



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas
utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem**

AUTOR:

Espantoso España, Samuel Alberto

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

8 de Febrero del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Espantoso España, Samuel Alberto** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, a los 8 días del mes de febrero del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Espantoso España, Samuel Alberto**

DECLARÓ QUE:

La tesis “**Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 8 días del mes de febrero del año 2018

EL AUTOR

Espantoso España, Samuel Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Espantoso España, Samuel Alberto**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: “**Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 8 días del mes de febrero del año 2018

EL AUTOR

Espantoso España, Samuel Alberto

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [TT Samuel Espantoso MET.docx](#) (D32713423)

Presentado 2017-11-21 10:04 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje Revisión TT Samuel Espantoso [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 20 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

- [LIBRO COMPLETO ING CARLOS SERRA.pdf](#)
- <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.270...>

Fuentes alternativas

Fuentes no usadas

- [N6J_LUIS+LAMINGOO.pdf](#)
- [N6J_PEREZ.F.pdf](#)
- [1422985259_codificacion.docx](#)

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencias.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis comparativo de escenarios de simulación de
códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión
óptica sobre OptiSystem

AUTOR: Espantoso España, Samuel Alberto

Trabajo de Titulación

previo a la obtención del Grado Académico de Magister en
Telecomunicaciones

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios, por permitir cumplir con este propósito de obtener el grado académico de Magister en Telecomunicaciones. A mis padres, mi papi Carlos Alberto Espantoso Perlaza que desde arriba guía mis pasos, y mi mami Denny España Estacio por apoyarme y darme su voz de aliento durante toda mi preparación universitaria.

A mi esposa, Tatiana Gracia Arturo por su apoyo incondicional en todas y cada una de mis decisiones que nos han ayudado a superarnos para beneficio de nuestros hijos.

A mis hijos, Joel y Sheryl Espantoso Gracia por ceder su tiempo en los fines en los que me ausente para obtener el grado académico de Magister en Telecomunicaciones.

A mis hermanos, Carlos Alberto, Carlos Patricio y Alexandra Espantoso España gracias por el apoyo; y a mis cuñadas, Karen Campo y Martha Mite.

A todos los docentes de la Maestría en Telecomunicaciones de los cuales obtuvimos mejor conocimiento, al Director de la Maestría, M. Sc. Manuel Romero Paz por el apoyo brindado, y en especial a mi amigo y tutor, Edwin Fernando Palacios Meléndez.

Por último, a la empresa en la que laboro OCP Ecuador S.A., y que por medio del Superintendente, Ramiro Bermeo Quispe permitió disponer de horas laborables para recibir las clases de maestría en la ciudad de Guayaquil, y por el apoyo logístico lo cual fue de gran importancia para poder cumplir una meta más en mi desarrollo profesional.

Espantoso España, Samuel Alberto

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a mi señora madre, Denny España Estacio por darme la educación y formarme como persona de bien, todo este esfuerzo va por ti mami.

Espantoso España, Samuel Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. _____

CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. _____

BOHÓRQUEZ ESCOBAR, CELSO BAYARDO
REVISOR

f. _____

ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
Resumen	XIII
Abstract.....	XIV
Capítulo 1: Descripción general del Trabajo de Titulación.....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes del problema a investigar.	17
1.3. Definición del problema.....	18
1.4. Justificación del problema.	18
1.5. Objetivos.	19
1.5.1. Objetivo general.....	19
1.5.2. Objetivos específicos.....	19
1.6. Hipótesis.....	19
1.7. Metodología de investigación.....	20
1.8. Estructura del trabajo.	22
Capítulo 2: Códigos de línea en la transmisión óptica	23
2.1. Sistema digital de comunicaciones en banda base.....	23
2.2. Sistema de comunicaciones digitales en banda base para la transmisión de señales PCM.....	25
2.3. Codificación de línea para la transmisión digital en banda base.....	26
2.4. Funciones de los códigos de línea.	27
2.5. Códigos de línea empleados en la transmisión en banda base.	29
2.5.1. Códigos no retorno a cero.	30
2.5.2. Códigos retorno a cero.	30
2.5.3. Códigos bifases.	31

2.5.4. Código Miller.....	32
2.6. Sistema de transmisión por fibra óptica	32
2.7. Códigos de línea adecuados para la transmisión óptica.	35
2.8. Código no retorno a cero.....	36
2.9. Código no retorno a cero invertido	40
2.10. Código multinivel.	41
CAPÍTULO 3: Simulación de aplicaciones de códigos de línea en la transmisión óptica	44
3.1. Enlace óptico con transmisión y recepción de señales no retorno a cero.	44
3.2. Enlace óptico con transmisión y recepción de señales retorno a cero.	47
3.3. Enlace óptico con codificación y decodificación Manchester.	51
3.4. Transmisión de señales retorno a cero empleando un modulador Mach – Zehnder.....	56
Conclusiones	59
Recomendaciones	61
Bibliografía.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Esquema en bloques de un sistema digital de comunicaciones en banda base.	24
Figura 2. 2: Esquema en bloques de un sistema de comunicaciones digitales en banda base para la transmisión de señales PCM.	26
Figura 2. 3: Codificación de línea para la transmisión digital en banda base.	27
Figura 2. 4: Formas de onda de las señales con codificación NRZ, RZ y bifase.	29
Figura 2. 5: Codificación Miller.	32
Figura 2. 6: Esquema en bloques de un sistema de transmisión por fibra óptica.	33
Figura 2. 7: Codificación NRZ.	36
Figura 2. 8: Evolución de un pulso óptico.	38
Figura 2. 9: Codificación NRZI.	41
Figura 2. 10: Ejemplo de codificación multinivel ($M = 4$).	42

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Esquema de simulación del enlace óptico con transmisión de señales NRZ.	44
Figura 3. 2: Señal NRZ generada.	45
Figura 3. 3: Espectro de potencia de la señal óptica transmitida.	45
Figura 3. 4: Análisis de la potencia en el dominio del tiempo de la señal óptica.	46
Figura 3. 5: Señal en la salida filtrada.	46
Figura 3. 6: Esquema de simulación para la transmisión y recepción de señales RZ.	47

Figura 3. 7: Señal con codificación RZ	48
Figura 3. 8: Ruido presente en la señal a transmitir.....	48
Figura 3. 9: Señal RZ con presencia de ruido.....	49
Figura 3. 10: Espectro de potencia de la señal transmitida	49
Figura 3. 11: Ruido presente en la señal detectada.....	50
Figura 3. 12: Presencia de ruido luego del filtrado.....	50
Figura 3. 13: Señal filtrada.....	51
Figura 3. 14: Esquema de simulación empleado para la simulación del enlace óptico con codificación Manchester.	51
Figura 3. 15: Secuencia de datos NRZ.....	52
Figura 3. 16: Señal Manchester transmitida.	53
Figura 3. 17: Diagrama de ojos de la señal recibida.	53
Figura 3. 18: Gráfica del factor Q.....	54
Figura 3. 19: Gráfica de la BER.	54
Figura 3. 20: Representación del Threshold.	55
Figura 3. 21: Señal recuperada después de los procesos de decodificación y filtrado.	55
Figura 3. 22: Esquemático de la transmisión de señales RZ empleando un modulador Mach-Zehnder.....	56
Figura 3. 23: Señal óptica con modulación Mach-Zehnder en el dominio del tiempo.	57
Figura 3. 24: Señal óptica con modulación Mach-Zehnder en el dominio de la frecuencia.	57

Resumen

En la actualidad, entre los sistemas de comunicaciones más relevantes, se encuentran los que emplean la fibra óptica como medio de transmisión, debido a sus grandes ventajas e importantes prestaciones. En estos sistemas resulta fundamental el uso de los códigos de línea, pues logran mantener el sincronismo, controlar errores, reducir la potencia en bajas frecuencias y evitar la componente de corriente directa. En el presente trabajo primeramente se analizan las generalidades los sistemas de comunicaciones digitales en banda base, para luego introducir los códigos de línea en la transmisión digital. Se abordan los fundamentos teóricos y técnicos de los mismos para la transmisión óptica. Además, se explican los bloques básicos que conforman un sistema de transmisión por fibra óptica. Se realizan simulaciones de varios enlaces ópticos utilizando diferentes codificaciones de línea mediante el software OptiSystem 7.0. Se comprobó el correcto funcionamiento de los mismos empleando varias herramientas de visualización como osciloscopios, analizador de espectro, diagrama de ojos, medidor de potencia, entre otros.

