -1280 nm
Longitudes de onda downstream	1480-1580 nm	1310 nm	1480-1560 nm	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Codificación de fuente	NRZ	8b/10b	NRZ	NRZ	NRZ
Alcance máximo	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km
VER	Menor 10 ⁻¹⁰	Menor 10 ⁻¹⁰	Menor 10 ⁻¹⁰	Menor 10 ⁻¹⁰	Menor 10 ⁻¹⁰
Detección y Corrección de errores	No aplica	FEC (255,239)	FEC (255,239)	FEC(248,232) FEC(248,216)	No definido

¹⁷ Proveedores de tecnología de acceso basadas en óptica: Adtran, ADVA, Allied Data, Aliphion, Calix, ECI, Enablence, Fujitsu, Hitachi, NEC, NSN, Motorola, Tellabs y Zhone.

Este capítulo presenta las características generales del nivel físico de las redes de acceso ópticas pasivas y describe la red óptica pasiva de próxima generación (*NG-PON 1, Next Generation Passive Optical Network 1*), red que está muy relacionada a la red óptica pasiva con capacidad del orden de los giga bits por segundo (*GPON, Giga Passive Optical Network*), debido a que NG-PON 1 busca reutilizar al máximo su infraestructura en el área de distribución de red, pues el costo de instalación de esta etapa, representa el 85% del costo total de implementación [6]. Para la descripción de la NG-PON 1 se realiza una analogía de un sistema punto a punto, con cada las direcciones (*downstream* y *upstream*) de los enlaces que permite implementar la tecnología NG-PON 1.

A.1. REDES PASIVAS DE ACCESO

Las redes de acceso establecen la conexión entre el proveedor de servicios y el usuario. Según [3-5], en las redes ópticas pasivas existe una clasificación denominada FTTx, que depende de las características del tendido de fibra y cobre, los servicios que se proporcionan y la capacidad de transmisión del sistema. En la tabla A.2 se relacionan los servicios que ofrecen estas tecnologías.

Tabla A.2. Servicios soportados por las tecnologías FTTx [3-5]

Servicio de banda ancha	FTTH	FTTB	FTTC
Servicios simétricos: contenido <i>broadcast</i> , email, intercambio de archivos, telemedicina, aprendizaje a distancia	X	X	X
Servicios asimétricos: <i>broadcast</i> digital, video bajo demanda, transferencia de archivos, juegos en línea	X	X	X
Servicios telefónicos y los definidos por la red digital de servicios integrados (<i>ISDN, Integrated Service Digital Network</i>)	X	X	X
XDSL			X

En la figura A.1. se presenta la arquitectura de las tecnologías FTTx, en ellas se definen la interfaz de red de usuario (*UNI, User Network Interface*) y la interfaz de red de servicio (*SNI, Service Network Interface*), que permiten identificar la red de usuario, la red de distribución y la red servicio, como áreas que conforman una red de acceso.

1. En la tecnología fibra hasta la cabina (*FTTC, Fibre to the Cabine*) existe un tendido de fibra entre el proveedor de servicio y el armario de telecomunicaciones, el acceso al abonado se realiza mediante un tendido de cobre con una longitud máxima de 300 m.
2. En fibra hasta el edificio (*FTTB, Fiber to the Building*), el tendido de fibra óptica llega hasta la acometida del edificio, la distribución a los usuarios se realiza mediante cobre. En las tecnologías FTTB/C la interconexión entre el tendido de cobre y el tendido de fibra se realiza mediante la unidad de red óptica (*ONU, Optical Network Unit*). La interconexión con el usuario y la red

de acceso se realiza mediante el terminal de red (NT, *Network Terminal*) y la interconexión entre el proveedor de servicio y la red de acceso mediante el terminal de línea óptica (OLT, *Optical Line Terminal*).

3. En la tecnología fibra hasta el hogar (*FTTH, Fiber to the Home*) el tendido de fibra óptica llega hasta el interior del abonado. Los módulos físicos de interconexión son: terminal de red óptica (*ONT, Optical Network Terminal*) y terminal de línea óptica (*OLT, Optical Line Terminal*) que permiten la conexión del área de servicio y la red de usuario.

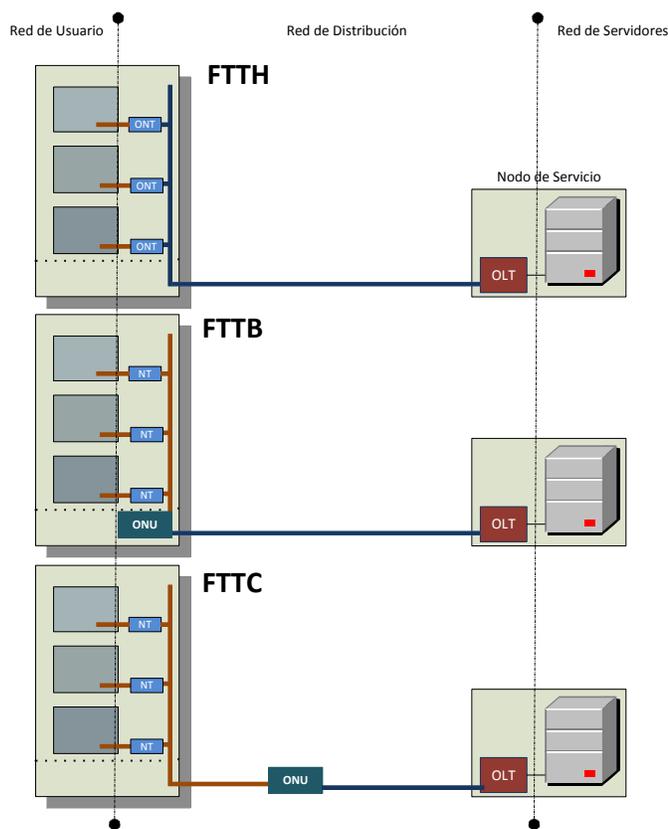


Figura A.1. Arquitectura de una red de acceso óptica [3]

La red de distribución óptica (*ODN, Optical Distribution Network*) cumple las funciones de transporte de la información entre la ONU y la OLT. En [3][4][5] se especifican diversas configuraciones utilizando las ventajas de los *spliters*¹⁸ y de la tecnología de multiplexación por división de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) que permiten el establecimiento de enlaces dúplex con una fibra o varias fibras.

¹⁸ *splitter*: es un elemento que tiene la función de dividir o acoplar la señal óptica, es decir, que recibe la señal y la distribuye por caminos diferentes y en el otro sentido de transmisión, al recibir varias señales ópticas las acopla a una señal de salida [7].

La ONU adapta las señales entre la red de usuario y la red de distribución, esta unidad establece comunicación con el usuario mediante la UNI y utiliza la interfaz R/S para comunicarse con la red de distribución, el OLT se comunica con la red de distribución mediante la interfaz S/R y con la red de servidores mediante la SNI

Las redes de acceso óptica basadas en NG-PON 1, soportan las tecnologías FTTx explicadas anteriormente y también incluyen para el área de la industria la opción fibra hasta la oficina (FTTO, Fiber to the Office), donde direcciona la ONU a oficinas de pequeñas empresas, esta opción tecnológica permite la implementación de los servicios de líneas privadas, servicios simétricos y telefónicos [4].

El escenario inalámbrico denominado fibra hasta la celda (FTT-Cell, Fiber to the Cell) es también soportado por las redes NG-PON 1, el cual ofrece conectividad a las estaciones base con tecnologías 3G y 4G [4]. La configuración general de NG-PON 1 para estos dos últimos casos, se presenta en la siguiente figura.

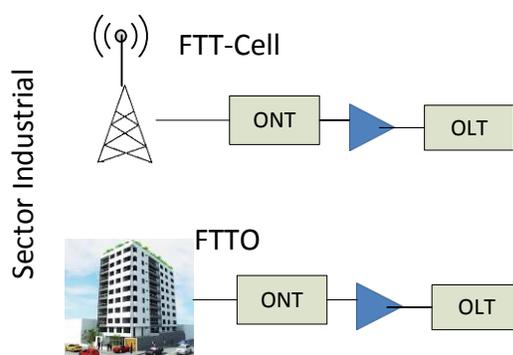


Figura A.2. Tecnologías para el sector industrial que soporta NG-PON 1 [4].

Actualmente según [6], el despliegue de las redes de acceso para usuarios residenciales basadas en GPON con FTTH y FTTB/C, tienen la opción de migrar a NG-PON 1 y los proveedores de servicios industriales como las redes de retorno móvil, tienen en NG-PON 2 una buena opción tecnológica para migrar a redes con mayor capacidad. Entre los principales servicios que soporta la tecnología NG-PON 1 se encuentran los dados en la tabla A.3, según [4].

Tabla A.3. Servicios soportados en NG-PON 1 [4]

Servicio		Características
Telefonía	VoIP	
	POTS	ITU-T Y2201- 8KHz Empaquetamiento de señal de voz
Televisión	IPTV	Trasporte IP multicast y unicast
	Radiodifusión Digital	Transporte usando cobertura RF. [ITU-T G.983.3], [ITU-T J.185] y [ITU-T J.186]

Línea privada	E1 – T1	2.048 Mbps -1,544 Mbps
Acceso a internet con alta velocidad		Interfaz de red de usuario con Giga Ethernet
Movilidad en <i>backhaul</i>		Sincronización en frecuencia, fase y tiempo
Servicio VPN		Sobre Ethernet
Servicios IP		VPN, VoIP

En la recomendación de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones UIT-T [1], la descripción de las interfaces físicas de las redes ópticas pasivas están definidas mediante la capa de medios de transmisión, que se subdivide en la capa de sección y la capa de medios físicos, como se muestra en la tabla A.3.

Tabla A.3. Funciones de la capa medios de transmisión de las PON [1]

Medios Físicos	Capa de sección	
	Transmisión PON	Capa de Trayecto
Adaptación E/O. Características de WDM Conexión de fibras	Determinación de distancia Ancho de Banda	Confidencialidad y seguridad Alineación de trama Sincronización

- [1] Recomendación UIT-T G.983-1, “Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas”, enero, 2005.
- [2] Huawei Technologies Co Next Generation PON Evolution. Online: <http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>. Ingreso, marzo 2014.
- [3] Recomendación UIT-T G.984-1, “Gigabit-capable passive optical networks. General characteristics”. marzo, 2008.
- [4] Recomendación UIT-T G.987-1, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, octubre, 2010.
- [5] Recomendación UIT-T G.989-1, “40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requeriments”, marzo, 2013.

ANEXO B

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS RECOMENDADAS PARA LAS XG-PON

Tabla B1. Propiedades de la fibra monomodo categoría G652-D [14]

Atributos de la fibra		
Atributo	Detalle	Valor
Características modo del campo	Longitud de onda	1310 nm
	Rango de valores nominales	8.6-9.5 μm
	Tolerancia	+/- 0.6 μm
Diámetro de envoltura	Nominal	125.0 μm
	Tolerancia	+/- 1 μm
Error de concentricidad de núcleo	Máximo	0.6 μm
No circularidad de la envoltura	Máximo	1%
Longitud de onda de corte	Máximo	1260 nm
Pérdidas de macrocurvaturas	Radio	30 mm
	Número de enrollamientos	100
	Máximo a 1625 nm	0.1 dB
Tensión de prueba	Mínima	0.69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{min}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1324 nm
	S_{max}	0.092 ps/nm ² × km
Atributos del cable		
Atributo	Detalle	Valor
Coeficiente de atenuación. Nota 1	Máximo entre 1310 -1625 nm. Nota 2.	0.4 dB/Km
	Máximo a 1383 nm +/- 3 nm. Nota 3.	0.4 dB/Km
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/Km
Coeficiente PMD. Nota 4	M	20 cables
	Q	0.01%
	Máximo PMD _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
<p>Nota 1. Los coeficientes de atenuación listados en la tabla no se aplican a cables cortos <i>indoor</i> o de inserción. [IEC 60794-2-11]</p> <p>Nota 2. La región de longitud de onda puede ser extendida a 1260 nm, adicionando 0.07 dB/Km debido a pérdidas <i>scattering Rayleigh</i> al valor de la atenuación en la longitud de onda 1310 nm y la longitud de onda de corte es 1250 nm.</p> <p>Nota 3. El coeficiente de atenuación media se realiza con el test de hidrogeno [IEC 60793-2-50].</p> <p>Nota 4. Este valor permite soportar los requerimientos primarios de PMD_Q.</p>		

Tabla B2. Propiedades de la fibra monomodo categoría A [15]

Atributos de la fibra						
Atributo	Detalle	Valor				
Características modo del campo	Longitud de onda	1310 nm				
	Rango de valores nominales	8.6-9.5 μm				
	Tolerancia	+/- 0.4 μm				
Diámetro de envoltura	Nominal	125.0 μm				
	Tolerancia	+/- 0.7 μm				
Error de concentricidad de núcleo	Máximo	0.5 μm				
No circularidad de la envoltura	Máximo	1%				
Longitud de onda de corte	Máximo	1260 nm				
Pérdidas de macrocurvaturas		ITU-T G.657.A1		ITU-T G.657.A2		
	Radio	15	10	15	10	7.5
	Número de enrollamientos	10	1	10	1	1
	Máximo a 1550 nm [dB]	0.25	0.75	0.03	0.1	0.5
	Máximo a 1625 nm [dB]	1.0	1.5	0.1	0.2	1.0
Tensión de prueba	Mínima	0.69 GPa				
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{min}}$	1300 nm				
	$\lambda_{0\text{max}}$	1324 nm				
	S_{max}	0.092 ps/nm ² × km				
Atributos del cable						
Coeficiente de atenuación. Nota 1	Máximo entre 1310 - 1625 nm. Nota 2.	0.4 dB/Km				
	Máximo a 1383 nm +/- 3 nm Nota 3.	0.4 dB/Km				
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/Km				
Coeficiente PMD. Nota 4	M	20 cables				
	Q	0.01%				
	Máximo PMD _Q	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$				
<p>Nota 1. Los coeficientes de atenuación listados en la tabla no se aplican a cables cortos <i>indoor</i> o de inserción. [IEC 60794-2-11]</p> <p>Nota 2. La región de longitud de onda puede ser extendida a 1260 nm, adicionando 0.07 dB/Km debido a pérdidas <i>scattering Rayleigh</i> al valor de la atenuación en la longitud de onda 1310 nm y la longitud de onda de corte es 1250 nm.</p> <p>Nota 3. El coeficiente de atenuación media se realiza con el test de hidrogeno [IEC 60793-2-50].</p> <p>Nota 4. Este valor permite soportar los requerimientos primarios de PMD_Q.</p>						

La tabla B3 presenta las características de las fibras categoría B recomendadas en [15], para las terminaciones de las redes de acceso o para interconectar edificaciones muy cercanas.

Tabla B3. Propiedades de la fibra monomodo categoría B [15]

Atributos de la fibra							
Atributo	Detalle	Valor					
Características modo del campo	Longitud de onda	1310 nm					
	Rango de valores nominales	8.6-9.5 μm					
	Tolerancia	+/- 0.4 μm					
Diámetro de envoltura	Nominal	125.0 μm					
	Tolerancia	+/- 0.7 μm					
Error de concentricidad de núcleo	Máximo	0.5 μm					
No circularidad de la envoltura	Máximo	1%					
Longitud de onda de corte	Máximo	1260 nm					
Pérdidas de macrocurvaturas		ITU-T G.657.B2			ITU-T G.657.B3		
	Radio	15	10	7.5	10	7.5	5
	Número de enrollamientos	10	1	1	1	1	
	Máximo a 1550 nm [dB]	0.03	0.1	0.5	0.03	0.08	0.15
	Máximo a 1625 nm [dB]	0.1	0.2	1.0	0.1	0.25	0.45
Tensión de prueba	Mínima	0.69 GPa					
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{min}}$	1250 nm					
	$\lambda_{0\text{max}}$	1350 nm					
	S_{max}	0.11 ps/nm ² × km					
Atributos del cable							
Atributo	Detalle	Valor					
Coeficiente de atenuación. Nota 1	Máximo entre 1310 -1625 nm. Nota 2.	0.4 dB/Km					
	Máximo a 1383 nm +/- 3 nm Nota 3.	0.4 dB/Km					
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/Km					
Coeficiente PMD. Nota 4	M	20 cables					
	Q	0.01%					
	Máximo PMD _Q	0.50 ps/ $\sqrt{\text{km}}$					
<p>Nota 1. Los coeficientes de atenuación listados en la tabla no se aplican a cables cortos <i>indoor</i> o de inserción. [IEC 60794-2-11]</p> <p>Nota 2. La región de longitud de onda puede ser extendida a 1260 nm, adicionando 0.07 dB/Km debido a pérdidas <i>scattering Rayleigh</i> al valor de la atenuación en la longitud de onda 1310 nm y la longitud de onda de corte es 1250 nm.</p> <p>Nota 3. El coeficiente de atenuación media se realiza con el test de hidrogeno [IEC 60793-2-50].</p> <p>Nota 4. Este valor permite soportar los requerimientos primarios de PMD_Q.</p>							

Factores físicos que afectan las señales transmitidas por estos medios.

El desempeño de los sistemas basado en XG-PON, depende de fenómenos propios del medio de transmisión utilizado, a continuación se describen estos fenómenos teniendo en cuenta las fibras descritas anteriormente, basados en [17] y [18].

- **Atenuación y dispersión de Rayleigh.** Las irregularidades en el material de construcción de la fibra óptica, como espacios huecos, diferencias de densidad o de composición del material y variaciones en la configuración estructural del mismo, atenúan el haz incidente y ocasionan también variaciones en su dirección de propagación, como estas irregularidades dependen del proceso de fabricación, su incidencia es difícil de eliminar en su totalidad. Cuando la longitud de onda del haz incidente es mayor al tamaño de la irregularidad de la fibra, se presenta el fenómeno denominado dispersión de Rayleigh, el cual, incide en el desempeño de un sistema NG-PON, principalmente cuando se implementan enlaces bidireccionales bajo una fibra, debido a que las variaciones en la dirección de propagación, pueden ser omnidireccionales, según [17].

La atenuación consiste en la disminución de la potencia de la señal a medida que esta se propaga, la reducción de esta potencia se produce de manera exponencial con respecto a la longitud que recorre la onda. Entre las causas de atenuación se encuentran la absorción de la señal debido a las impurezas y a las características del material de construcción de la fibra, la ecuación 1.1 es utilizada para describir este fenómeno, de acuerdo a [18].

$$\alpha[dB] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right) \quad 1.1$$

Cuando las irregularidades del material dependen de su densidad, la atenuación depende de la longitud de onda del haz incidente, donde a mayor longitud de onda λ , se presenta menor atenuación, como lo indica la expresión 1.2, donde k , depende de la constante de Boltzman, la temperatura de la fibra y la comprensibilidad isotérmica del material y n es el índice de refracción de la fibra, según [17].

$$\alpha_R = k \cdot \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \cdot (n^2 - 1)^2 \quad 1.2$$

El tendido de la fibra de los sistemas basado en NG-PON 1 debe adaptarse a los requisitos de las instalaciones físicas, por tanto para su implementación debe someterse la fibra a curvaturas que ocasionan pérdidas en el nivel de la intensidad de la señal de luz, denominadas pérdidas por macro curvaturas. Otras pérdidas, denominadas pérdidas por micro curvaturas se refieren a las pérdidas que presenta la señal debido al efecto de las curvaturas de menor radio ocasionadas por el empaquetamiento de las fibras dentro del cable guía [18].

- **Dispersión intramodal.** El comportamiento de una señal depende del material de construcción de la fibra óptica, así, el índice de refracción de una fibra depende de la frecuencia de operación de la señal, este aspecto incide en la duración espectral del pulso cuando es trasladado a través de la fibra. Dependiendo del material utilizado se tiene un coeficiente de dispersión, su comportamiento se describe mediante la ecuación 1.3. según [17].

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} [ps/nm.km] \quad 1.3$$

Este coeficiente de dispersión depende de la longitud de onda de operación y del material de construcción de la fibra, como se indica en la figura B.5.

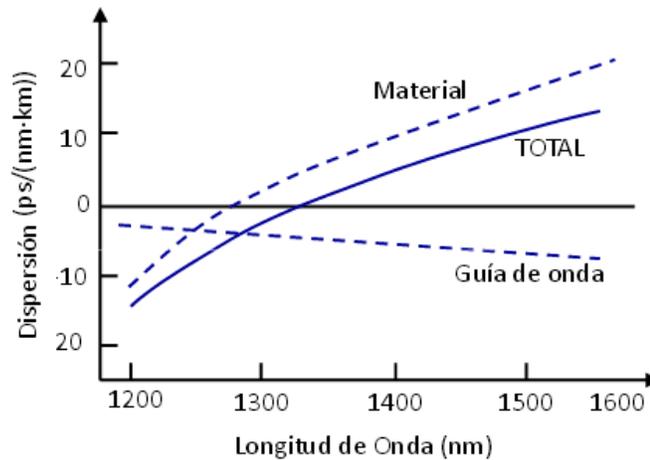


Figura B.5. Comportamiento de la Dispersión vs Longitud de Onda [17]

Se puede afirmar que el pulso emitido por una fuente de luz con ancho espectral $\delta\lambda$ que recorre una longitud L sobre la fibra, alcanza una anchura espectral relativa δT_g , como se indica en 1.4, según [17].

$$\delta T_g = D_m \cdot L \delta\lambda \quad 1.4$$

En la figura 1.6 también se presenta otro caso de dispersión, denominado dispersión por guía de onda, este fenómeno se debe a que 80% de la energía de la señal va por el núcleo pero parte de esta se dispersa por la cobertura, esto depende de la constante de propagación que depende de la longitud de onda de operación β . La dispersión por guía de onda es un aspecto que afecta notablemente el desempeño de los sistemas en fibras monomodo. El tiempo de dispersión δt depende de los índices de refracción, longitud de onda, frecuencia normalizada de operación V y parámetros geométricos de la fibra utilizada, como se indica en 1.5 y 1.6, según [17] y [18].

$$\delta t = D_g \cdot L \delta\lambda \quad 1.5$$

$$D_g = -\frac{LV}{c}(n_1 - n_2) \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad 1.6$$

Donde b, es la constante de propagación normalizada, la cual está definida por la expresión 1.7. V se encuentra definida para valores entre [2.2.4]

$$b = \frac{\beta/k_o - n_2}{n_1 - n_2} \quad 1.7$$

- **Efectos no lineales de la fibra.** Estos efectos se presentan principalmente cuando la velocidad supera 2.5Gbps y la potencia de la señal excede algunos milivatios, y su influencia es significativa al utilizar la técnica WDM. Entre ellos se encuentran la dispersión debida a la interacción de los fotones con los modos de vibración del material, a esta dispersión se le conoce como scattering estimulado de Raman, que se presenta cuando los fonones (ondas acústicas) interaccionan con el material dando lugar a dos nuevas frecuencias denominadas frecuencia Stokes y frecuencias anti-Stokes, estas frecuencias pueden incidir en los canales WDM, transfiriendo su energía presentando amplificación por efectos de bombeo. que tienen un efecto acumulativo [16][17].

El efecto de modulación de fase se presenta cuando por incidencia eléctrica de las señales, el índice del material cambia dependiendo de la amplitud de la señal aplicada, ocasionando desfases en la señal y por tanto variaciones en la frecuencia, como estas variaciones dependen de la intensidad de la señal se puede presentar diferentes fases dependiendo del comportamiento del material en el tramo de fibra. Un caso especial es la modulación cruzada de fase (XPM, Cross Phase Modulation) que se presenta cuando se utilizan canales bidireccionales y por tanto los cambios de frecuencia aparecen en ambos canales e inciden en ellos, según [17].

[14] Recomendación ITU-T G652. "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", noviembre de 2009

[15] Recomendación ITU-T G657. "Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network", octubre de 2012.

[16] Martin, J. "Sistemas y Redes de Comunicaciones Ópticas". ISBN:84-205-4008-0. Pearson Educación S.A. 2004.

- [17] Recomendación ITU-T G-Sup 39-201209. "Optical and system design and engineering considerations". Septiembre, 2012.
- [18] España, M. "Comunicaciones Ópticas. Conceptos esenciales y resolución de ejercicios". ISBN:84-7978-685-X. Ediciones Diaz de Santos S.A. 2005.

ANEXO C

MODULADOR DPSK

Se utiliza el externo Modulador Mach Zehnder (MZM), debido a que es controlado simétricamente, siempre produce saltos exactos de π radianes, a pesar de que se presenten valores residuales en la intensidad del láser. Debido a que se requiere una baja dispersión, se utiliza un láser con un ancho de línea estrecho, este requerimiento en los escenarios de simulación será implementado mediante el láser DFB. El modulador DPSK utiliza señal NRZ, como lo exige la norma de la UIT-T [2] y permitiría la transición desde el formato de modulación OOK, utilizados en PON anteriores a XG-PON.

El bloque modulador tiene como señal de información, la diferencia de fase entre dos señales consecutivas obtenidas de la señal NRZ de 10 Gbps, a este módulo se le denomina codificador diferencial, también tiene como señal portadora en formato óptico, la señal entregada por el láser DFB. A la salida del modulador MZM se obtendrá la señal DPSK, como se muestra en la figura C.1.

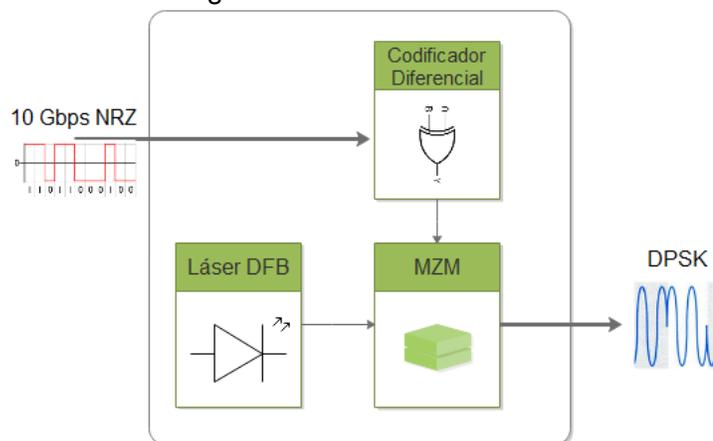


Figura C.1. Modulador DPSK

El demodulador DPSK consiste de un DLI que se caracterizan por expresar los cambios de fase de las señales en cambios de intensidad, también por la alta sensibilidad en los receptores que los incluyen, debido al manejo de la información desfasada entre los fotodetectores que llegan a su entrada. Entre los DL se encuentra los MZI que presenta en una de sus salidas la información afectada por el ruido del canal y en la otra se tiene el ruido del canal según [9] - [11]. En la figura C.2 se muestra de forma general, la forma como opera un demodulador DPSK, incluyendo el MZI también se ofrece un esquema para entender el manejo de las fases en este demodulador.

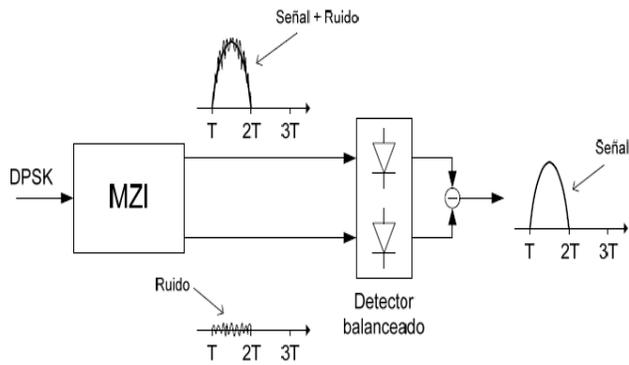
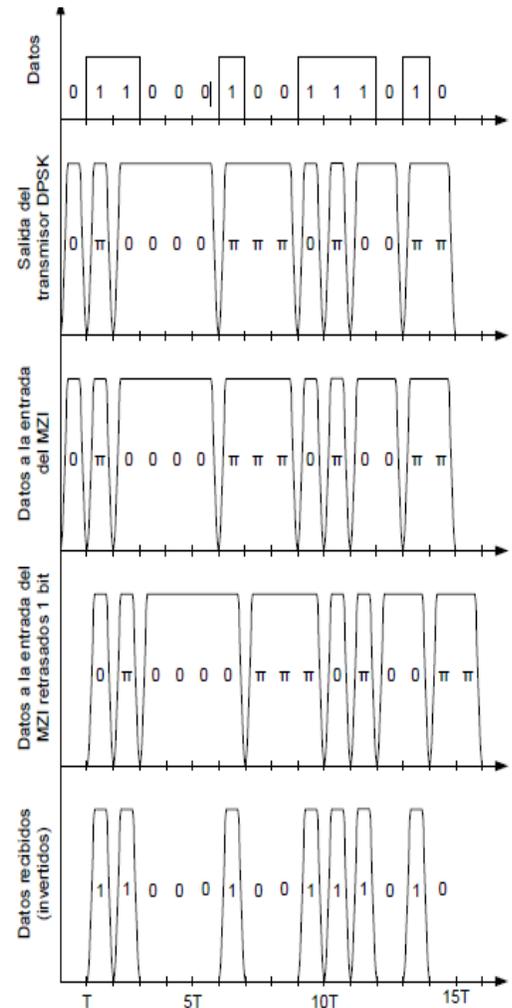


Figura C.2 Demodulador DPSK [9]



BIBLIOGRAFIA

- [9] Carmona, Claudia. “Comparación de técnicas de modulación eléctrico ópticas en redes de acceso PON”. Tesis para optar al título de magister. Universidad de Antioquia 2013.
- [10] D. van den Borne. “Robust optical transmission system”. ISBN 978-90-386-1794-7. Technische Universiteit Eindhoven, Países Bajos. 2008.
- [11] A. Lerin. “Formatos de modulación para altos regímenes binarios”. Universidad Politécnica de Cataluña. 2006

ANEXO D CAMPOS FINITOS DE GALOIS

Un campo es una estructura algebraica conformada por un conjunto de elementos para los cuales las operaciones de adición, resta, multiplicación y división satisfacen las propiedades dadas en la tabla D.1. Las propiedades son explicadas teniendo en cuenta lo descrito en [1][2][3][4], para dar más claridad a la aplicación de estas propiedades en las operaciones ejemplificadas en esta sección del documento.