Palabras claves: TRANSMISIÓN, ÓPTICA, CÓDIGOS DE LÍNEA, MODULACIÓN, INTENSIDAD LUMINOSA, OPTISYSTEM.

Abstract

Currently, among the most relevant communication systems are those that use fiber optic as a means of transmission, due to its great advantages and important benefits. In these systems, the use of line codes is fundamental, since they manage to maintain synchronism, control errors, reduce power at low frequencies and avoid the direct current component. In the present work we first analyze the generalities of digital baseband communication systems, and then introduce the line codes in digital transmission. The theoretical and technical foundations of the same for optical transmission are addressed. In addition, the basic blocks that make up a fiber optic transmission system are explained. Simulations of several optical links are carried out using different line-coding using the OptiSystem 7.0 software. The correct functioning of the same was verified using several visualization tools such as oscilloscopes, spectrum analyzer, eye diagram, power meter, among others.

Keywords: TRANSMISSION, OPTICS, LINE CODES, MODULATION, LUMINOUS INTENSITY, OPTISYSTEM.

Capítulo 1: Descripción general del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción

El intercambio de información ha alcanzado gran importancia en la sociedad moderna, actualmente la humanidad se encuentra en una nueva era: la era de la Informática y las Comunicaciones. Las telecomunicaciones se han convertido en uno de los pilares para el desarrollo de la civilización actual, permitiendo que las personas se puedan relacionar sin importar en que lugar del mundo se encuentren. Además, se ha logrado que la difusión de la información llegue a niveles nunca antes alcanzados.

En los últimos años, con el crecimiento de Internet y la aparición de nuevos servicios de banda ancha, ha aumentado el tráfico de voz y datos, por lo que se ha hecho necesario el diseño de redes de telecomunicaciones que sean capaces de ofrecer una mayor velocidad de transmisión a un menor costo. La tecnología de la fibra óptica se ha presentado como una firme solución al problema gracias a su potencial ancho de banda y al continuo descenso de los costos de los elementos del sistema. Por ejemplo, los medios de transmisión han evolucionado desde el par de cobre, pasando por el cable coaxial, hasta llegar a la fibra óptica, un medio de transmisión con capacidad para transmitir enormes caudales de información. Los sistemas de transmisión han evolucionado de los sistemas analógicos a los sistemas de transmisión digitales. La capacidad de los equipos de conmutación empleados ha ido multiplicándose hasta llegar a centrales de conmutación digitales con la posibilidad de conmutar decenas de miles de conexiones a 64 Kbps.

Por último, la implementación de la conmutación óptica ha permitido el encaminamiento de los datos independientemente de la tasa de bit, el formato y la longitud de los paquetes, lo que proporciona flexibilidad a los enlaces y permite alcanzar elevadas velocidades de transmisión. Todo lo anterior demuestra que la red de interconexión está capacitada para ofrecer otros servicios además de la voz, tales como los servicios multimedia de banda ancha (Tanenbaum, 2003).

Parece fácilmente deducible que la fibra óptica es sinónimo de futuro y modernidad, al ser capaz de ofrecer al usuario velocidades en el orden de Terabits por segundo (Tbps); permitiendo servicios como la televisión de alta definición, video bajo demanda, voz sobre IP (VoIP), videoconferencia y muchos otros. Los sistemas por fibra óptica aceptan a su entrada señales digitales normalizadas. Los bits de protección contra errores y los códigos de línea se emplean para supervisar la proporción de error y mantener el sincronismo.

Con el objetivo de mantener el sincronismo, reducir la potencia en las bajas frecuencias, evitar la componente de corriente directa, tener la posibilidad de revelar errores en la transmisión, etc., se emplean en los sistemas de transmisión digital los códigos de línea. Existe gran variedad de codificaciones de línea que son aplicables a sistemas digitales tales como banda base; para la transmisión digital por fibra óptica se aplican nuevas exigencias a los mismos lo cual resulta una interesante área de investigación.

1.2. Antecedentes del problema a investigar.

Existen diferentes trabajos de investigación relacionados a la simulación de los esquemas de codificación de línea publicados en revistas científicas. A continuación, se describen brevemente las publicaciones encontradas como antecedente del presente trabajo que involucran a los códigos de línea:

- a. El trabajo publicado por Oh, Jeong, Jang, Lee, & Yoon, (2017) examinan las características de los esquemas de codificación de línea y luego proponen un novedoso pero sencillo algoritmo de clasificación invisible (blind) para los esquemas. También analizan las probabilidades correctas de clasificación del algoritmo propuesto en un entorno silencioso y sin ruido a través de simulaciones. El método propuesto puede discernir esquemas de codificación de línea, lo que permite la reconstrucción de los datos de información originales.
- b. El trabajo publicado por Singh, Gupta, Gupta, & Pandey, (2016) presenta la implementación del esquema de codificación de línea de no retorno a cero (*Non Return to Zero, NRZ*) sobre una FPGA. El codificador y decodificador de línea NRZ se implementan en Verilog usando Modelsim 10.4a. Se implementaron tres esquemas de codificación llamados NRZ-Level, NRZ-Mark y NRZ-Space. Los algoritmos para el codificador y el decodificador están verificados funcionalmente y se pueden sintetizar utilizando Xilinx V.10. El rendimiento del hardware sintetizado se estudia para diferentes familias de FPGA y dispositivos como Spartan 3E, Virtex 4 y Virtex 5. Se presenta una comparación de rendimiento en términos de lógica utilizada, potencia y retardo. El análisis de los resultados muestra

preferencia por los FPGA Virtex 5 en la transmisión de datos de alta velocidad, mientras que el Spartan 3E FPGA se puede utilizar en la transmisión de datos de baja potencia.

- c. El trabajo publicado por Honda et al., (2016) implementa la gestión de tono piloto de baja frecuencia para redes ópticas pasivas de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network, WDM-PON*) hacia el futuro móvil Fronthaul empleando códigos de línea 64B/66B. El tono piloto incrustado de baja frecuencia puede proporcionar canales de administración sin protocolo para los sistemas de señalización móvil basados en WDM-PON. Los experimentos mostraron que el control de índice de modulación permite insertar tonos piloto de 128 kbps en las señales de la opción 8 de CPRI codificadas en línea 64B/66B, que tienen un componente de baja frecuencia.

1.3. Definición del problema.

La temática de los códigos de línea para la transmisión óptica no ha sido abordada en nuestro ámbito, por lo que no existe dominio de los aspectos teóricos y técnicos que permitan la realización de investigaciones, lo anterior constituye el problema científico de este trabajo.

1.4. Justificación del problema.

El presente trabajo de titulación se desarrolla la implementación de escenarios de simulación de esquemas de codificación de línea en sistemas de transmisión óptica sobre la plataforma OptiSystem, la misma que nos

permite abordar teórica y prácticamente códigos de línea que se podrían utilizar en diferentes sistemas de comunicaciones digitales.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

El objetivo general es determinar los principales aspectos teóricos y técnicos de los códigos de línea para la transmisión óptica, así como la simulación de ejemplos de aplicación de los mismos.

1.5.2. Objetivos específicos.

- ✓ Estudio general de la problemática de codificación de línea en la transmisión digital.
- ✓ Analizar los fundamentos teóricos de los códigos de línea ópticos, sus aplicaciones fundamentales y particularidades.
- ✓ Utilizar el software OptiSystem 7.0 como herramienta de simulación implementando algunos ejemplos de aplicación de códigos de línea para la transmisión óptica.

1.6. Hipótesis.

Este trabajo tiene como hipótesis que la realización de una investigación referida a los fundamentos teóricos, aspectos técnicos fundamentales, así como a las características principales de estos códigos de línea y los métodos de simulación e implementación, permitiría enfrentar proyectos de investigación utilizando los mismos.