- La propiedad 1 se puede interpretar como: la adición y la multiplicación de dos elementos del campo siempre da como resultado un elemento del campo.
- Las propiedades 2-4 pueden interpretarse como: la adición y la multiplicación satisfacen las leyes conmutativa, asociativa y distributiva. La suma no satisface la ley distributiva.
- La propiedad 5 del campo se explica mediante la definición del cero y la unidad de un campo, de la siguiente manera: Un elemento del campo es cero si solo si $\alpha + 0 = \alpha$. Un elemento del campo es la unidad si solo si $\alpha \cdot 1 = \alpha$.
- La propiedad 6 permite definir la resta como la adición de la inversa, por lo tanto para cada elemento del campo existe un inverso aditivo tal que $\alpha + (-\alpha) = 0$. También mediante esta propiedad se define la división como la multiplicación por el inverso, por lo tanto para cada elemento del campo diferente de cero ($b \neq 0$), hay un inverso multiplicativo (b^{-1}) tal que $b \cdot b^{-1} = 1$
- La operación suma en un campo también cumple con la siguiente propiedad: La adición de dos elementos idénticos del campo es cero: $\alpha^m + \alpha^m = 0$.
- Y se define la multiplicación de dos elementos como: $\alpha^m \cdot \alpha^n = \alpha^{m+n}$.
- En campos finitos no se opera con números negativos, es decir, $-\alpha = \alpha$.

Tabla D.1. Operaciones que definen un campo F [1][2][3][4]

Propiedad		Suma	Multiplicación
1	Operación	$a+b \in F, \forall a, b \in F$	$ab \in F, \forall a, b \in F$
2	Ley Conmutativa	$a+b = b+a, \forall a, b \in F$	$ab = ba, \forall a, b \in F$
3	Ley Asociativa	$(a+b)+c = a+(b+c), \forall a, b, c \in F$	$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c), \forall a, b, c \in F$
4	Ley Distributiva	No aplica	$(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c, \forall a, b, c \in F$
5	Módulo del campo en la operación	$\exists z \in F, a+z = a, \forall a \in F$	$\exists 1 \in F, a \cdot 1 = a, \forall a \in F$
6	Inverso del campo en la operación	$\exists -a \in F, a+(-a) = z, \forall a \in F$	$\exists a^{-1} \in F, a \cdot a^{-1} = 1, \forall a \neq 0, a \in F$

Si F es un campo finito con q elementos y $\alpha \in F$ es un elemento no cero, entonces $\alpha^{q-1} = 1$. Esto se puede interpretar como la condición del límite del número de elementos que pertenecen a un campo finito, es decir, los elementos $GF(q)$, están definidos desde 0 hasta $q - 1$, entonces al operar con α^x , donde $x > q-1$ los resultados de estas operaciones toman valores iniciales de $GF(q)$.

En general, el campo finito solo puede ser construido si q es un número primo¹⁹ o una potencia de un primo²⁰, de tal manera que si $q = p^m$, donde p es primo y m es un entero positivo, se obtiene una extensión del campo base $GF(q)$ denotada $GF(p^m)$, donde m es la extensión y p la característica del campo.

El campo $GF(p^m)$ contiene $p^m - 1$ elementos distintos de cero y un elemento cero, entre estos números se encuentra un elemento generador o elemento primitivo denotado por α , de manera que cada elemento distinto de cero definido en el campo, se puede expresar como una potencia de α según [1][2].

Para la codificación y decodificación RS, se utiliza la extensión del campo base $GF(2)$ que se denota $GF(2^m)$. De $GF(2^m)$ se sabe que:

$$\alpha^{2^m-1} = \alpha^0 = 1 \quad (1.1)$$

Por propiedad de campos finitos, la ecuación (1.1) también puede ser representada cómo se indica en la ecuación (A.2).

$$\alpha^{2^m-1} + 1 = 0 \quad (1.2)$$

Para generar el campo se utiliza un polinomio denominado *polinomio primitivo* $p(x)$, el cual se caracteriza por ser un polinomio binario en $GF(2)$, irreducible de grado m , que divide de forma exacta a $x^n + 1$ para $n = 2^m - 1$ y no divide a $x^i + 1$, siendo $i < n$. Utilizando el polinomio primitivo se generan los 2^m elementos del campo incluyendo el elemento cero y el elemento unidad [1]-[3].

Si se supone el campo $GF(2^3)$ [7], con $m = 3$, se tiene según la expresión (A.2) que $\alpha^{2^m-1} + 1 = \alpha^7 + 1$. Los factores de este polinomio se indican en la ecuación (1.3).

$$\alpha^7 + 1 = (\alpha + 1)(\alpha^3 + \alpha + 1)(\alpha^3 + \alpha^2 + 1) \quad (1.3)$$

Los dos polinomios de grado tres de la ecuación (1.3) son primitivos porque son irreducibles y para este caso se escoge arbitrariamente el último polinomio como se indica en la ecuación (1.4).

$$(\alpha^3 + \alpha^2 + 1) = 0 \quad (1.4)$$

Por propiedades de la adición en los campos finitos, la ecuación (1.4) se expresa como se indica en la ecuación (1.5).

$$\alpha^3 = \alpha^2 + 1 \quad (1.5)$$

¹⁹ Si q es un número primo, se refiere a un campo base.

²⁰ Si q es una potencia de un número primo, se refiere a un campo extendido.

Los elementos diferentes de cero del campo son encontrados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \alpha^0 &= 1 \\ \alpha^1 &= \alpha \\ \alpha^2 &= \alpha^2 \\ \alpha^3 &= \alpha^2 + 1 \\ \alpha^4 &= \alpha \cdot \alpha^3 = \alpha \cdot (\alpha^2 + 1) = \alpha^3 + \alpha = \alpha^2 + \alpha + 1 \\ \alpha^5 &= \alpha \cdot \alpha^4 = \alpha \cdot (\alpha^2 + \alpha) = \alpha^3 + \alpha^2 = (\alpha^2 + \alpha + 1) + \alpha^2 = \alpha + 1 \\ \alpha^6 &= \alpha \cdot \alpha^5 = \alpha \cdot (\alpha + 1) = \alpha^2 + \alpha \\ \alpha^7 &= \alpha \cdot \alpha^6 = \alpha \cdot (\alpha^2 + \alpha) = \alpha^3 + \alpha^2 = 1 = \alpha^0 \\ \alpha^8 &= \alpha \cdot \alpha^7 = \alpha \cdot (\alpha^0) = \alpha \\ \alpha^9 &= \alpha \cdot \alpha^8 = \alpha \cdot (\alpha) = \alpha^2 \\ \alpha^{10} &= \alpha \cdot \alpha^9 = \alpha \cdot (\alpha^2) = \alpha^3 = \alpha^2 + 1 \end{aligned}$$

D.1. REPRESENTACION DE LOS ELEMENTOS GF

Para facilitar las operaciones entre los elementos del campo finito, se utilizan diferentes representaciones. En la primera columna de la tabla D.2, los elementos del GF(8) con polinomio generador $p(\alpha)$ se representan utilizando las potencias de α , esta representación se denomina representación exponencial. La representación polinomial utiliza la operación suma de los diferentes elementos del campo finito, esta representación se puede observar en la segunda columna de la tabla D.2. La tercera y cuarta columna corresponden a la representación binaria y decimal respectivamente.

Tabla D.2 Elementos del Campo Finito GF(2³) con $p(\alpha) = \alpha^3 + \alpha^2 + 1 = 0$.

Representación exponencial	Representación polinomial	Representación binaria ($\alpha^2 \alpha 1$)	Representación decimal
0	0	0 0 0	0
α^0	1	0 0 1	1
α^1	α	0 1 0	2
α^2	α^2	1 0 0	4
α^3	$\alpha^2 + 1$	1 0 1	5
α^4	$\alpha^2 + \alpha + 1$	1 1 1	7
α^5	$\alpha + 1$	0 1 1	3
α^6	$\alpha^2 + \alpha$	1 1 0	6
α^7	α^0	0 0 1	1
α^8	α	0 1 0	2
α^9	α^2	1 0 0	4
α^{10}	$\alpha^2 + 1$	1 0 1	5

D.2. OPERACIONES CON ELEMENTOS EN GF

En esta sección se presenta la aplicación de las propiedades en campos finitos para describir las diferentes operaciones que se pueden establecer entre los elementos GF.

D.2.1 Suma y Resta

La operación suma se define en [2][3][5] como lo indica la expresión (A.6), donde se utiliza la representación polinómica y la aplicación de las propiedades que definen un campo finito, para obtener el resultado.

$$b + c = [b + c] \text{ mod } p(\alpha) \quad (1.6)$$

Si se asume que $b = \alpha^2 + \alpha + 1$ y $c = \alpha + 1$, elementos del campo finito de $GF(2^3)$ con representación polinomial de la tabla D.2, la suma de estos elementos está dada por (1.7).

$$(\alpha^2 + \alpha + 1) + (\alpha + 1) = \alpha^2 \quad (1.7)$$

El resultado se debe a que al sumar elementos del mismo campo se obtiene como resultado el elemento cero, también se aplica la propiedad módulo de la suma en GF, debido a que la suma de un elemento del campo con un elemento cero, da como resultado el elemento con el cual se operó.

D.2.2. Multiplicación y División

Sean b y c dos elementos de $GF(2^m)$, se presenta a continuación el proceso para determinar la multiplicación de elementos con representación polinomial. Sean $b = (\alpha^2 + \alpha + 1)$ y $c = (\alpha^2 + 1)$, elementos del campo finito $GF(2^3 = 8)$, la multiplicación se realiza utilizando la ley distributiva entre estos números, como se muestra a continuación.

$$[(\alpha^2 + \alpha + 1) \cdot (\alpha^2 + 1)] = \alpha^4 + \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha^2 + \alpha + 1 \quad (1.9)$$

El paso siguiente es identificar si entre la serie de números dada por (1.9) existen números iguales, para reducir la expresión, debido a que la suma de números iguales da como resultado un elemento cero, es resultado se expresa en (1.10)

$$[(\alpha^2 + \alpha + 1) \cdot (\alpha^2 + 1)] = \alpha^4 + \alpha^3 + \alpha + 1 \quad (1.10)$$

Luego, se reemplaza en (1.11) cada número por su representación polinomial y se vuelve a buscar los elementos semejantes para ir reduciendo la expresión, como se indica en (1.11).

$$\alpha^2 + \alpha + 1 + \alpha^2 + 1 + \alpha + 1 = 1 \quad (1.11)$$

Otra forma como realizar la operación multiplicación entre b y c es utilizando su representación exponencial como se indica en (1.12), se multiplican estos elementos sumando los exponentes y se da el resultado en forma polinomial, Si el exponente resultante es mayor al límite del campo finito, es decir a $q-1$, se opta por dividir el numero en representación exponencial con el módulo multiplicativo de $GF(8)$, este proceso es representado en (1.13).

$$[b * c] = [(\alpha^2 + \alpha + 1).(\alpha^2 + 1)] \quad (1.12)$$

$$[b * c] = [\alpha^4 * \alpha^3] = \alpha^7 = 1 \quad (1.13)$$

Para la división se utiliza la representación exponencial de los números b y c y se restan los exponentes. Si el exponente del numerador es menor que el exponente del denominador, se multiplica el numerador por el módulo multiplicativo de GF, y se procede a realizar la división normalmente. Esta operación se describe mediante (A.14).

$$\frac{c}{b} = \frac{\alpha^3}{\alpha^4} = \frac{\alpha^3 * 1}{\alpha^4} = \frac{\alpha^3 * \alpha^7}{\alpha^4} = \frac{\alpha^{10}}{\alpha^4} = \alpha^6 = \alpha^2 + \alpha \quad (1.14)$$

El desarrollo de estas operaciones se realizó basándose en la ejemplificación dada en [1][2][6].

D.3. OPERACIONES CON POLINOMIOS EN GF.

Para implementar el código RS se utiliza la representación polinomial de la información y se realizan operaciones entre polinomios. Las operaciones que pueden presentarse se realizan relacionando los monomios que conforman los polinomios con las operaciones deseadas, esto implica que se pueden relacionar los polinomios con operadores suma, resta, multiplicación y división.

Un polinomio está conformado por varios monomios de diferente orden y el grado del polinomio corresponde al exponente de mayor orden. También, un monomio está compuesto por un coeficiente numérico que pertenece a GF y un coeficiente literal que puede representar una variable, este coeficiente tiene un exponente que corresponde al orden de este monomio.

1. Suma de polinomios. Para la suma de polinomios se relacionan los monomios de igual grado mediante el operador suma o resta. Se aplican las propiedades de la suma de monomios, es decir, se suman los coeficientes numéricos que pertenecen a GF(q) y el grado del monomio resultante es el mismo grado de los monomios sumandos. A continuación se presenta un ejemplo utilizando números que pertenecen al GF definido anteriormente. En este caso se usan las representaciones decimal y polinomial.

$$(7x^2 + 2) + (x^2 + 2x + 4) = (7x^2 + x^2) + 2x + (2 + 4)$$

$$(7 + 1)x^2 + 2x + (2 + 4)$$

$$(\alpha^2 + \alpha + 1 + 1)x^2 + 2x + (\alpha + \alpha^2)$$

$$(\alpha^2 + \alpha)x^2 + 2x + (\alpha + \alpha^2)$$

$$6x^2 + 2x + 6$$

2. Multiplicación de polinomios. En la multiplicación de polinomios se utiliza la ley distributiva, relacionando mediante la operación multiplicación cada uno de los monomios de los polinomios que intervienen. Establecida la relación entre los

monomios, se procede a multiplicar los coeficientes numéricos que pertenecen a GF(q) y los coeficientes literales. Los coeficientes numéricos se multiplican siguiendo la descripción dada anteriormente, los coeficientes literales aplican la suma de exponentes, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}(3x + 6) * (5x^2 + 1) &= (3 * 5)x^3 + 3x + (6 * 5)x^2 + 6 \\ (\alpha^5 * \alpha^3)x^3 + 3x + (\alpha^6 * \alpha^3)x^2 + 6 \\ \alpha^8x^3 + 3x + \alpha^9x^2 + 6\end{aligned}$$

El número de elementos del campo finito con el que se está trabajando es 8 y los exponentes máximos que se admiten en los números con representación exponencial es $q-1=7$, por tanto se debe dividir estos números por el módulo multiplicativo α^7 , como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}\alpha^1x^3 + 3x + \alpha^2x^2 + 6 \\ 2x^3 + 3x + 4x^2 + 6\end{aligned}$$

3. División de polinomios. Para realizar la división entre dos polinomios se organizan estos en orden descendente, donde el grado del polinomio dividendo es mayor al grado del polinomio divisor. Se toman los monomios de mayor grado de estos polinomios y se realiza la división entre los coeficientes numéricos y coeficientes literales.

El resultado de esta operación hace parte del cociente de esta división, este número se multiplica con cada uno de los elementos que conforman el polinomio divisor y el resultado de esta multiplicación se opera con el polinomio dividendo mediante la suma algebraica.

El resultado de esta suma es el residuo parcial de la división, si el grado de este resultado es mayor igual al grado del polinomio divisor. En este caso este polinomio residuo pasa a ser el nuevo polinomio dividendo y se realiza nuevamente la división entre este polinomio y el polinomio divisor, hasta que el grado del polinomio residuo sea menor que el grado del polinomio divisor.

$$\frac{2x^3 + 4x^2 + 3x + 6}{5x^2 + 1}$$

- Paso 1. Se dividen los monomios de mayor grado, encontrando el cociente parcial de la división.

$$\frac{2x^3}{5x^2} = 3x$$

- Paso 2. Se multiplica el resultado del paso 1 con el polinomio primitivo

$$3x * (5x^2 + 1) = 2x^3 + 3x$$

- Paso 3. Se determina el residuo parcial sumando el resultado del paso 2 con el dividendo

$$(2x^3 + 4x^2 + 3x + 6) - (2x^3 + 3x) = 4x^2 + 6$$

- Paso 4. Se inicia con la nueva división, debido al grado de los polinomios residuo y divisor son iguales.

$$\frac{4x^2 + 6}{5x^2 + 1}$$

- Paso 5. Se realiza la división entre los monomios de mayor grado.

$$\frac{4x^2}{5x^2} = 6$$

- Paso 6. Se multiplica el cociente de esta división por el polinomio divisor

$$6 * (5x^2 + 1) = 4x^2 + 6$$

- Paso 7. Se determina el residuo de la división, sumando el resultado anterior con el nuevo dividendo.

$$4x^2 + 6 + 4x^2 + 6 = 0$$

El resultado final de la división arroja la siguiente información:

Cociente: $3x + 6$ Residuo: 0.

En la figura D.1 se muestra de forma general las operaciones dadas para esta división.

$$\begin{array}{r}
 2x^3 + 4x^2 + 3x + 6 \\
 \underline{2x^3 + \quad + 3x} \\
 4x^2 + 6 \\
 \underline{4x^2 + 6} \\
 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 5x^2 + 1 \\
 \hline
 3x + 6
 \end{array}$$

Figura D.1. División entre dos polinomios en GF(8)

La realización de este anexo permite condensar información que relaciona la descripción de campos finitos y sus operaciones, las cuales son necesarias para la implementación de los codificadores Reed Solomon.

Se agradece a los egresados de la Universidad del Cauca, Oscar Muñoz y Roger Castillo, por la colaboración brindada al permitirnos acceso a la documentación relacionada con el estudio de las operaciones en campos de Galois, que facilitó comprender esta temática y desarrollar esta anexo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Garcia. Construcción de Operadores Básicos sobre Campos Finitos GF (2). Tesis Doctoral. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México. 2004.
- [2] O. Muñoz, R. Castillo. Análisis del desempeño a nivel físico del sistema de comunicaciones con decodificación RS que incluye el algoritmo Euclidiano y Berlekamp. Universidad del Cauca, 2007.
- [3] Lidl, R. Niederreiter Harald. Finite Fields. ISBN: 052139231. Cambridge University Press, 2003.
- [4] Mullen, Gary. Mummert, Carl. Finite Field and Applications. ISBN: 978-0-8218-4418-2. Editorial Board, 2000.
- [5] Shparlinski, Igor. Finite Fields: Theory and Computation. The Meeting Point of Number Theory, Computer Science, coding Theory and Cryptography. ISBN:0-7923-5662-4. Lluwer Academics Publishers. 1999.
- [6] R. Gomez, "Finite Fields. Cryptography and Network Security. Principles and Practices". ISBN: 0-130-91429-0. Ed. Prentice Hall. 2003.

ANEXO E CODIGO RS(7,3) QUE INCLUYE ALGORITMO EUCLIDIANO

En esta sección se describen los pasos de codificación y decodificación con el código RS(7,3) que es creado a partir del campo finito GF(8) a partir del polinomio $\alpha^3 = \alpha + 1$.

E.1. GENERACION DEL GF(8)

Los elementos del campo finito GF(8) con $p(\alpha) = \alpha^3 + \alpha + 1 = 0$ se presentan en la tabla E.1., con sus cuatro representaciones, que permiten las operaciones entre cada uno de sus elementos.

Tabla E.1 Elementos del Campo Finito GF(2³) con $p(\alpha) = \alpha^3 + \alpha + 1 = 0$

Representación exponencial	Representación polinomial	Representación binaria ($\alpha^2 \alpha 1$)	Representación Decimal
0	0	0 0 0	0
α^0	1	0 0 1	1
α^1	α	0 1 0	2
α^2	α^2	1 0 0	4
α^3	$\alpha + 1$	0 1 1	3
α^4	$\alpha^2 + \alpha$	1 1 0	6
α^5	$\alpha^2 + \alpha + 1$	1 1 1	7
α^6	$\alpha^2 + 1$	1 0 1	5
α^7	α^0	0 0 1	1
α^8	α	0 1 0	2
α^9	α^2	1 0 0	4
α^{10}	$\alpha + 1$	0 1 1	3

E.2. CODIFICACION RS(7,3)

Inicialmente se presenta la información de usuario, mediante el polinomio $m(x)$. Debido a que el código es RS(7,3), la palabra original está conformada por tres símbolos $k = 3$ y quedará codificada en una palabra de siete símbolos $n = 7$ y para cumplir con las condiciones de codificación, cada símbolo está conformado por tres bits, debido a la condición $n = 2^m - 1$. Este código tiene la capacidad de corregir 2 símbolos, $t = 2$, debido a la condición $t = \frac{n-k}{2}$.

De acuerdo a la tabla E.1, los números son representados en GF(8) mediante los elementos que van de [0 – 7]. Se escogen de forma aleatoria los elementos [6, 7, 1]. La palabra de información está representada por el polinomio $m(x) = 6x^2 + 7x + 1$.

De acuerdo al proceso de codificación, se encuentra el polinomio $p(x) = m(x) \cdot x^{n-k}$. El polinomio de corriente correspondiente al polinomio de información es el siguiente:

$$p(x) = m(x) \cdot x^4 = 6x^6 + 7x^5 + 1x^4.$$

Posteriormente, se obtiene el polinomio generador de codificación $g(x) = \prod_{i=1}^{n-k} (x - \alpha^i)$. El polinomio generador de codificación está dado por:

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2)(x - \alpha^3)(x - \alpha^4) = x^4 + 3x^3 + x^2 + 2x + 3.$$

El polinomio de información de redundancia está dado por $R(x) = p(x) \bmod g(x)$, operación que se muestra a continuación:

$$\begin{array}{r}
 6x^6 + 7x^5 + 1x^4 \qquad \qquad \qquad | \quad x^4 + 3x^3 + x^2 + 2x + 3 \\
 \underline{6x^6 + x^5 + 6x^4 + 7x^3 + x^2} \qquad \qquad \qquad 6x^2 + 6x + 6 \\
 6x^5 + 7x^4 + 7x^3 + x^2 \\
 \underline{6x^5 + x^4 + 6x^3 + 7x^2 + x} \\
 6x^4 + x^3 + 6x^2 + x \\
 \underline{6x^4 + x^3 + 6x^2 + 7x + 1} \\
 6x + 1
 \end{array}$$

El polinomio de información codificada está dada por $c(x) = p(x) + R(x)$, para la palabra $m(x)$, el polinomio que representa su codificación es:

$$c(x) = 6x^6 + 7x^5 + 1x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 6x + 1.$$

E.3. EFECTO DEL CANAL DE COMUNICACIONES

La palabra codificada $c(x)$ pasa a través del canal de comunicaciones y es modificada, en este caso la palabra que llega al receptor está representada por el polinomio $r(x)$.

$$r(x) = 7x^6 + 7x^5 + x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 6x + 5$$

E.4. DECODIFICACION RS(7,3) QUE INCLUYE EL ALGORITMO EUCLIDIANO

El proceso de decodificación consiste en las etapas de detección, corrección de errores y recuperación de información. A continuación se describen estas etapas mediante las operaciones relacionadas a estas etapas.

E.4.1. Cálculo del Síndrome. En el receptor, el decodificador inicia con la fase de detección de errores. En este caso el proceso de detección se realiza calculando el síndrome, evaluando las raíces del polinomio generador palabras codificadas en el polinomio recibido.

Paso 1. Evaluación de la primera raíz de $g(x)$ en $r(x)$.

$$S_1 = r(\alpha) = 7\alpha^6 + 7\alpha^5 + \alpha^4 + 6\alpha + 5 = 1$$

Paso 2. Evaluación de la segunda raíz de $g(x)$ en $r(x)$.

$$S_2 = r(\alpha^2) = 7\alpha^{12} + 7\alpha^{10} + \alpha^8 + 6\alpha^2 + 5 = 3$$

Paso 3. Evaluación de la tercera raíz de $g(x)$ en $r(x)$.

$$S_3 = r(\alpha^3) = 7\alpha^{18} + 7\alpha^{15} + \alpha^{12} + 6\alpha^3 + 5 = 2$$

Paso 4. Evaluación de la cuarta raíz de $g(x)$ en $r(x)$.

$$S_4 = r(\alpha^4) = 7\alpha^{24} + 7\alpha^{20} + \alpha^{16} + 6\alpha^4 + 5 = 7$$

Se organiza el polinomio síndrome con el orden inverso de las raíces encontradas, como se muestra a continuación:

$$S(x) = 7x^3 + 2x^2 + 3x + 1 \neq 0$$

E.4.2. Algoritmo Euclidiano. Los elementos del polinomio síndrome son diferentes de cero, entonces el decodificador inicia la etapa de corrección de errores con la obtención de los polinomios de posición de error y valor de error, mediante el algoritmo Euclidiano.

Paso 1. Se establecen las condiciones iniciales

$r_{-1}(x) = x^{2t} = x^4$	$b_{-1}(x) = 0$	$a_{-1}(x) = 1$
$r_0(x) = S(x) = 7x^3 + 2x^2 + 3x + 1$	$b_0(x) = 1$	$a_0(x) = 0$

Paso 2. Inicio del ciclo

Para $j = 1$

$$\text{División: } \frac{x^4}{7x^3 + 2x^2 + 3x + 1}$$

$$\text{Cociente: } q_1(x) = 4x + 7$$

$$\text{Residuo: } r_1(x) = 2x^2 + 6x + 7$$

$$a_1 = a_{-1}(x) + q_1(x)a_0(x) = 1$$

$$b_1 = b_{-1}(x) + q_1(x)b_0(x) = 4x + 7$$

Para $j = 2$

$$\text{División: } \frac{7x^3 + 2x^2 + 3x + 1}{2x^2 + 6x + 7}$$

$$\text{Cociente: } q_2(x) = 6x$$

$$\text{Residuo: } r_2(x) = 7x + 1$$

$$a_2 = a_0(x) + q_2(x)a_1(x) = 6x$$

$$b_2 = b_0(x) + q_2(x)b_1(x) = 5x^2 + 4x + 1$$

Paso 3. Obtención de polinomios de valor y posición

El grado de $r_2(x)$ es menor que $2t$, por tanto se obtienen los polinomios de posición de error y de valor de error.

$$\sigma(x) = b_2(x) = 5x^2 + 4x + 1. \quad \text{Polinomio de posición de error}$$

$$w(x) = r_2(x) = 7x + 1. \quad \text{Polinomio de valor de error}$$

E.4.3. Algoritmo de Chain. Mediante este algoritmo se buscan las raíces del polinomio de posición de error, que dan información de la posición de error.

Raíces $[X]$	Inversa $[X^{-1}]$
$1 = 1$	$1 = \alpha^0$
$2 = \alpha$	$5 = \alpha^6$

E.4.4. Algoritmo de Forney. Se determina el valor del error.

Paso 1. Se determina la derivada del polinomio de posición de error.

$$d(x) = \frac{d(\sigma(x))}{dx} = (5 + 5)x + 4 = 4$$

Paso 2. Se determinan los valores de error, aplicando la siguiente ecuación:

$$Y_i = \frac{w(X_i^{-1})}{d(X_i^{-1})} = \frac{7X_i^{-1} + 1}{4} = 3X_i^{-1} + 7$$

$Y_1 = 3X_1^{-1} + 7 = 3 \cdot 1 + 7 = 3 + 7 = 4$
$Y_2 = 3X_2^{-1} + 7 = 3 \cdot 5 + 7 = 4 + 7 = 3$

E.4.5. Conformación del vector de error.

La posición x^0 tiene magnitud 4

La posición x^6 tiene magnitud 3

El polinomio de error es: $e(x) = 3x^6 + 4$

E.5. RECUPERACION DE INFORMACION

El vector se recupera sumando al polinomio recibido el vector de error conformado.

$$\begin{aligned}c(x) &= r(x) + e(x) \\c(x) &= 7x^6 + 7x^5 + x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 6x + 5 + 3x^6 + 4 \\c(x) &= 4x^6 + 7x^5 + x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 6x + 1\end{aligned}$$

El código RS(7,3) tiene capacidad de corrección de 2 errores, pero la mitad de su potencial lo utiliza para detectar y la otra mitad para corregir. Por esta razón puede solamente corregir 1 error.

ANEXO F DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA RS QUE INCLUYE EL ALGORITMO EUCLIDIANO

El sistema de detección y corrección de errores denominado en este documento RSE, consiste en la parte del transmisor canal y receptor para transmisión, ingreso de errores en el vector de información y detección y corrección de errores. Posteriormente se realiza una interfaz que permite visualizar el comportamiento de la tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate) frente a las variaciones de relación señal a ruido (SNR, Signal to Noise Rate). En el proceso de detección se utilizan los algoritmos Euclidiano, Chain y Forney.

En las siguientes secciones se presenta la descripción del software implementado de acuerdo a metodología de diseño de sistemas de telecomunicaciones, donde se describen sus funciones, variables de entrada y de salida.

F.1. Codificador RS.

Función: El codificador RS crea la palabra mensaje y la codifica, también expresa la palabra codificada tanto en bits como en el sistema de campos finitos.

Variables de entrada:

ms: palabra mensaje de k símbolos enteros

b11: cantidad de palabras mensaje de k símbolos que desea analizar.

k: cantidad de símbolos de la palabra mensaje o de información.

m: cantidad de bits que compone cada símbolo.

n: cantidad de símbolos de la palabra codificada.

Variables de salida:

t: capacidad de corrección de errores, cantidad de símbolos que se pueden corregir.

msg: palabra mensaje en GF.

msb: palabra mensaje en bits.

c: palabra codificada con RS

cb: palabra codificada en bits



Figura F.1. Bloque Funcional Codificador

F.2. Canal de Comunicaciones

Función: El bloque canal de comunicaciones recibe la palabra del codificador en forma de bits le suma Ruido Aditivo Gaussino Blanco (AWGN, Additive White Gaussian Noise).

Variables de entrada:

cb: vector de la palabra de información en bits

snr: vector de diferentes valores de SNR del canal

Variables de salida:

cbn: palabra codificada con ruido blanco



Figura F.2. Bloque Funcional Canal de Comunicaciones

F.3. Receptor

El decodificador RS Beta está compuesto por varios subsistemas funcionales, que son descritos en las siguientes secciones.

F.3.1. Detector de Señal

Función: Este bloque tiene como función recibir los datos del canal e interpretarlos como 1 o 0 lógicos. Se utiliza hard decisión para este proceso. Además de ello interpreta su valor en el campo finito.

Variables de entrada:

cbn: vector de la palabra de información codificada en bits con ruido blanco

Variables de salida:

rx: palabra codificada con ruido blanco en GF



Figura F.3. Bloque Funcional Detector de Señal

F.3.2. Detector de Error

Función: Este bloque tiene como función decidir si hay o no errores en la palabra recibida, para ello evalúa las raíces del polinomio generador en la palabra recibida y conforma el vector Síndrome.

Variables de entrada:

rx: vector de la palabra de información codificada en GF modificada por ruido blanco

Variables de salida:

S: palabra Síndrome

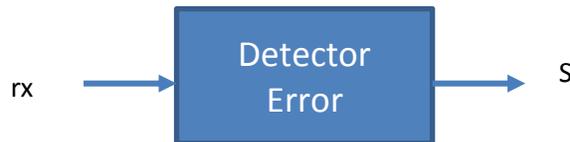


Figura F.4. Bloque Funcional Detector

F.3.3. Corrección de Error

En esta sección se describen los bloques funcionales que permiten corregir los errores de la palabra recibida, mediante el uso de algoritmos.