1.7. Metodología de investigación.

Existen muchas definiciones relacionadas a la metodología de investigación y que son necesarias para el desarrollo del presente de trabajo de titulación. Parece apropiado en este momento explicar la diferencia entre los métodos de investigación y la metodología de investigación. Los métodos de investigación se pueden entender como todos los métodos/técnicas que se utilizan para realizar investigaciones. Los métodos o técnicas de investigación, por lo tanto, se refieren a los métodos que los investigadores adoptan para llevar a cabo su investigación. Los métodos de investigación se pueden incluir en los siguientes tres grupos:

- a. En el primer grupo, incluimos aquellos métodos que están relacionados con la recopilación/adquisición de datos; estos métodos se usarán cuando los datos ya disponibles no sean suficientes para llegar a la solución requerida;
- b. El segundo grupo consiste en aquellas técnicas matemáticas/estadísticas que se utilizan para establecer relaciones entre los datos y las incógnitas;
- c. El tercer grupo consiste en aquellos métodos que se utilizan para evaluar la precisión de los resultados obtenidos.

Los métodos de investigación incluidos en los dos últimos grupos mencionados anteriormente se toman generalmente como herramientas analíticas de investigación. Mientras que, la metodología de investigación es una forma de resolver sistemáticamente el problema de investigación; se puede entender como una ciencia de estudiar cómo se hace la investigación

científicamente. En él, formulamos los diversos pasos que debe adoptar un investigador al estudiar su problema de investigación junto con la lógica subyacente.

De las discusiones anteriores se desprende que la metodología de investigación tiene muchas dimensiones y los métodos de investigación constituyen parte de la metodología de investigación. El alcance de la metodología de investigación es más amplio que el de los métodos de investigación. Por lo tanto, cuando hablamos de metodología de investigación no solo hablamos de los métodos de investigación, sino que también consideramos la lógica detrás de los métodos que usamos en el contexto de nuestro estudio de investigación y explicamos por qué estamos usando un método o técnica en particular y por qué no estamos usando otros para que los resultados de la investigación puedan ser evaluados por el propio investigador o por otros.

Los investigadores también necesitan comprender las suposiciones subyacentes a varias técnicas. Todo esto significa que es necesario que el investigador diseñe su metodología para su problema, ya que el mismo puede diferir de un problema a otro. Por ejemplo, un arquitecto que diseña un edificio tiene que evaluar conscientemente la base de sus decisiones, es decir, debe evaluar por qué y sobre qué base selecciona el tamaño, el número y la ubicación particulares de puertas, ventanas y ventiladores, utiliza materiales particulares y no otros y similares. Del mismo modo, en la investigación, el científico debe exponer las decisiones de investigación a la evaluación antes

de implementarlas. Tiene que especificar con mucha claridad y precisión qué decisiones elige y por qué las selecciona para que también puedan ser evaluadas por otros.

1.8. Estructura del trabajo.

Para dar cumplimiento a los objetivos anteriores, el trabajo se ha estructurado en dos capítulos adicionales. En el capítulo 2 se realiza un estudio de las generalidades de los códigos de línea en la transmisión digital y se hace énfasis en las características de los códigos de línea ópticos y sus particularidades, mientras que en el tercer capítulo se presentan ejemplos de aplicaciones de códigos de línea en la transmisión óptica, lo que servirá para futuros proyectos de investigación y continuar profundizando en el estudio de dicha temática.

Capítulo 2: Códigos de línea en la transmisión óptica

2.1. Sistema digital de comunicaciones en banda base.

La transmisión digital en banda base tiene como característica fundamental la ausencia de una modulación en el sentido convencional del término de variación de un parámetro de una señal portadora sinusoidal con el objetivo de trasladar el espectro del mensaje. Esta peculiaridad se debe a que los medios de transmisión empleados presentan carácter pasa bajo, tales como el cable coaxial, los pares trenzados y la fibra óptica. En estos sistemas es necesaria la modulación en su sentido más amplio, pues se requiere la adaptación de la señal que proviene de la fuente de información al medio de transmisión empleado.

Entre las aplicaciones de las transmisiones digitales en banda base, se encuentran la transmisión de señales PCM (*Pulse Code Modulation*) entre repetidores regenerativos a diferentes velocidades; la transmisión de datos sobre pares simétricos de la red telefónica local entre terminales y/o computadoras; la transmisión digital en los lazos de abonados de las redes ISDN (sistemas HDSL, SDSL, SHDSL) y la transmisión en redes locales (Carlson, Crilly, & Rutledge, 2002).

En la figura 2.1 se muestra un esquema en bloques general de un sistema de transmisión en banda base. Las señales de entrada y salida del canal se expresan por las expresiones matemáticas 1 y 2, respectivamente. Se asume que el canal de transmisión es un sistema invariante en el tiempo y

descrito a través de su respuesta al impulso de Dirac, los pulsos de entrada y salida se relacionan a través de la integral de convolución expresada en la ecuación 3.

$$V(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{qn} P(t - nT) \quad (1)$$

$$Z(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{qn} S(t - nT) + r(t) \quad (2)$$

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (3)$$

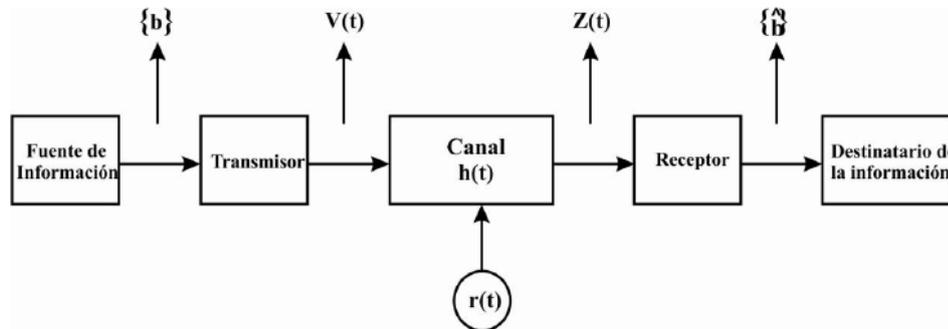


Figura 2. 1: Esquema en bloques de un sistema digital de comunicaciones en banda base.

Elaborado por: Autor

Como puede observarse en la expresión 1, $V(t)$ se compone de una suma infinita de pulsos desplazados en el tiempo y con la forma elemental $P(t)$, que son modulados en amplitud de pulso (MAP) por los coeficientes a_{qn} . Dichos coeficientes se forman a través de la codificación de los símbolos de la fuente de información y pueden tomar uno de L valores posibles, dependiendo de la codificación.

En las transmisiones digitales al considerar los aspectos relacionados con el ancho de banda y la velocidad de transmisión, se hace necesario

distinguir entre la velocidad de señalización (*signal rate*) y la de transmisión de información (*data rate*), expresadas en 4 y 5, respectivamente.

$$V_s = \frac{1}{T} \text{ Baudio} \quad (4)$$

$$V_T = V_s \log_2 L \text{ bps} \quad (5)$$

La velocidad de señalización es el número de símbolos transmitidos por unidad de tiempo y se expresa en Baudio, mientras que la de transmisión viene fijada por el número de bits de datos que se transmiten en la unidad de tiempo y se expresa en bits por segundo. Estas velocidades pueden ser iguales o diferentes dependiendo de la codificación empleada, por ejemplo, para el caso binario ($L=2$) dichas velocidades son iguales.

Debe destacarse que para una velocidad de transmisión determinada, un aumento de L permite reducir la velocidad de señalización asociada, y por tanto, el ancho de banda necesario para la transmisión de los datos. Análogamente, para un ancho de banda y velocidad de señalización dados, el aumento de L permite lograr una velocidad de transmisión de datos mayor. Sin embargo, al transmitir a una potencia dada, incrementar L implica una reducción de la inmunidad de la señal al ruido.

2.2. Sistema de comunicaciones digitales en banda base para la transmisión de señales PCM.

En la figura 2.2 se presenta un esquema en bloques de un sistema de comunicaciones digitales en banda base para la transmisión de señales PCM. Como se puede observar, las señales analógicas requieren ser digitalizadas,

lo cual se realiza mediante los procesos de muestreo, cuantificación y codificación. En el bloque codificador de forma de onda se asigna a los símbolos una forma de onda compatible con el canal de comunicaciones banda base, este proceso es conocido también como modulación banda base.