F.3.3.1. Algoritmo Euclidiano

Función: Este bloque tiene como función conformar los polinomios de posición de error y de valor de error. Realiza divisiones sucesivas hasta que el grado del residuo sea menor de t .

Variables de entrada:

ra: vector de grado $2t$.

rn: vector síndrome.

Variables de salida:

polpos: polinomio de posición de error.

polval: polinomio de valor de error.



Figura F.5. Bloque Funcional Algoritmo Euclidiano

F.3.3.2. Algoritmo Chain

Función: Este bloque tiene como función determinar las raíces del polinomio de posición $polpos$, obtener las raíces inversas y las posiciones de error.

Variables de entrada:

$polpos$: polinomio de posición de error

$raiz$: raíces de polinomio generador

Variables de salida:

$raices$: valor de las raíces del polinomio de posición

$poserr$: valor de las raíces inversas del polinomio de posición

$posición$: posición donde existe modificaciones en el vector recibido, que implican las posiciones de error.



Figura F.6. Bloque Funcional Algoritmo Chain

F.3.3.3. Algoritmo Forney

Función: Este bloque tiene como función determinar los valores del error en las posiciones identificadas por el bloque anterior. Utiliza el polinomio de posición de error, raíces de polinomio de posición, raíces inversas de polinomio de posición; para hallar la información de valores de error realiza una evaluación de las raíces inversas en el cociente entre el polinomio de valor de error y la derivada del polinomio de posición.

Variables de entrada:

$raices$: valor de las raíces del polinomio de posición

$poserr$: valor de las raíces inversas del polinomio de posición

$polpos$: polinomio de posición

$polval$: polinomio de valor de error.

Variables de salida:

Y : vector de valores de error identificados.

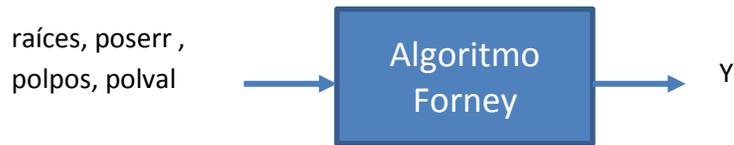


Figura F.7. Bloque Funcional Algoritmo Forney

F.3.3.4. Vector de Error

Función: Este bloque tiene como función conformar el polinomio de vector de error a partir de la información de posición de error y valor de error.

Variables de entrada:

Y: vector de valores de error identificados.

posición: posición donde existe modificaciones en el vector recibido, que implican las posiciones de error.

Variables de salida:

e: vector de error.



Figura F.8. Bloque Funcional Vector de Error

F.3.3.5. Recuperación de información

Función: Este bloque tiene como función determinar la palabra de codificación recuperada y también la palabra de información, para ello suma el vector de error obtenido mediante el bloque funcional anterior con la palabra recibida. También tiene la función de decodificar la palabra codificada para obtener la palabra de información y convertirá en bits.

Variables de entrada:

e: vector de error.

rx: vector de la palabra de información codificada en GF modificada por ruido blanco.

Variables de salida:

crec: palabra recuperada que contiene el código RS, de longitud n.

mrec: vector de información recuperada decodificada, de longitud k.

mrecb: vector de información en bits.



Figura F.9. Bloque Funcional Recuperación de información

F.4. Evaluación de Desempeño

Función: Este bloque tiene como función determinar cuántos errores, es decir, cuantas diferencias existen entre la palabra de información y la palabra de información recibida. También muestra de forma gráfica el comportamiento de los errores detectados frente a la relación señal a ruido dando la gráfica BER vs SNR. También tiene como función evaluar el tiempo de ejecución del proceso de decodificación, el cual lo realiza mediante las funciones tic y toc dadas por matlab.

Variables de entrada:

msb: palabra mensaje en bits.

mrec: vector de información recuperada decodificada, de longitud $k \cdot m$, en bits.

b11: cantidad de palabras mensaje de k símbolos que desea analizar.

m: cantidad de bit por símbolo

Variables de salida:

tasapromedio: BER promedio

timebeta: tiempo promedio de realización del proceso de decodificación.



Figura F.10. Bloque Funcional Análisis de Desempeño

En la figura F.11. se muestra la configuración general del códec RSE.

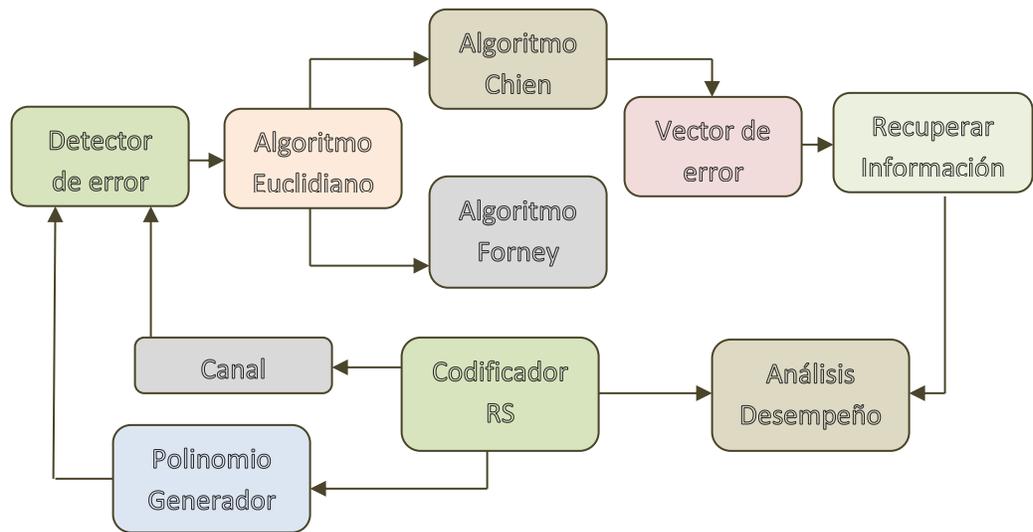


Figura F.11. Esquema General del RSE

Código del codificador RS que incluye el algoritmo Euclidiano implementado en Matlab R2010.a

```

clear all;
close all;
%Generación del mensaje
n=7;
k=3;
m=3;
t=(n-k)/2;
b11=1;
%Declaración de variables
tiempogama=0;
tiempopromediogama=0;
tasapromediogama=0;
timegama=0;
%ms=randint(1,3,[0,7]); %generación del mensaje de forma aleatoria
ms=randint(b11,k,[1,n]);
tasa=zeros(1,b11);
%Codificación
snrbeta=9;
snr=snrbeta;
lsnr=length(snr);
clsnr=1;
for (clsnr=1:1:lsnr)
    b1=1;
    for (b1=1:1:b11)
        msgu=msg(b1,:);
        msg=gf(msgu,m);
        msgx=msg.x;
        msd=double(msgx);
    end
end
  
```

```

msb=de2bi(msd,m,'left-msb');
c=rsenc(msg,n,k);
cd=c.x;
cdd=double(cd);
cb=de2bi(cdd,m,'left-msb');
cbr=zeros(n,m);
rx=gf(zeros(1,n),m);
%Canal de comunicaciones
i=1;
j=1;
valorsnr=snr(clsnr);
cbn=awgn(cb,valorsnr);
for(i=1:1:n)
    for(j=1:1:m)
        if cbn(i,j)<0.3
            cbr(i,j)=0;
        else
            cbr(i,j)=1;
        end
    end
end
i=1;
for(i=1:1:n)
    cdr(i)=bi2de(cbr(i,:), 'left-msb');
    rx(i)=gf(cdr(i),m);
end

```

%RECEPCION. ETAPA DE DETECCION

% 1. C?lculo del S?ndrome

```

tic;
g=rsngenpoly(n,k); % C?lculo del polinomio generador
raiz=roots(g);% C?lculo de las raices del polinomio generador
raizbase=raiz(1);
anterior=gf(1,m);
z1=zeros(1,length(raiz));
raizord=gf(z1,m);
o1=1;
for (o1=1:1:length(raiz))
    raizord(o1)=conv(raizbase,anterior);
    anterior=raizord(o1);
end

y= length(raiz):-1:1;
S=polyval(rx,raizord(y));

i1=1;
while(S(i1)==0 && length(S)~=1)
    S=S(i1+1:length(S));
end

if(S~=0)

```

```

%REPECEPCION. ETAPA DE CORRECCION DE ERRORES
%2. Algoritmo Euclidiano
z=zeros(1,2*t);
r=[1,z];
rg=gf(r,m);

aa=gf(1,m);
an=gf(0,m);

ba=gf(0,m);
bn=gf(1,m);

ra=rg;
rn=S;

qn=gf(0,m);

while(length(rn)-1>=t)
    i1=1;
    rm=rn;
    am=an;
    bm=bn;
    qm=qn;
    [qn,rn]=deconv(ra,rm);
    while(rn(i1)==0)
        rn=rn(i1+1:length(rn));
    end
    while(qn(i1)==0 && length(qn)~=1)
        qn=qn(i1+1:length(qn));
    end
    cb=conv(qn,bm);
    med=length(cb)-length(ba);
    z2b=gf(zeros(1,med),m);
    ba=[z2b,ba];
    bn=ba+cb;
    ra=rm;
    ba=bm;
    qa=qm;
end

polpos=bn;
polval=rn;
polvalt=polval';

%3. Algoritmo de Chain
raices=roots(polpos); %Determinar raices del polinomio
v1=gf(0,m);
longitud=length(raices);
if (longitud==0)
    raices=v1 ;
end
i1=1;
while(raices(i1)==v1 && length(raices)~=1)
    raices=raices(i1+1:length(raices));
end

```

```

end
if (raices(i1)==v1)
    crec=rx;
else % Determinar posiciones de error
    raicest=raices';
    lx=length(raicest);
    x=1;
    ug=gf(1,m);
    z3=zeros(1,lx);
    poserr=gf(z3,m);
    for(x=1:lx)
        poserr(x)=deconv(ug,raicest(x));
    end

%4. Algoritmo de Forney
A=gf(zeros(1,lx),m);
B=gf(zeros(1:lx),m);
dpp=gf(zeros(1:length(polpos)-1),m);
Y=gf(zeros(1,lx),m);

% 4.1. Derivada del polinomio de posicion
i2=length(polpos);
i2c=1;
for (i2c=1:1:i2-1)
    i3=i2-i2c;
    i3c=1;
    pm=gf(0,m);
    for(i3c=1:1:i3)
        dpp(i2c)= polpos(i2c)+pm;
        pm=dpp(i2c);
    end
end
i1=1;
while(dpp(i1)==0 && length(dpp)~=1)
    dpp=dpp(i1+1:length(dpp));
end

% 4.2. Evaluaci?n de las raices inversas en los polinomios

x1=1;
for(x1=1:lx)
    A(x1)=polyval(polval,poserr(x1));
    B(x1)=polyval(dpp,poserr(x1));
    if (B(x1)~=0)
        Y(x1)=deconv(A(x1),B(x1));
    else
        Y(x1)=gf(0,m);
    end
end

%5. Determinaci?n del vector de error
c2=1;

```

```

for(c2=1:1:lx)
    c3=0;
    posm=poserr(c2);
    if (posm==1)
        posicion(c2)=c3;
    else
        while(posm~=1)
            pos=deconv(posm,raiz(1));
            posm=pos;
            c3=c3+1;
        end
        posicion(c2)=c3;
    end
end
c2=1;
veg=gf(zeros(1,n),m);
for (c2=1:1:lx)
    p1=n-posicion(c2);
    veg(p1)=Y(c2);
end

%6. Recuperaci?n de la se?al codificada
crecg=gf(zeros(1,n),m);
crec=rx+veg;

    end
else
    crec=rx;
end

%7. Recuperaci?n de la se?al de informaci?n
mrec=rsdec(crec,n,k);

%Evaluacion de bits errados
mrecx=mrec.x;
mrecd=double(mrecx);
mrecb=de2bi(mrecd,m,'left-msb');
bite=biterr(mrecb,msb);
tasa(b1)=bite/(m*k);
tiempobeta(b1)=toc;
end
tiempopromediobeta(clsnr)=double(sum(tiempobeta)/b11);
tasapromedio(clsnr)=(sum(tasa)/b11);
end
timebeta=double(sum(tiempopromediobeta)/clsnr);
format long
tpbeta=tasapromedio;
figure(1)
semilogy(snr,tpbeta);
grid on;

```

ANEXO G

CERTIFICADO DE EXPOSICION DE ARTICULO



Se confiere el presente **DIPLOMA** a:

Jenny Cuatindioy Imbachi

por haber participado como

EXPOSITOR

en el

VII CONGRESO INTERNACIONAL DE COMPUTACIÓN Y TELECOMUNICACIONES

llevado a cabo en la ciudad de Lima - Perú
del 23 al 26 de setiembre de 2015.



Ing. Eduardo Alcántara Becerra
Secretario Académico



Mg. Aníbal Guispe Barzola
Decano (e)

ANEXO H DECODIFICACION RS QUE UTILIZA EL ALGORITMO BERLEKAMP

El modelo del proceso de codificación y decodificación RS en un sistema de comunicaciones banda base con el modelo de canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise).

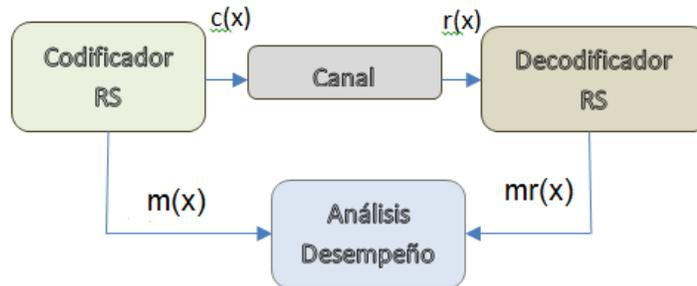


Figura H.1. Modelo general de sistema de comunicaciones con esquema RS

Se describen a continuación, los procesos internos de los bloques funcionales Codificador RS, Canal, Decodificador RS y Análisis de Desempeño.

Codificador RS

Función: codifica la señal de información banda base de acuerdo al codificador RS(n,k).

Señales internas:

msg: señal de información banda base en su expresión de campo finito

msd: señal de información banda base en su expresión binaria

cb: señal codificada en binario

n: cantidad de símbolos de la palabra codificada

k: cantidad de símbolos de la palabra de información en su expresión campo finito

Señales de salida:

c: señal codificada en su expresión campo finito según RS(n,k)

m: señal de información generada aleatoriamente en bits

Canal

Función: añade ruido a la señal codificada con RS (n,k) en expresión de campo finito

Señales de llegada:

c: señal codificada en su expresión campo finito

Señales internas:

snr: relación señal a ruido en dB

cbn: señal codificada afectada por el ruido en bits

Señales de salida

rx: señal afectada por awgn en su expresión campo finito

Decodificador RS

Función: realiza el proceso de detección y corrección de errores mediante el decodificador RS.

Señales de llegada

rx: señal afectada por awgn en su expresión campo finito

Señales internas

mgx: mensaje recuperado en su versión decimal

mgxb: mensaje recuperado en su versión binaria

mgxg: mensaje recuperado en su versión campo finito, recuperación mediante RS(n,k) que incluye algoritmo Berlekamp.