La salida de este bloque es una secuencia de pulsos correspondientes a los símbolos digitales que se desean transmitir. En el extremo receptor se detectan las formas de onda y se estiman los símbolos digitales, recuperándose la información transmitida. Para llevar dicha señal al dominio analógico se requieren los procesos de decodificación y filtrado.

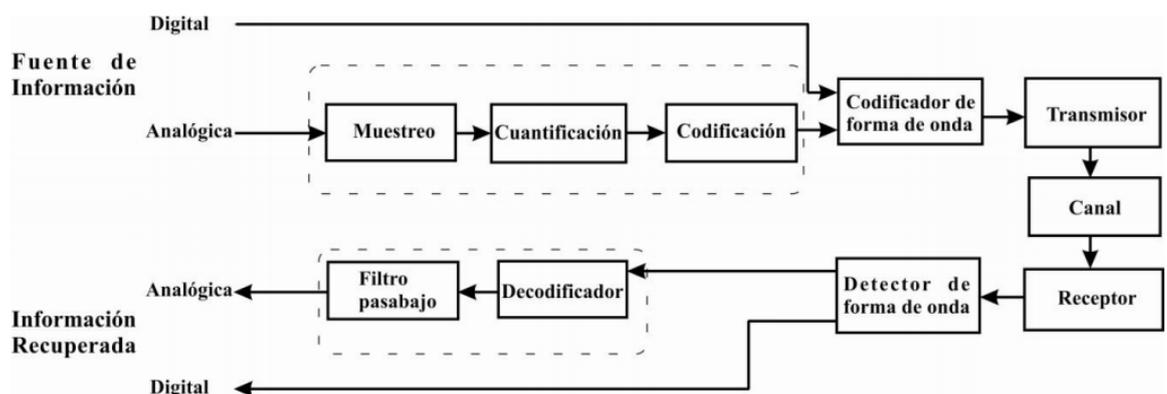


Figura 2. 2: Esquema en bloques de un sistema de comunicaciones digitales en banda base para la transmisión de señales PCM.

Fuente: (Carlson et al., 2002)

2.3. Codificación de línea para la transmisión digital en banda base.

Un código de línea es en esencia un método para codificar los datos que serán transmitidos por el sistema de transmisión digital; cada unidad de información debe estar contenida dentro de un determinado espacio de tiempo denominado tiempo de dígito, el cual está definido por un reloj (tren de pulsos idénticos que proporciona la sincronización básica al sistema); es decir, el tiempo de duración del dígito se corresponde con el período de la señal del

reloj. Resulta fundamental que el receptor disponga de sincronismo para poder recuperar la señal transmitida (Raatikainen, 2003).

La codificación de línea es el proceso de convertir datos digitales en señales digitales, es decir, los datos (en forma de texto, números, imágenes, audio o video) se encuentran almacenados en secuencias de bits, y deben convertirse a niveles de voltaje, corriente u otro tipo de símbolo para su transmisión por la línea. Transmitir en banda base significa enviar una señal digital a través de un canal sin transformarla al dominio analógico.

En la figura 2.3 se muestra el proceso de la codificación de línea para la transmisión digital en banda base.

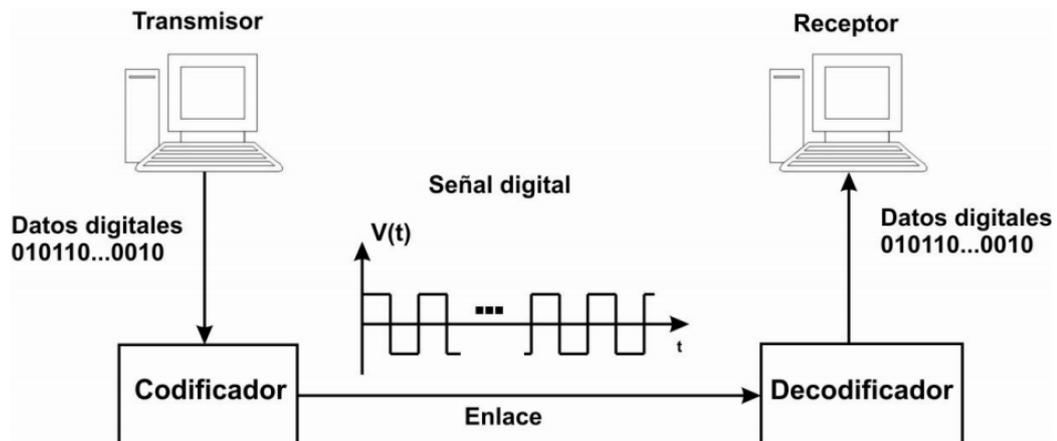


Figura 2. 3: Codificación de línea para la transmisión digital en banda base.
Elaborado por: (Proakis & Salehi, 2008)

2.4. Funciones de los códigos de línea.

Los códigos de línea cumplen diversos objetivos en la transmisión digital, entre sus principales funciones se encuentran:

- Mantener el sincronismo de los equipos.
- Controlar errores en la transmisión.

- Reducir la potencia en bajas frecuencias.
- Optimizar la potencia detectable.
- Evitar la componente de CD.
- Adaptar la señal al medio de transmisión preservando la calidad de dicha transmisión.

Además, la codificación de línea es necesaria para:

- El seguimiento de la calidad de la transmisión mediante el monitoreo de la tasa de errores en la recepción. Estos errores son inducidos por la generación de ruido intrínseco o añadido, problemas de distorsión, pérdidas de sincronismo, alinealidades, etc.
- La extracción de la señal de sincronismo, imprescindible para la demodulación y recuperación de la información.
- Enviar información adicional, tales como señales de alarmas y supervisión.

Los datos se transmiten a menudo a través de enlaces acoplados de corriente alterna, por ejemplo, los pares trenzados de cobre o fibra óptica, y cualquier contenido de corriente directa (CD) en los datos codificados puede causar distorsión de la señal. El equilibrio de CD que proporcionan los códigos de línea, reduce la distorsión de la señal al asegurar que la disparidad de los datos codificados, es decir, la diferencia entre el número de unos y el número de ceros, es nula (Farrell, 2002).

2.5. Códigos de línea empleados en la transmisión en banda base.

En las siguientes sub-secciones se describen los códigos de línea empleados para la transmisión digital en banda base. Las formas de onda de las leyes de codificación de los códigos se muestran en la figura 2.4.

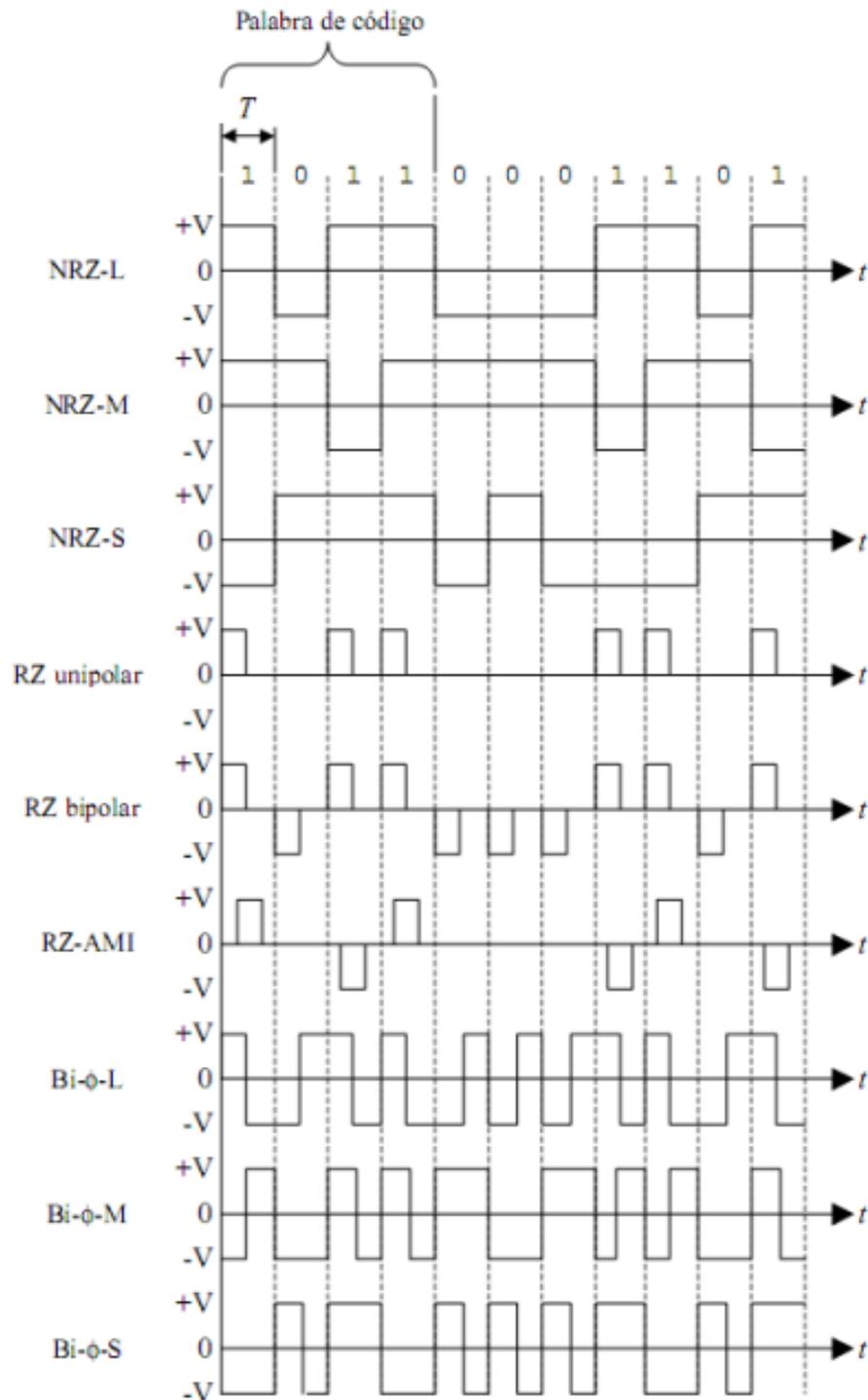


Figura 2. 4: Formas de onda de las señales con codificación NRZ, RZ y bifase.

Fuente: (Proakis, 2001)

2.5.1. Códigos no retorno a cero.

El formato no retorno a cero (NRZ) es uno de los más utilizados, este puede ser subdividido en los siguientes subgrupos:

✓ **NRZ-L:**

El código NRZ-L se utiliza extensivamente en la lógica digital, se asigna al estado o símbolo "1" un nivel alto de voltaje, y al estado "0" un nivel bajo.

✓ **NRZ-M:**

Esta codificación se emplea principalmente en grabación sobre cinta magnética. El estado "1" se representa con un cambio en nivel de voltaje, y el "0" sin cambio de nivel.

✓ **NRZ-S:**

Este código es el complemento del código NRZ-M, es decir, el símbolo "1" representa sin cambio en nivel de voltaje, y el "0" un cambio de nivel.

2.5.2. Códigos retorno a cero.

Los códigos retorno a cero (RZ) pueden clasificarse del siguiente modo:

✓ **RZ unipolar:**

En este código el símbolo binario "1" se representa por un nivel de voltaje alto durante la mitad de duración del bit, y el símbolo "0" es representado por la ausencia de pulso durante toda la duración del dígito.

✓ **RZ bipolar:**

En la codificación RZ bipolar los símbolos binarios "1" y "0" se representan con niveles de polaridad opuestos.

✓ **RZ-AMI:**

En RZ-AMI el símbolo “1” se representa con niveles de polaridad alternados, y el “0” se representa por la ausencia de pulso durante la duración del dígito. Este es un procedimiento de “codificación con memoria”, en el que se hace necesario almacenar la polaridad asignada al último “1” transmitido para poder invertirla en el próximo.

2.5.3. Códigos bifases.

Los códigos bifases encuentran su principal aplicación en comunicaciones por fibra óptica, este grupo de códigos puede subdividirse de la siguiente forma (Vlajic, 2010):

✓ **Bifásico Nivel (Bi- ϕ -L):**

En este código el símbolo binario “1” se codifica con un nivel alto en la primera mitad del intervalo del bit y un nivel bajo en la segunda mitad; el “0” se codifica con un nivel bajo en la primera mitad del intervalo del bit y un nivel alto en la segunda mitad.

✓ **Bifásico Marca (Bi- ϕ -M):**

Con este código siempre existe una transición al principio de cada bit, su ley de codificación es la siguiente: el estado “1” se codifica con una segunda transición en la mitad del intervalo del bit, y el “0” se codifica con ausencia de segunda transición, en otras palabras: el “1” está representado por dos niveles dentro del intervalo de bit, mientras que el “0” está representado por un único nivel (que puede ser alto o bajo).

✓ **Bifásico Espacio (Bi- ϕ -S):**

En este código también existe siempre una transición al principio de cada intervalo del bit, el símbolo binario “1” se codifica con ausencia de segunda transición, y el “0” se codifica con una segunda transición en la mitad de intervalo del bit.

2.5.4. Código Miller

La ley de codificación del código Miller, también conocido como código de demora, es la siguiente: el estado binario “1” se hace corresponder con una transición de niveles en medio del intervalo de bit, mientras que para el símbolo “0” no ocurre cambio de nivel, excepto que el siguiente símbolo sea otro “0”, en cuyo caso, esta vez al finalizar el dígito se produce una transición del nivel (Vlajic, 2010). En la figura 2.5 se ilustra el código de línea Miller.

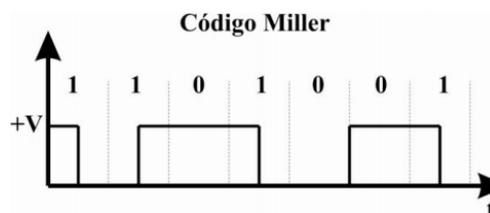


Figura 2. 5: Codificación Miller
Fuente: (Carlson et al., 2002)

2.6. Sistema de transmisión por fibra óptica

La transmisión por fibra óptica emplea energía luminosa como soporte, los haces de luz viajan por el núcleo de la fibra sufriendo múltiples reflexiones, cumpliendo el fenómeno de reflexión interna total (Serrano, 2003). Un análisis simplificado de los sistemas de transmisión por fibra óptica muestra que estos constan de tres elementos principales:

- ✓ El transmisor: consiste en una interfaz analógica o digital, un convertidor de voltaje a corriente que gobierna una fuente de luz y un adaptador de luz de fuente a fibra.
- ✓ La guía: es el medio por el cual se transmiten las señales.
- ✓ El receptor: incluye un fotodetector, un convertidor de corriente a voltaje, un amplificador y una interfaz analógica o digital.

Para poder analizar los códigos de línea empleados en la transmisión digital por fibra óptica, primeramente, se estudiará dicho sistema de transmisión a partir de un esquema en bloques general, que se muestra en la figura 2.6. Las funciones de las partes integrantes del mismo se explican a continuación.