Señales de salida

mrx: señal de información recuperada en bits

Análisis de Desempeño

Función: determinar la cantidad de error mediante comparación de señal de información generada y recuperada

Señales de entrada:

mrx: señal de información recuperada en bits

mx: señal de información generada en bits

Señal de salida:

ber: tasa de error de bit

tiempo: tiempo utilizado por el decodificador RS(n,k) con el algoritmo Berlekamp

Código RS(n,k) que utiliza el algoritmo Berlekamp

```
clear all;
close all;
%Generación del mensaje
n=248;
k=232;
m=8;
t=(n-k)/2;
b11=20;
%Declaración de variables
tiempogama=0;
tiempopromediogama=0;
tasapromediogama=0;
timegama=0;
ms=randint(1,k,[1,n]); %generación del mensaje de forma aleatoria
tasa=zeros(1,b11);
%Codificación
msg=gf(ms,m); %expresión del mensaje en su campo de Galois
msgx=msg.x;
msd=double(msgx);
msb=de2bi(msd,m,'left-msb'); % palabra de información en su expresión
binaria
c=rsenc(msg,n,k); % palabra codificada con RS
cd=c.x;
cdd=double(cd);
cb=de2bi(cdd,m,'left-msb'); % palabra codificada en su expresión
binaria
cbr=zeros(n,m);
rx=gf(zeros(1,n),m);

%Condiciones de canal de comunicaciones
snr=0:1:19;
lsnr=length(snr);
clsnr=1;
rxgf=gf(zeros(b11,lsnr),m);
mrxm=gf(zeros(1,k),m);
mrx=gf(zeros(b11,lsnr,k),m);

for(clsnr=1:1:lsnr)
    b1=1;
    for(b1=1:1:b11)
        %Canal de comunicaciones
        i=1;
        j=1;
        valorsnr=snr(clsnr);
        cbn=awgn(cb,valorsnr); % aplicación de ruido a la información
        %receptor
        for(i=1:1:n) % detección hard decision
            for(j=1:1:m)
                if cbn(i,j)<0.3
                    cbr(i,j)=0;
                else
```

```

        cbr(i,j)=1;
    end
end
end
contn=1;
for(contn=1:1:n) % teniendo la información afectada por el ruido en
binario se la expresa en GF
    cdr(contn)=bi2de(cbr(contn,:), 'left-msb');
    rxgf(b1,clsnr,contn)=gf(cdr(contn),m); %expresión de la palabra
recibida en GFr
end
tic;
mrxm=rsdec(rxgf(b1,clsnr,:),n,k); %proceso de decodificación
mrx(b1,clsnr,:)=mrxm;
tiempo(b1,clsnr)=toc;
%comparación de errores
mrxxm=mrxm.x;
mrxmd=double(mrxxm);
mrxmb=de2bi(mrxmd,m, 'left-msb'); %expresión binaria de la señal de
información recibida
nerr(b1,clsnr)=biterr(mrxmb,msb);
end
tasa(clsnr)=(sum(nerr(:,clsnr))/b11)/(m*k);
end
time=sum(tiempo)/(lsnr*b11);

figure()
semilogy(snr,tasa);
grid on

```

ANEXO I DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA RS – ERASURE

El sistema de detección y corrección de errores denominado en este documento RSE, consiste en la parte del transmisor canal y receptor para transmisión, ingreso de errores en el vector de información y detección y corrección de errores. Posteriormente se realiza una interfaz que permite visualizar el comportamiento de la tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate) frente a las variaciones de relación señal a ruido (SNR, Signal to Noise Rate). En el proceso de detección se utilizan los algoritmos Euclidiano, Chain y Forney.

En las siguientes secciones se presenta la descripción del software implementado de acuerdo a metodología de diseño de sistemas de telecomunicaciones, donde se describen sus funciones, variables de entrada y de salida.

I.1. Codificador RS

Función: El codificador RS crea la palabra mensaje y la codifica, también expresa la palabra codificada tanto en bits como en el sistema de campos finitos.

Variables de entrada:

ms: palabra mensaje de k símbolos enteros

b11: cantidad de palabras mensaje de k símbolos que desea analizar.

k: cantidad de símbolos de la palabra mensaje o de información.

m: cantidad de bits que compone cada símbolo.

n: cantidad de símbolos de la palabra codificada.

Variables de salida:

t: capacidad de corrección de errores, cantidad de símbolos que se pueden corregir.

msg: palabra mensaje en GF.

msb: palabra mensaje en bits.

c: palabra codificada con RS

cb: palabra codificada en bits



Figura I.1. Bloque Funcional Codificador

I.2. Canal de Comunicaciones

Función: El bloque canal de comunicaciones recibe la palabra del codificador en forma de bits le suma Ruido Aditivo Gaussino Blanco (AWGN, Additive White Gaussian Noise).

Variables de entrada:

cb: vector de la palabra de información en bits

snr: vector de diferentes valores de SNR del canal

Variables de salida:

cbn: palabra codificada con ruido blanco



Figura I.2. Bloque Funcional Canal de Comunicaciones

I.3. Receptor

El decodificador RS RSE está compuesto por varios subsistemas funcionales, que son descritos en las siguientes secciones.

I.3.1. Detector de Señal

Función: Este bloque tiene como función recibir los datos del canal e interpretarlos como 1 o 0 lógicos. Se utiliza hard decisión para este proceso. Además de ello interpreta su valor en el campo finito.

Variables de entrada:

cbn: vector de la palabra de información codificada en bits con ruido blanco

Variables de salida:

rx: palabra codificada con ruido blanco en GF



Figura I.3. Bloque Funcional Detector de Señal

I.3.2. VECTOR DE BORRADURA

Función: Recibe la palabra modificada por el canal en GF y establece cual de los símbolos son no fiables, con esta información conforma el vector de borraduras. Para los códigos dados se escogen 3 símbolos erasure.

Variables de entrada:

$r(x)$: vector de la palabra de información codificada en bits con ruido blanco en GF

Variables de salida:

τ : polinomio conformado con la información erasure

Y : polinomio de las posiciones de información erasure



Figura I.3. Bloque Funcional Polinomio Erasure

I.3.3. Nuevo Polinomio de recepción

Función: Elimina de la palabra $r(x)$ las posiciones erasure, es decir, cambia las posiciones que se han indicado como erasure por un cero.

Variables de entrada:

$r(x)$: vector de la palabra de información codificada en bits con ruido blanco en GF

X : vector que indica las posiciones erasure dentro de la palabra codificada.

Variables de salida:

$r_n(x)$: polinomio de información que no contiene información erasure

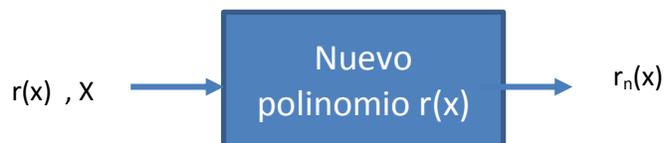


Figura I.4. Bloque Funcional Nuevo polinomio de información de recepción

I.3.4. Síndrome

Función: Este bloque tiene como función decidir si hay o no errores en la palabra recibida, para ello evalúa las raíces del polinomio generador en la palabra recibida sin información erasure y conforma el vector Síndrome.

Variables de entrada:

r_n : vector de la palabra de información codificada en GF modificada por ruido blanco

Variables de salida:

S: palabra Síndrome



Figura I.5. Bloque Funcional Detector

I.3.5. Síndrome modificado

Función: conforma el nuevo síndrome a partir del síndrome obtenido mediante el bloque síndrome y el vector de información erasure.

Variables de entrada:

S: vector síndrome

τ : polinomio de borraduras

Variables de salida:

S_n : palabra Síndrome nuevo



Figura I.6. Bloque Funcional Detector

I.3.6. Corrección de Error

En esta sección se describen los bloques funcionales que permiten corregir los errores de la palabra recibida, mediante el uso de algoritmos.

I.3.6.1. Algoritmo Euclidiano modificado

Función: Este bloque tiene como función conformar los polinomios de posición de error y de valor de error. Realiza divisiones sucesivas hasta que el grado del residuo sea menor de t . considera entre los parámetros de decisión, la cantidad par e impar de símbolos erasure.

Variables de entrada:

ra: vector de grado $2t$.
rn: vector síndrome modificado.

Variables de salida:

polpos: polinomio de posición de error.
polval: polinomio de valor de error.



Figura I.5. Bloque Funcional Algoritmo Euclidiano

I.3.3.2. Algoritmo Chain

Función: Este bloque tiene como función determinar las raíces del polinomio de posición polpos, obtener las raíces inversas y las posiciones de error.

Variables de entrada:

polpos: polinomio de posición de error
raiz: raíces de polinomio generador

Variables de salida:

raíces: valor de las raíces del polinomio de posición
poserr: valor de las raíces inversas del polinomio de posición
X: posición donde existe modificaciones en el vector recibido, que implican las posiciones de error.



Figura I.6. Bloque Funcional Algoritmo Chain

I.3.3.3. Algoritmo Forney

Función: Este bloque tiene como función determinar los valores tanto de los errores como de la información erasure.

Variables de entrada:

raíces: valor de las raíces del polinomio de posición
 poserr: valor de las raíces inversas del polinomio de posición
 X: posición donde existe modificaciones en el vector recibido, que implican las posiciones de error.

polpos: polinomio de posición
 polval: polinomio de valor de error.
 Y: posciones de la información erasure

Variables de salida:

F: vector de valores de error identificados.
 E: vector de valores de información erasure

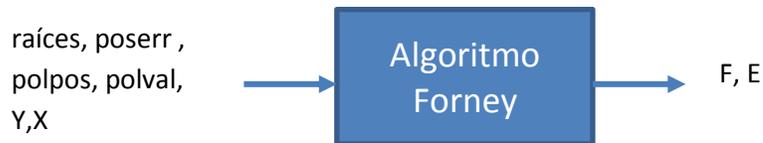


Figura I.7. Bloque Funcional Algoritmo Forney

I.3.3.4. Vector de Error

Función: Este bloque tiene como función conformar el polinomio de vector de error a partir de la información de posición de error y valor de error.

Variables de entrada:

Y: vector de posiciones de información erasure
 X: posición donde existe modificaciones en el vector recibido, que implican las posiciones de error.
 F: vector de valores de error
 E: vector de valores de erasure

Variables de salida:

e: vector de error.



Figura I.8. Bloque Funcional Vector de Error

I.3.3.5. Recuperación de información

Función: Este bloque tiene como función determinar la palabra de codificación recuperada y también la palabra de información, para ello suma el vector de error

obtenido mediante el bloque funcional anterior con la palabra recibida. También tiene la función de decodificar la palabra codificada para obtener la palabra de información y convertirá en bits.

Variables de entrada:

e: vector de error.

rx: vector de la palabra de información codificada en GF modificada por ruido blanco.

Variables de salida:

crec: palabra recuperada que contiene el código RS, de longitud n.

mrec: vector de información recuperada decodificada, de longitud k.

mrecb: vector de información en bits.

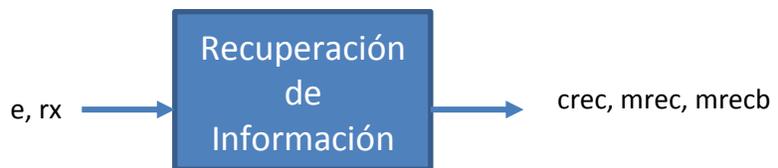


Figura I.9. Bloque Funcional Recuperación de información

I.4. Evaluación de Desempeño

Función: Este bloque tiene como función determinar cuántos errores, es decir, cuantas diferencias existen entre la palabra de información y la palabra de información recibida. También muestra de forma gráfica el comportamiento de los errores detectados frente a la relación señal a ruido dando la gráfica BER vs SNR. También tiene como función evaluar el tiempo de ejecución del proceso de decodificación, el cual lo realiza mediante las funciones tic y toc dadas por matlab.

Variables de entrada:

msb: palabra mensaje en bits.

mrec: vector de información recuperada decodificada, de longitud $k \cdot m$, en bits.

b11: cantidad de palabras mensaje de k símbolos que desea analizar.

m: cantidad de bit por símbolo

Variables de salida:

tasapromedio: BER promedio

time: tiempo promedio de realización del proceso de decodificación.



Figura I.10. Bloque Funcional Análisis de Desempeño

En la figura I.11. se muestra la configuración general del código RSE.

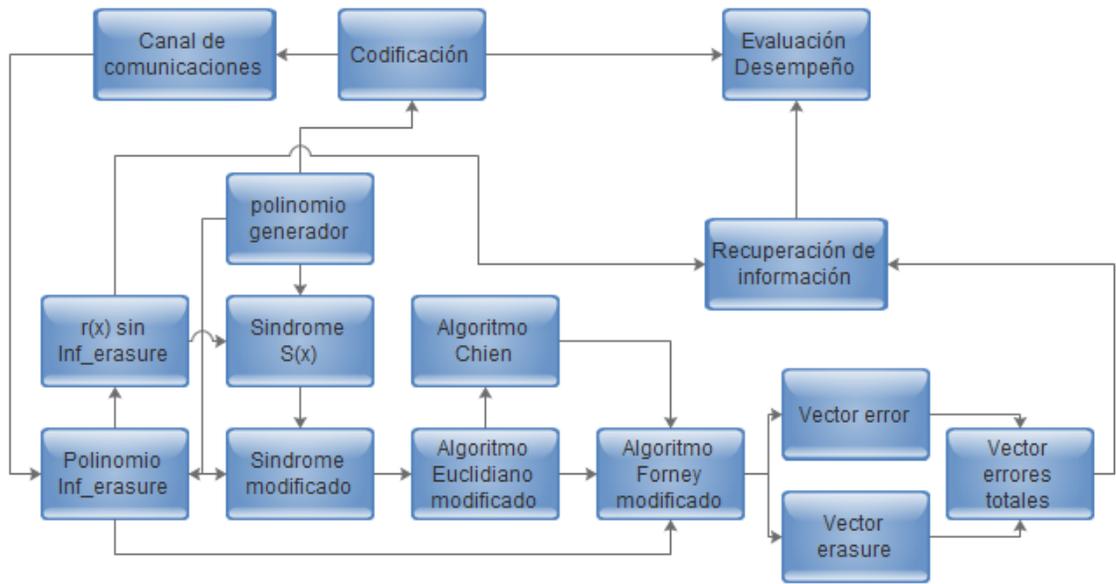


Figura I.11. Esquema General del RSE-erasure

Código del codificador RS que incluye el algoritmo Euclidiano implementado en Matlab R2010.a

```
%erasure miercoles

clear all;
close all;
%Generación del mensaje
n=255;
k=239;
m=8;
t=(n-k)/2;
b11=30;
%Declaración de variables
tiempo=0;
tiempopromedio=0;
tasapromedio=0;
timeg=0;
%ms=randint(1,3,[0,7]); %generación del mensaje de forma aleatoria
ms=randint(b11,k,[1,n]);
tasa=zeros(1,b11);
%Codificación
salto=0.05;
rangosnr=13:salto:20;
snr=rangosnr;
lsnr=length(snr);
clsnr=1;
% Calculo del polinomio generador
g=rsgenpoly(n,k);
% Calculo de las raices del polinomio generador
raiz=roots(g);
raizbase=raiz(1);

for(clsnr=1:1:lsnr)
    b1=1;
    for(b1=1:1:b11)
        msgu=ms(b1,:);
        msg=gf(msgu,m);
        msgx=msg.x;
        msd=double(msgx);
        msb=de2bi(msd,m,'left-msb');
        c=rsenc(msg,n,k);
        cd=c.x;
        cdd=double(cd);
        cb=de2bi(cdd,m,'left-msb');
        cbr=zeros(n,m);
        rx=gf(zeros(1,n),m);
        %Canal de comunicaciones
        i=1;
        j=1;
        valorsnr=snr(clsnr);
        cbn=awgn(cb,valorsnr);
```

```

for(i=1:1:n)
    for(j=1:1:m)
        if cbn(i,j)<0.3
            cbr(i,j)=0;
        else
            cbr(i,j)=1;
        end
    end
end
i=1;
for(i=1:1:n)
    cdr(i)=bi2de(cbr(i,:), 'left-msb');
    rx(i)=gf(cdr(i),m);
end
%Conformación del vector de borraduras
tic;
cc=1;
nc=0;
for(cc=1:1:n)
    if(c(cc)~=rx(cc))
        nc=nc+1;
        difcrx(nc)=cc;
    end
end
if(nc<=2)
    cXv=1;
    X=n-difcrx(cXv);
else
    cXv=randint(1,3,[1,nc]); %establece cantidad de números de
    borraduras
    Xf=n-difcrx(cXv);
end

%determinación de Yf
cont=1;
posf=length(Xf);
z1=zeros(1,posf);
Y=gf(z1,m);
zeroy=gf(0,m);
zerog=gf(0,m);
monomio=gf(zeros(1,posf),m);
mono=gf(zeros(posf,2),m);
rxn=rx;

%Generación de los monomios (Yx-1)
for (cont=1:1:posf)
    conti=1;
    unog=gf(1,m);
    anteriori=unog;
    if(Xf(cont)~=0) %ciclo para conformar Y
        for (conti=1:Xf(cont))
            Y(cont)=conv(raizbase,anteriori);
            anteriori=Y(cont);
        end
    end
end