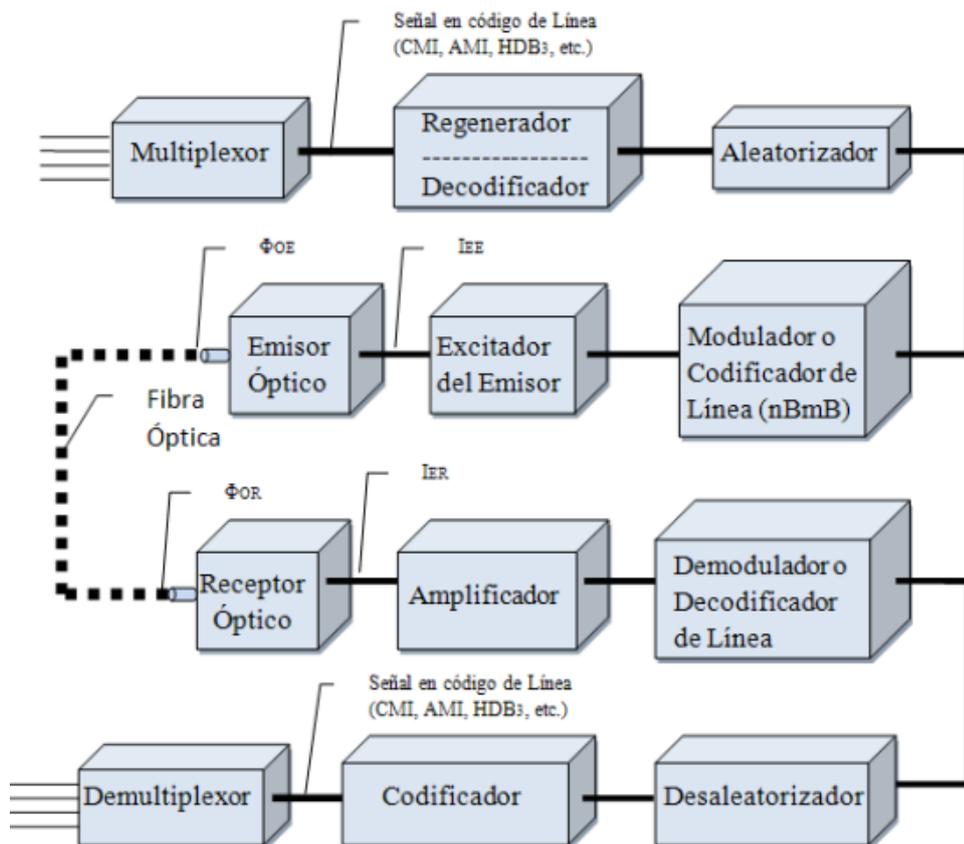


Figura 2. 6: Esquema en bloques de un sistema de transmisión por fibra óptica.
Fuente: (Serrano, 2003)

El multiplexor transmite por un canal único la señal de la línea de entrada seleccionada. El bloque regenerador decodificador tiene el objetivo de eliminar fluctuaciones en dicha señal y posteriormente decodificarla. Esto último se debe a que no todos los códigos de línea son adecuados para la transmisión óptica, por ejemplo, los códigos pseudoternarios (AMI, HDB3, CMI, etc.) que toman valores +, - y 0. El aleatorizador cambia la probabilidad de ocurrencia de secuencias seguidas de unos o ceros, es decir, evita la ocurrencia de las secuencias largas de símbolos idénticos, pues estas provocan la pérdida del sincronismo y de la capacidad de regulación automática de nivel.

En el bloque modulador o codificador de línea (nBmB) se codifican los datos con un código de línea del tipo nBmB, pues estos aportan considerables ventajas para la transmisión por fibra óptica. La salida de este bloque será una señal adecuada para su utilización en el sistema óptico. La función del bloque excitador del emisor es proporcionar la corriente eléctrica (I_{EE}) para el correcto funcionamiento del emisor óptico, el cual tiene la misión de convertir dicha corriente en potencia luminosa (Φ_{OE}).

En el bloque receptor óptico se realiza la conversión de la potencia luminosa recibida (Φ_{OR}) en una corriente eléctrica (I_{ER}); la cual se amplifica en el bloque amplificador del receptor; posteriormente en el demodulador o decodificador de línea se decodifica la señal nBmB recuperándose los datos aleatorizados.

El bloque desaleatorizador cumple el objetivo de recuperar la verdadera secuencia de datos. El esquema continúa con el bloque codificador en el cual, al codificarse nuevamente los datos, se obtiene la señal original. El último elemento del esquema en bloques es el demultiplexor, que tiene la función inversa a la del multiplexor, es decir, entrega la señal en su entrada a la salida correspondiente.

2.7. Códigos de línea adecuados para la transmisión óptica.

El código de línea usado en un sistema de transmisión por fibra óptica desempeña un papel muy importante en correspondencia con la velocidad de transmisión del enlace. Una peculiaridad fundamental de los enlaces por fibras ópticas es que, a diferencia de otros sistemas de transmisión digital, no hay tierra y por tanto no existe la posibilidad de transmitir señales bipolares. Por esta razón, los códigos pseudoternarios (AMI, HDB3, 4B3T, etc.) no pueden ser empleados y deben transcodificarse, para llevarlos a los formatos de códigos de línea ópticos (Abhimanyu, 2003).

En la transmisión digital por fibra óptica, para seleccionar un código de línea en particular, además de los mencionados anteriormente, normalmente se exigen otros requisitos; por ejemplo, es conveniente y económico elegir un código eficiente debido a las siguientes razones (Cassiolato, 1994):

- ✓ Al aumentar la velocidad, la electrónica asociada a la realización tiende a ser más compleja, costosa y requiere más energía.
- ✓ El factor limitante para el aumento de la velocidad son los dispositivos electrónicos y no los ópticos.

- ✓ La degradación de la sensibilidad al ruido en la electrónica del receptor.
- ✓ Las dispersiones en la fibra a pesar de que han disminuido, pueden resultar significativa con el uso del amplificador óptico.

A pesar de que el costo del decodificador es mayor para códigos más eficientes, es bajo en comparación con el costo total del sistema. En los próximos epígrafes se estudian los principales códigos de línea empleados para la transmisión óptica.

2.8. Código no retorno a cero

El código no retorno a cero es uno de los más simples en las comunicaciones ópticas; los bits “1” y “0” se interpretan como la presencia y ausencia de luz en la fibra, respectivamente. Una representación de la ley de codificación NRZ se puede observar en la figura 2.7. A pesar de la sencillez de la transmisión con este método de codificación, se logran solo bajas velocidades de transmisión en los enlaces ópticos que lo emplean, por lo que ha sido reemplazado por otros métodos en la mayoría de las aplicaciones prácticas (Harry & Dutton, 1988).

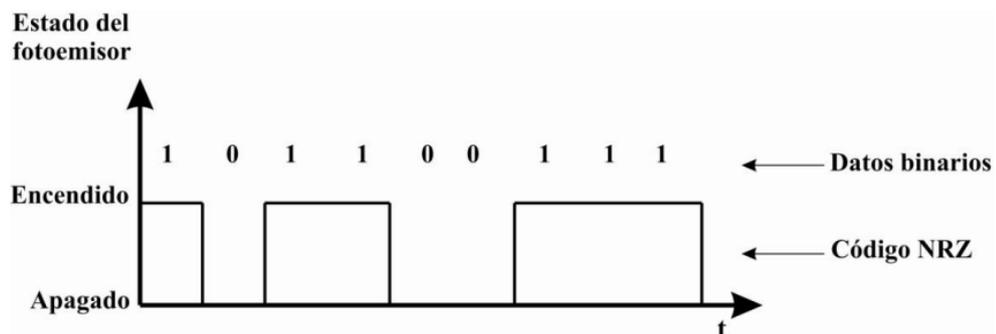


Figura 2. 7: Codificación NRZ
Fuente: (Carlson et al., 2002)

La recepción de los datos utilizando esta técnica de codificación es de mayor complejidad que la transmisión, el problema está en volver a crear el flujo de bits original. Para ello el receptor tiene que censar el estado de la línea y, al compararlo con un valor umbral, determinar si el bit actual es "0" o "1". Para esto resulta necesaria la recuperación del reloj del sistema, pues de lo contrario no hay manera de saber si un estado corresponde a un único dato o a una serie de datos idénticos.

En el proceso de recepción de los datos existen dos problemáticas importantes (Harry & Dutton, 1988):

- ✓ No hay información de la sincronización para que el receptor pueda realizar el proceso de decisión. Para determinar dónde termina un bit y el empieza otro, el receptor debe usar su propio oscilador (reloj). Sin embargo, no hay manera económica de asegurar que el reloj del receptor esté funcionando con el sincronismo requerido. Los osciladores pueden ser fabricados con una tolerancia de 0,005%, pero incluso ello no es lo suficientemente preciso.
- ✓ La señal se deforma durante su paso a través del sistema, es decir, sufre efectos que provocan su distorsión.