```

```

        end;
    else
        Y(cont)=unog;
    end
    zero=deconv(unog,Y(cont));
    monomio=[Y(cont) unog]; %Conformación del monomio correspondiente a
Y
    mono(cont,:)=monomio; %Conformación del vector de monomios, de
acuerdo a la cantidad de borraduras
    end;

    %polinomio tao
    conti2=1;
    taoa=unog;
    for(conti2=1:1:posf)
        tao=conv(taoa,mono(conti2,:));
        taoa=tao;
    end

    %conformación del nuevo rx, rxn
    cont=1;
    rxn=rx;
    for (cont=1:length(Xf))
        peg=n-Xf(cont);
        rxn(peg)=zero;
    end

    %Cálculo del síndrome
    anterior=gf(1,m);
    z1=zeros(1,length(raiz));
    raizord=gf(z1,m);
    o1=1;
    for (o1=1:1:length(raiz))
        raizord(o1)=conv(raizbase,anterior);
        anterior=raizord(o1);
    end
    y=length(raiz):-1:1;
    S=polyval(rxn,raizord(y));
    i1=1;
    while(S(i1)==0 && length(S)~=1)
        S=S(i1+1:length(S));
    end

    if (S~=zerog)

    %Conformación del nuevo síndrome
    sma=conv(tao,S);
    x2t=[1 zeros(1,2*t)];
    x2tg=gf(x2t,m);
    [q1a,Sn]=deconv(sma,x2tg);
    while(Sn(i1)==0 && length(Sn)~=1)
        Sn=Sn(i1+1:length(Sn));
    end
end

```

```

%Algoritmo Euclidiano modificado
z=zeros(1,2*t);
r=[1,z];
rg=gf(r,m);
aa=gf(1,m);
an=gf(0,m);
ba=gf(0,m);
bn=gf(1,m);
ra=rg;
rn=Sn;
qn=gf(0,m);
[q1b,decision]=deconv(posf,2);
if decision==0
    limite=q1b;
else
    limite=q1b-1;
end

while(length(rn)-limite-1>=t)
    i1=1;
    rm=rn;
    am=an;
    bm=bn;
    qm=qn;
    [qn,rn]=deconv(ra,rm);
    while(rn(i1)==0)
        rn=rn(i1+1:length(rn));
    end
    while(qn(i1)==0 && length(qn)~=1)
        qn=qn(i1+1:length(qn));
    end
    cb=conv(qn,bm);
    med=length(cb)-length(ba);
    z2b=gf(zeros(1,med),m);
    ba=[z2b,ba];
    bn=ba+cb;
    ra=rm;
    ba=bm;
    qa=qm;
end
polpos=bn;
polval=rn;
polvalt=polval';

%3. Algoritmo de Chain
raices=roots(polpos);
v1=gf(0,m);
longitud=length(raices);
if (longitud==0)
    raices=v1 ;
end
i1=1;
while(raices(i1)==v1 && length(raices)~=1)
    raices=raices(i1+1:length(raices));
end
end

```

```

if (raices(i1)==v1)

%4. Algoritmo Forney
raicestao=roots(tao);
lx2=length(raicestao);
A=gf(zeros(1,lx2),m);
B=gf(zeros(1,lx2),m);
F=gf(zeros(1,lx2),m);

%4.1. Formación de nuevo polinomio de evaluación de posición
polposn= conv(tao,polpos);
longitud=length(polposn);
dppz=zeros(1,longitud-1);
dpp=gf(dppz,m);

%4.2. Derivada del nuevo polinomio de posición
i2=length(polposn);
i2c=1;
for (i2c=1:1:i2-1)
    i3=i2-i2c;
    i3c=1;
    pm=gf(0,m);
    for(i3c=1:1:i3)
        dpp(i2c)= polposn(i2c)+pm;
        pm=dpp(i2c);
    end
end
i1=1;
while(dpp(i1)==0 && length(dpp)~=1)
    dpp=dpp(i1+1:length(dpp));
end

%4.3. Evaluación de las raíces inversas en los polinomios

poserv=gf(zeros(1,lx2),m);
x2=1;

for(x2=1:lx2)
    poserv(x2)=deconv(unog,raicestao(x2));
    A(x2)=polyval(polval,raicestao(x2));
    B(x2)=polyval(dpp,raicestao(x2));
    if (B(x2)~=0)
        F(x2)=deconv(A(x2),B(x2));
        %F(x2)=conv(poserv(x2),Fd(x2));
    else
        F(x2)=gf(0,m);
    end
end

%Conformación de vector de error

veg=gf(zeros(1,n),m);
c2=1;

```

```

for(c2=1:1:lx2)
    c3=0;
    posm=poserv(c2);
    if (posm==1)
        posicion(c2)=c3;
    else
        while(posm~=1)
            pos=deconv(posm, raiz(1));
            posm=pos;
            c3=c3+1;
        end
        posicion(c2)=c3;
    end
end
c2=1;
for (c2=1:1:lx2)
    p1=n-posicion(c2);
    veg(p1)=F(c2);
end
crec=rxn+veg;

```

```

else
    raicest=raices';
    lx=length(raicest);
    x=1;
    ug=gf(1,m);
    z3=zeros(1, lx);
    poserr=gf(z3,m);
    for(x=1:lx)
        poserr(x)=deconv(ug, raicest(x));
    end

```

%4. Algoritmo Forney

```

raicestao=roots(tao);
lx2=length(raicestao);
A=gf(zeros(1, lx), m);
B=gf(zeros(1, lx), m);
E=gf(zeros(1, lx), m);
F=gf(zeros(1, lx2), m);
Fd=gf(zeros(1, lx2), m);
Ed=gf(zeros(1, lx), m);
%4.1. Formación de nuevo polinomio de evaluación de posición
polposn= conv(tao, polpos);
longitud=length(polposn);
dppz=zeros(1, longitud-1);
dpp=gf(dppz, m);

```

%4.2. Derivada del nuevo polinomio de posición

```

i2=length(polposn);
i2c=1;
for (i2c=1:1:i2-1)
    i3=i2-i2c;

```

```

i3c=1;
pm=gf(0,m);
for(i3c=1:1:i3)
    dpp(i2c)= polposn(i2c)+pm;
    pm=dpp(i2c);
end
end
i1=1;
while(dpp(i1)==0 && length(dpp)~=1)
    dpp=dpp(i1+1:length(dpp));
end

```

%4.3. Evaluación de las raíces inversas en los polinomios

```

x1=1;
for(x1=1:lx)
    A(x1)=polyval(polval, raicest(x1));
    B(x1)=polyval(dpp, raicest(x1));
    if (B(x1)~=0)
        E(x1)=deconv(A(x1), B(x1));
        %E(x1)=conv(poserr(x1), Ed(x1));
    else
        E(x1)=gf(0,m);
    end
end
end

poserv=gf(zeros(1, lx2), m);
x2=1;

for(x2=1:lx2)
    poserv(x2)=deconv(unog, raicestao(x2));
    A(x2)=polyval(polval, raicestao(x2));
    B(x2)=polyval(dpp, raicestao(x2));
    if (B(x2)~=0)
        F(x2)=deconv(A(x2), B(x2));
        %F(x2)=conv(poserv(x2), Fd(x2));
    else
        F(x2)=gf(0,m);
    end
end
end

```

%Conformación de vector de error

```

c2=1;
for(c2=1:1:lx)
    c3=0;
    posm=poserr(c2);
    if (posm==1)
        posicion(c2)=c3;
    else
        while(posm~=1)
            pos=deconv(posm, raiz(1));
            posm=pos;
            c3=c3+1;
        end
    end
end

```

```

        end
        posicion(c2)=c3;
    end
end
c2=1;
veg=gf(zeros(1,n),m);
for (c2=1:1:lx)
    p1=n-posicion(c2);
    veg(p1)=E(c2);
end

c2=1;
for(c2=1:1:lx2)
    c3=0;
    posm=poserv(c2);
    if (posm==1)
        posicion(c2)=c3;
    else
        while (posm~=1)
            pos=deconv(posm,raiz(1));
            posm=pos;
            c3=c3+1;
        end
        posicion(c2)=c3;
    end
end
c2=1;
for (c2=1:1:lx2)
    p1=n-posicion(c2);
    veg(p1)=F(c2);
end
crec=rxn+veg;

end

else
%Cálculo del síndrome en la señal que solo contiene borradura
y= length(raiz):-1:1;
S=polyval(rx,raizord(y));

i1=1;
while(S(i1)==0 && length(S)~=1)
    S=S(i1+1:length(S));
end

if(S~=0)

%RECEPCION. ETAPA DE CORRECCION DE ERRORES
%2. Algoritmo Euclidiano
z=zeros(1,2*t);
r=[1, z];

```

```

rg=gf(r,m);

aa=gf(1,m);
an=gf(0,m);

ba=gf(0,m);
bn=gf(1,m);

ra=rg;
rn=S;

qn=gf(0,m);

while(length(rn)-1>=t)
    i1=1;
    rm=rn;
    am=an;
    bm=bn;
    qm=qn;
    [qn,rn]=deconv(ra,rm);
    while(rn(i1)==0)
        rn=rn(i1+1:length(rn));
    end
    while(qn(i1)==0 && length(qn)~=1)
        qn=qn(i1+1:length(qn));
    end
    cb=conv(qn,bm);
    med=length(cb)-length(ba);
    z2b=gf(zeros(1,med),m);
    ba=[z2b,ba];
    bn=ba+cb;
    ra=rm;
    ba=bm;
    qa=qm;
end

polpos=bn;
polval=rn;
polvalt=polval';

%3. Algoritmo de Chain
raices=roots(polpos);
v1=gf(0,m);
longitud=length(raices);
if (longitud==0)
    raices=v1 ;
end
i1=1;
while(raices(i1)==v1 && length(raices)~=1)
    raices=raices(i1+1:length(raices));
end
if (raices(i1)==v1)
    crec=rx;
else

```

```

raicest=raices';
lx=length(raicest);
x=1;
ug=gf(1,m);
z3=zeros(1,lx);
poserr=gf(z3,m);
for(x=1:lx)
    poserr(x)=deconv(ug,raicest(x));
end

```

%4. Algoritmo de Forney

```

A=gf(zeros(1,lx),m);
B=gf(zeros(1,lx),m);
dpp=gf(zeros(1,length(polpos)-1),m);
Y=gf(zeros(1,lx),m);

```

% 4.1. Derivada del polinomio de posicion

```

i2=length(polpos);
i2c=1;
for (i2c=1:1:i2-1)
    i3=i2-i2c;
    i3c=1;
    pm=gf(0,m);
    for(i3c=1:1:i3)
        dpp(i2c)= polpos(i2c)+pm;
        pm=dpp(i2c);
    end
end
i1=1;
while(dpp(i1)==0 && length(dpp)~=1)
    dpp=dpp(i1+1:length(dpp));
end

```

% 4.2. Evaluaci?n de las raices inversas en los polinomios

```

x1=1;
for(x1=1:lx)
    A(x1)=polyval(polval,poserr(x1));
    B(x1)=polyval(dpp,poserr(x1));
    if (B(x1)~=0)
        Y(x1)=deconv(A(x1),B(x1));
    else
        Y(x1)=gf(0,m);
    end
end

```

%5. Determinaci?n del vector de error

```

c2=1;
for(c2=1:1:lx)
    c3=0;
    posm=poserr(c2);
    if (posm==1)

```

```

        posicion(c2)=c3;
    else
        while (posm~=1)
            pos=deconv(posm,raiz(1));
            posm=pos;
            c3=c3+1;
        end
        posicion(c2)=c3;
    end
end
c2=1;
veg=gf(zeros(1,n),m);
for (c2=1:1:lx)
    p1=n-posicion(c2);
    veg(p1)=Y(c2);
end

%6. Recuperaci?n de la se?al codificada
crecg=gf(zeros(1,n),m);
crec=rx+veg;

end

else
    crec=rx;
end

end

%7. Recuperaci?n de la se?al de informaci?n
mrec=rsdec(crec,n,k);

%Evaluacion de bits errados
mrecx=mrec.x;
mrecd=double(mrecx);
mrecb=de2bi(mrecd,m,'left-msb');
bite=biterr(mrecb,msb);
tasa(b1)=bite/(m*k);
tiempobeta(b1)=toc;
end
tiempopromediobeta(clsnr)=double(sum(tiempobeta)/b11);
tasapromedio(clsnr)=(sum(tasa)/b11);
end
timebeta=double(sum(tiempopromediobeta)/clsnr);
format long
tpbeta=tasapromedio;
figure(1)
semilogy(snr,tpbeta);
grid on;

```

ANEXO J. ANALISIS ESTADISTICO PARA EL MODELO PLANTEADO EN EL CAPITULO 2

J.1. ANALISIS DE LA VARIABLE TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROCESO DE DECODIFICACIÓN (NTIME)

Modelos Lineales Generalizados

Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 3

A=tasa_cod

B=snr

C=codificador

Número de factores cuantitativos: 0

Número de observaciones: 270

Análisis de Varianza para ntime

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,06459	8	0,133074	17,15	0,0000
Residuo	2,02521	261	0,00775941		
Total (Corr.)	3,08979	269			

Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
tasa_cod	0,382853	2	0,191426	24,67	0,0000
Snr	0,549107	4	0,137277	17,69	0,0000
codificador	0,132629	2	0,0663145	8,55	0,0003
Residuo	2,02521	261	0,00775941		
Total (corregido)	3,08979	269			

Cuadrados Medios Esperados (CME)

Fuente	CME
tasa_cod	(4)+Q1
Snr	(4)+Q2
codificador	(4)+Q3
Residuo	(4)

Denominadores de Prueba-F

Fuente	Gl	Cuadrado Medio	Denominador
tasa_cod	261,00	0,00775941	(4)
Snr	261,00	0,00775941	(4)
codificador	261,00	0,00775941	(4)