En la figura 2.8 puede observarse como en la transmisión óptica el fotoemisor no es capaz de responder con exactitud e instantáneamente ante los cambios bruscos de la señal de entrada; de hecho, se transmite un poco de luz durante el estado "0" de la línea. Además, la señal es afectada en su recorrido por la fibra por factores tales como la dispersión cromática, por lo

que puede llegar severamente distorsionada al extremo receptor. A causa de esto, la señal ya no es una clara presencia o ausencia de luz, sino que la intensidad de la luz cambia lentamente de un estado a otro pasando por todos los estados de amplitud intermedios.



Figura 2. 8: Evolución de un pulso óptico.
Fuente: (Sizun, Boisrobot, & Bouchet, 2006)

El receptor debe hacer entonces lo siguiente (Harry & Dutton, 1988):

1. Al comparar con un valor umbral decidir que estado hay en la línea ("0" o "1"), de forma tal que cuando esté por encima del mismo se representará un "1", de lo contrario un "0".
2. Decidir dónde comienzan y terminan los bits, esto es debido a que la amplitud de la señal óptica cambia lentamente de un estado a otro, el receptor debe determinar el extremo y comienzo del siguiente bit.
3. Determinar dónde comienza un nuevo bit incluso si el estado de la línea no cambia. Cuando un bit es el mismo que el anterior, el receptor tiene que ser capaz de distinguir cuando ha terminado uno y comenzado el otro. Esto es muy importante en las transmisiones de datos, pues pueden aparecer cadenas largas de símbolos idénticos.

El funcionamiento de un receptor simple puede explicarse siguiendo la siguiente secuencia de pasos (Harry & Dutton, 1988):

1. Muestrear la línea a intervalos de tiempo menores que la duración del bit, por ejemplo, siete veces por cada bit.
2. Cuando se detecta un cambio de estado este podría ser el comienzo de un bit, se debe entonces iniciar un temporizador (generalmente un contador) para esperar la mitad de la duración del bit.
3. Muestrear la línea cuando se agote dicho tiempo. Si se mantiene el mismo estado entonces se recibe el bit, en caso contrario el cambio de estado anteriormente detectado fue producto de un ruido, regresar al paso 1.
4. Se ajusta el temporizador para un tiempo un bit completo.
5. Monitorear la línea, si se detecta un cambio de estado antes que se agote el tiempo regresar al paso 2.
6. Cuando transcurra el tiempo se recibe el bit.
7. Regresar al paso 4.

Lo que está sucediendo en el receptor se puede resumir en el siguiente análisis:

- El receptor está utilizando el cambio de estado de un bit a otro para definir el inicio de un bit y el final del anterior.
- Cuando no hay cambios se utiliza el reloj del receptor para distinguir los bits. El receptor puede trabajar un tiempo determinado sin cambios en el estado de la línea dependiendo de la calidad del sistema de recuperación del reloj, de los PLLs y de la velocidad de transmisión.
- Cada vez que hay un cambio de estado, el receptor actualiza su noción acerca de los bits.

El éxito en la recepción de los datos depende de (Harry & Dutton, 1988):

- Cuán sincronizados están los relojes del receptor y del transmisor.
- La calidad del receptor al decidir cuándo se ha producido un cambio de estado en la línea. Dado a que se trata de cambios graduales de intensidad y no abruptos, es entonces una cuestión de criterio por parte del receptor.
- La frecuencia de muestreo de la línea. Algunos de los antiguos sistemas electrónicos utilizaban tan solo cinco muestras en la duración del bit. En los sistemas actuales mediante un chip dedicado para cada línea, se ha aumentado la frecuencia de muestreo, lográndose así resultados más precisos.
- La frecuencia de las transiciones de estados en la línea. El número máximo permisible de bits idénticos consecutivos está determinado por la calidad de la línea de transmisión y la complejidad del receptor. Algunos sistemas soportan cadenas de hasta 6 bits sin transiciones sin perder el sincronismo.

A pesar de su simplicidad el código NRZ presenta las siguientes desventajas: (1) potencia media no constante, (2) problemas para recuperar el reloj.

2.9. Código no retorno a cero invertido

La codificación no retorno a cero invertido (NRZI) se utiliza para proporcionar en los sistemas de comunicación digital por fibra óptica suficientes transiciones en los datos enviados. Su ley de codificación es la

siguiente: el bit “0” se indica con una transición de luz a no luz o de no luz a luz y el bit “1” se representa sin cambio en el estado de la línea, tal como se ilustra en la figura 2.9.

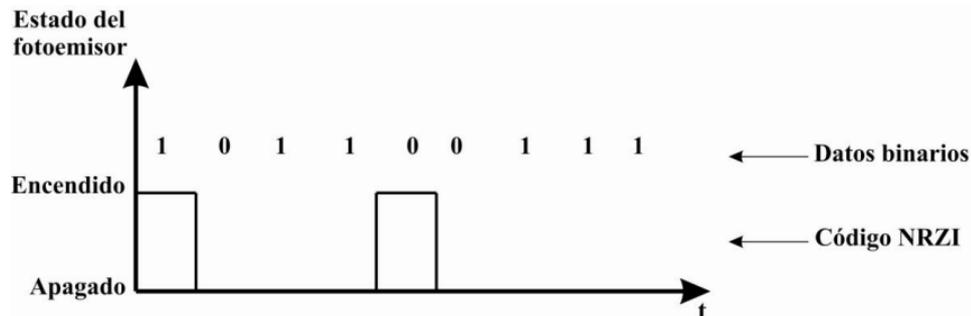


Figura 2. 9: Codificación NRZI.
Fuente: (Carlson et al., 2002)

Con el código de línea NRZI, se asegura que las cadenas de “0” no causen problema de pérdida del sincronismo. En cuanto a las largas secuencias de “1”, un modo de solucionar la problemática es mediante el uso de un protocolo de capa superior. Por ejemplo, la familia de protocolos HDLC inserta un bit “0” sin condiciones después de cada serie de 5 bits “1” consecutivos (a excepción de un delimitador o secuencia de abortar).

2.10. Código multinivel.

En la codificación multinivel una sola línea de estado representa múltiples bits. Por ejemplo, para un flujo de bits con tasa de transmisión R bps, en lugar de transmitir una forma de onda para cada bit, primero se agrupan los datos en bloques de k bits, entonces se utilizan $M = 2^k$ niveles de pulsos para la transmisión; cada forma de onda de pulso ahora representa un símbolo de k bits en un flujo de símbolos de tasa de transmisión R/k Baudio.

Las señales multinivel, en donde $M > 2$, se utilizan para disminuir el número de símbolos transmitidos por segundo, y por tanto, para reducir los requerimientos de ancho de banda del canal; por lo que representa una alternativa muy importante para aumentar la velocidad de transmisión. Para crear líneas de estados únicas pueden utilizarse tanto la amplitud como la fase de la señal, aunque en las comunicaciones ópticas se puede emplear más fácilmente la amplitud que la fase de la señal portadora óptica. En la figura 2.10 se ilustra el principio de codificación multivalente a través de un ejemplo.

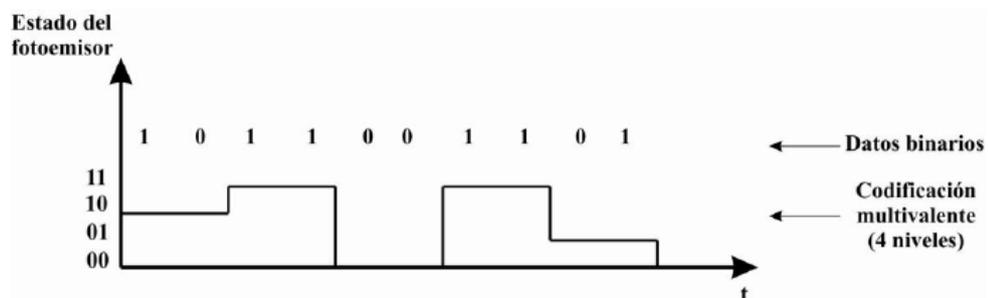


Figura 2. 10: Ejemplo de codificación multinivel ($M = 4$).
Fuente: (Carlson et al., 2002)

En este caso cada período de señalización en la línea representa 2 bits; la frecuencia de los cambios en la línea se redujo a la mitad en comparación con NRZ y NRZI; sin embargo, ahora se tienen que representar cuatro estados en la línea, es decir, cuatro niveles de intensidad de la señal luminosa. La codificación de cuatro niveles para este ejemplo es la siguiente:

“1” + “1” = Estado 11 (Estado 3)

“1” + “0” = Estado 10 (Estado 2)

“0” + “1” = Estado 01 (Estado 1)

“0” + “0” = Estado 00 (Estado 0)

Esta codificación presenta las siguientes desventajas (Harry & Dutton, 1988):

1. Para obtener la misma diferencia de potencia entre los estados del fotoemisor se requiere emplear mayor potencia que en la codificación NRZ.
2. Se necesita una manera confiable de hacer que la fuente luminosa sea capaz de enviar la señal discreta de n niveles y un receptor apto para discriminar entre los dichos niveles, lo que aumenta el costo de los transceptores.