Componentes de Varianza

Fuente	Estimado
Residuo	0,00775941

R-Cuadrada = 34,455 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 32,4459 por ciento

Error estándar del est. = 0,0880875

Error medio absoluto = 0,068211

Estadístico Durbin-Watson = 1,68089 (P=0,0043)

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
N	270	
CME	0,00775941	
MAE	0,068211	
MAPE	12,0564	
ME	-3,15591E-16	
MPE	-2,19362	

MANOVA para A

Lambda de Wilks = 0,841012 F = 24,6702 Valor-P = 1,53702E-10
Traza de Pillai = 0,158988 F = 24,6702 Valor-P = 1,53702E-10
Traza de Hotelling-Lawley = 0,189044 F = 24,6702 Valor-P = 1,53702E-10
Mayor raíz de Roy = 0,189044 s = 1 m = 0,0 n = 129,5

Matriz de Hipótesis H

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	0,382853

Matriz de Error E

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	2,02521

MANOVA para B

Lambda de Wilks = 0,786698 F = 17,6916 Valor-P = 7,29639E-13
Traza de Pillai = 0,213302 F = 17,6916 Valor-P = 7,29639E-13
Traza de Hotelling-Lawley = 0,271136 F = 17,6916 Valor-P = 7,29639E-13
Mayor raíz de Roy = 0,271136 s = 1 m = 1,0 n = 129,5

Matriz de Hipótesis H

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	0,549107

Matriz de Error E

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	2,02521

MANOVA para C

Lambda de Wilks = 0,938536 F = 8,54632 Valor-P = 0,000254013
Traza de Pillai = 0,0614639 F = 8,54632 Valor-P = 0,000254013
Traza de Hotelling-Lawley = 0,0654891 F = 8,54632 Valor-P = 0,000254013
Mayor raíz de Roy = 0,0654891 s = 1 m = 0,0 n = 129,5

Matriz de Hipótesis H

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	0,132629

Matriz de Error E

	<i>ntime</i>
<i>ntime</i>	2,02521

El StatAdvisor

Esta ventana resume los resultados de ajustar un modelo estadístico lineal general que relaciona a *ntime* con 3 factores predictivos. Dado que el valor-P en la primer tabla ANOVA para *ntime* es menor que 0,05, hay una relación estadísticamente significativa entre *ntime* y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

La segunda tabla ANOVA para ntime prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,0003, que corresponde a C. Dado que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna de las variables en el modelo.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 34,455% de la variabilidad en ntime. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 32,4459%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0880875. Este valor puede utilizarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error medio absoluto (MAE) de 0,068211 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa con base en el orden en el que se presentaron en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

La salida también resume el desempeño del modelo para ajustar los datos, y para predecir cualquier valor retenido fuera del proceso de ajuste.

Se muestra:

- (1) el cuadrado medio del error (CME)
- (2) el error medio absoluto (MAE)
- (3) el porcentaje de error medio absoluto (MAPE)
- (4) el error medio (ME)
- (5) el porcentaje de error medio (MPE)

Cada uno de los estadísticos está basado en los residuos. Los primeros tres estadísticos miden la magnitud de los errores. El mejor modelo dará el valor más pequeño. Los últimos dos estadísticos miden el bias (sesgo). El mejor modelo dará un valor cercano a 0.

El análisis también calcula varios estadísticos ANOVA multivariados para cada efecto en el modelo. Estos estadísticos se usan para determinar si un efecto en particular tiene una relación significativa con el grupo de variables dependientes que está siendo modelado.

Valores-P menores de 0,05 indican que hay un efecto estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95,0%. En este caso, el factor más importante (de acuerdo con la lambda de Wilks) es B.

J2. ANALISIS MANOVA PARA LA VARIABLE ERRORES EN LA PALABRA DE INFORMACIÓN (NE_M_OUT)

Modelos Lineales Generalizados

Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 2

A=snr

B=codificador

Número de factores cuantitativos: 0

Número de observaciones: 270

Análisis de Varianza para ne_m_out

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	395,43	6	65,905	67,68	0,0000

Residuo	256,113	263	0,973812		
Total (Corr.)	651,543	269			

Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
snr	376,383	4	94,0958	96,63	0,0000
codificador	19,0469	2	9,52345	9,78	0,0001
Residuo	256,113	263	0,973812		
Total (corregido)	651,543	269			

Cuadrados Medios Esperados (CME)

Fuente	CME
snr	(3)+Q1
codificador	(3)+Q2
Residuo	(3)

Denominadores de Prueba-F

Fuente	Gl	Cuadrado Medio	Denominador
snr	263,00	0,973812	(3)
codificador	263,00	0,973812	(3)

Componentes de Varianza

Fuente	Estimado
Residuo	0,973812

R-Cuadrada = 60,6914 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 59,7946 porciento

Error estándar del est. = 0,986819

Error medio absoluto = 0,772404

Estadístico Durbin-Watson = 1,65948 (P=0,0025)

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	270	
CME	0,973812	
MAE	0,772404	
MAPE		
ME	1,68075E-15	
MPE		

MANOVA para A

Lambda de Wilks = 0,404924 F = 96,6263 Valor-P = 1,11022E-16

Traza de Pillai = 0,595076 F = 96,6263 Valor-P = 1,11022E-16

Traza de Hotelling-Lawley = 1,4696 F = 96,6263 Valor-P = 1,11022E-16

Mayor raíz de Roy = 1,4696 s = 1 m = 1,0 n = 130,5

Matriz de Hipótesis H

	ne_m_out
ne_m_out	376,383

Matriz de Error E

	ne_m_out
ne_m_out	256,113

MANOVA para B

Lambda de Wilks = 0,930779 F = 9,77955 Valor-P = 0,0000800399

Traza de Pillai = 0,0692213 F = 9,77955 Valor-P = 0,0000800399

Traza de Hotelling-Lawley = 0,0743692 F = 9,77955 Valor-P = 0,0000800399

Mayor raíz de Roy = 0,0743692 s = 1 m = 0,0 n = 130,5

Matriz de Hipótesis H

	<i>ne_m_out</i>
<i>ne_m_out</i>	19,0469

Matriz de Error E

	<i>ne_m_out</i>
<i>ne_m_out</i>	256,113

El StatAdvisor

Esta ventana resume los resultados de ajustar un modelo estadístico lineal general que relaciona a *ne_m_out* con 2 factores predictivos. Dado que el valor-P en la primer tabla ANOVA para *ne_m_out* es menor que 0,05, hay una relación estadísticamente significativa entre *ne_m_out* y las variables predictoras con un nivel de confianza del 95,0%.

La segunda tabla ANOVA para *ne_m_out* prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Nótese que el valor-P más alto es 0,0001, que corresponde a B. Dado que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna de las variables en el modelo.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 60,6914% de la variabilidad en *ne_m_out*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 59,7946%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,986819. Este valor puede utilizarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error medio absoluto (MAE) de 0,772404 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa con base en el orden en el que se presentaron en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

La salida también resume el desempeño del modelo para ajustar los datos, y para predecir cualquier valor retenido fuera del proceso de ajuste.

Se muestra:

- (1) el cuadrado medio del error (CME)
- (2) el error medio absoluto (MAE)
- (3) el porcentaje de error medio absoluto (MAPE)
- (4) el error medio (ME)
- (5) el porcentaje de error medio (MPE)

Cada uno de los estadísticos está basado en los residuos. Los primeros tres estadísticos miden la magnitud de los errores. El mejor modelo dará el valor más pequeño. Los últimos dos estadísticos miden el bias (sesgo). El mejor modelo dará un valor cercano a 0. NOTA: el MAPE y el MPE no fueron calculados debido a que el valor más pequeño en el conjunto de datos es menor o igual a 0.

El análisis también calcula varios estadísticos ANOVA multivariados para cada efecto en el modelo. Estos estadísticos se usan para determinar si un efecto en particular tiene una relación significativa con el grupo de variables dependientes que está siendo modelado. Valores-P menores de 0,05 indican que hay un efecto estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95,0%. En este caso, el factor más importante (de acuerdo con la lambda de Wilks) es A.

J.3. ANALISIS DE RESIDUALES.

Los residuales cumplen con la condición de normalidad.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para RESIDUALS PARA ntime

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Distribución Normal</i>
DMAS	0,0667936
DMENOS	0,0468236
DN	0,0667936
P-Valor	0,179849

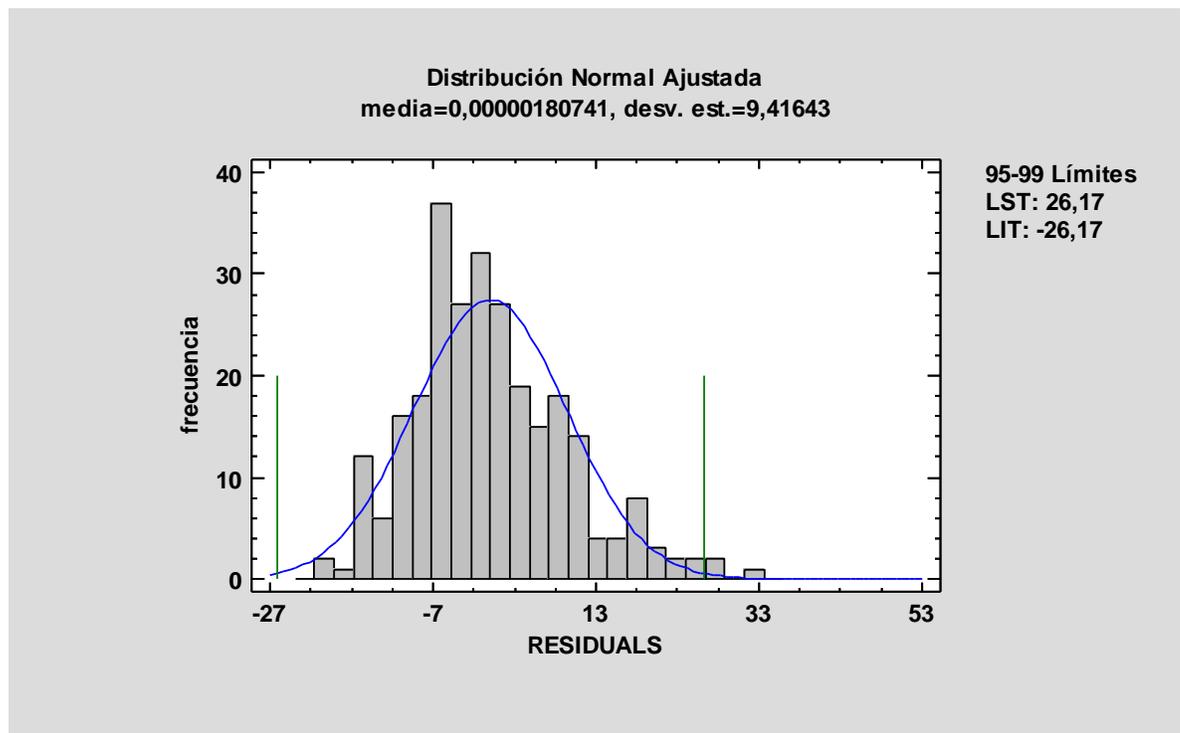
El StatAdvisor

Esta ventana muestra los resultados de pruebas realizadas para determinar si RESIDUALS puede modelarse adecuadamente con una Normal.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov calcula la distancia máxima entre la distribución acumulada de RESIDUALS y la FDA de la Normal

ajustada. En este caso, la distancia máxima es 0,0667936.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUALS proviene de una Normal con 95% de confianza.



J4. ANALISIS DE RESIDUALES PARA ERR_M_OUT

Los residuales cumplen con la condición de normalidad.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para comparacion.RESIDUALSresB

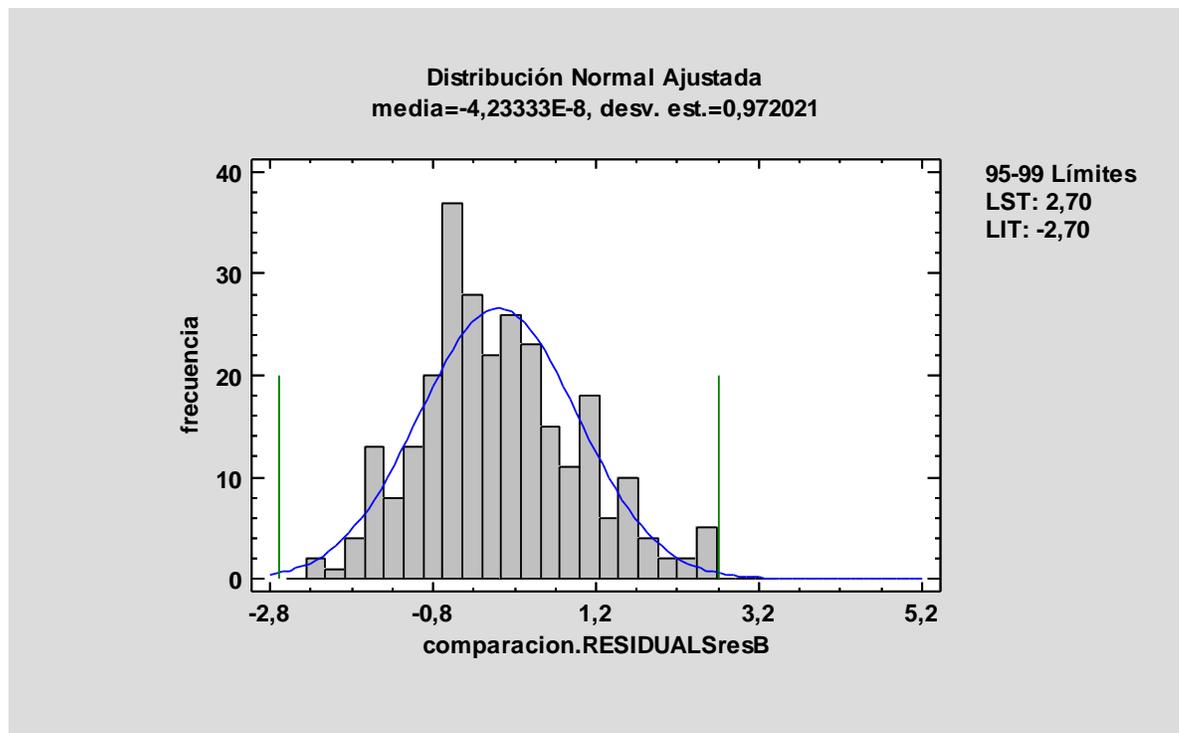
Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	<i>Distribución Normal</i>
DMAS	0,0776734
DMENOS	0,0326014
DN	0,0776734
P-Valor	0,07694

El StatAdvisor

Esta ventana muestra los resultados de pruebas realizadas para determinar si comparacion.RESIDUALSresB puede modelarse adecuadamente con una Normal. La prueba de Kolmogorov-Smirnov calcula la distancia máxima entre la distribución acumulada de comparacion.RESIDUALSresB y la FDA de la Normal ajustada. En este caso, la distancia máxima es 0,0776734.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que comparacion.RESIDUALSresB proviene de una Normal con 95% de confianza.



J5. CONDICION DE CORRELACIÓN

Las variables ntime y ne_m_out están correlacionadas a un valor de 0.29 con un 95% de seguridad.

Correlaciones

	ntime	ne_m_out
ntime		0,2900 (270)
		0,0000
ne_m_out	0,2900 (270)	
	0,0000	

Correlación

(Tamaño de Muestra)

Valor-P

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

- ntime y ne_m_out