CAPÍTULO 3: Simulación de aplicaciones de códigos de línea en la transmisión óptica

En el capítulo anterior se realizó el estudio de las características fundamentales de los principales códigos de línea para la transmisión digital en general y la óptica en particular. Resulta entonces de gran interés la implementación de códigos de línea para distintas aplicaciones ópticas. A continuación, se diseñan algunos ejemplos de aplicaciones de los códigos de línea en la transmisión por fibra óptica y se analiza cada uno de ellos con la ayuda del software profesional OptiSystem 7.0.

3.1. Enlace óptico con transmisión y recepción de señales no retorno a cero.

A continuación, se simula la transmisión y recepción de señales NRZ, el esquema de la simulación se muestra en la figura 3.1. Como se puede observar, las señales de esta codificación se logran empleando un generador de pulsos NRZ, el cual está alimentado por un generador de secuencias pseudoaleatorias (fuente de información). La señal NRZ se representa en el osciloscopio (*Oscilloscope Visualizer*), mostrado en la figura 3.2.

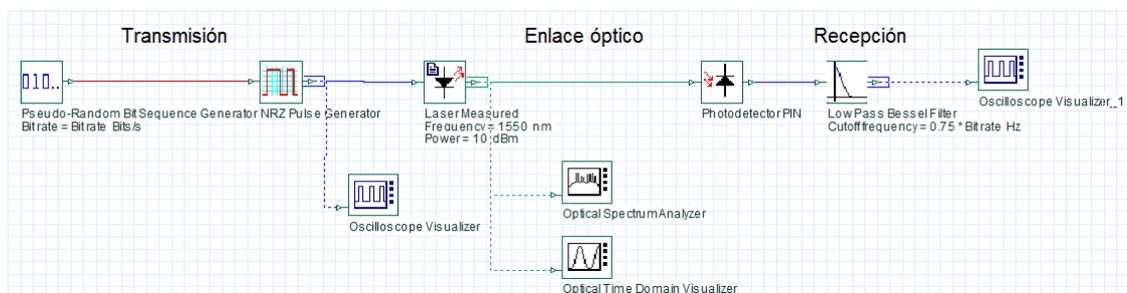


Figura 3. 1: Esquema de simulación del enlace óptico con transmisión de señales NRZ.

Elaborado por: Autor

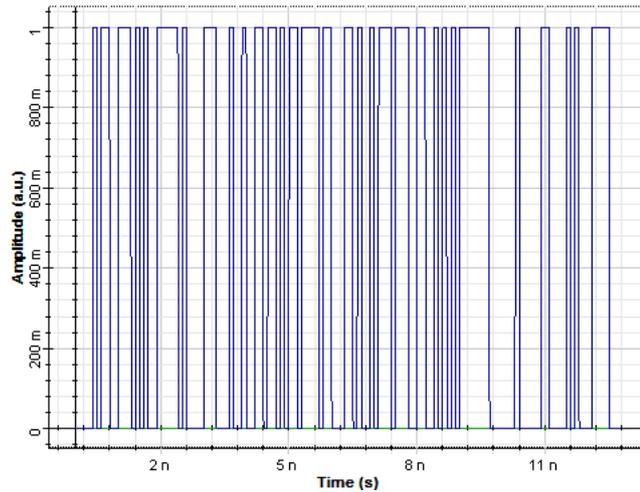


Figura 3. 2: Señal NRZ generada.
Elaborado por: Autor

Para la transmisión de las señales a través de la fibra óptica, se emplea un diodo láser de inyección, cuya longitud de onda y potencia de trabajo son 1550 nm y 10 dBm (10 mW), respectivamente. El espectro de potencia en dBm contra longitud de onda en m, puede estudiarse con el uso de un analizador óptico de espectro, tal como se visualiza en la figura 3.3. El análisis en el dominio del tiempo se logra empleando la herramienta *Optical Time Domain Visualizer*, como puede observarse en la figura 3.4.

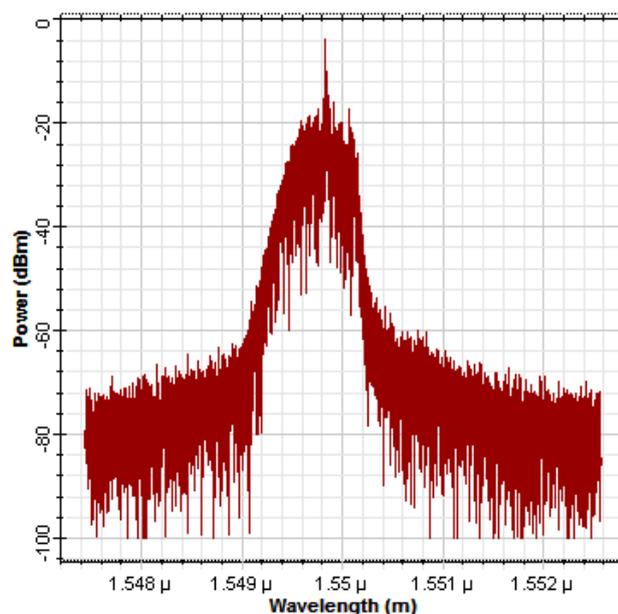


Figura 3. 3: Espectro de potencia de la señal óptica transmitida.
Elaborado por: Autor

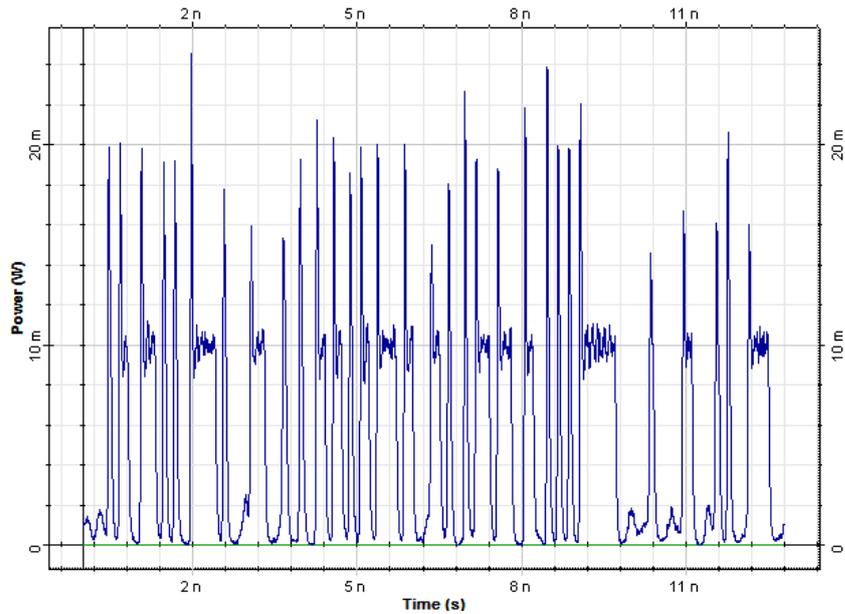


Figura 3. 4: Análisis de la potencia en el dominio del tiempo de la señal óptica.
Elaborado por: Autor

Para la detección de las señales NRZ se emplea un fotodetector PIN. La señal a la salida del mismo se pasa por un filtro pasabajo de Bessel, cuya frecuencia de corte está dada por el 75 % de la tasa de bit de la fuente de información. En la figura 3.5 se puede observar la señal obtenida a la salida de dicho filtro pasabajo.

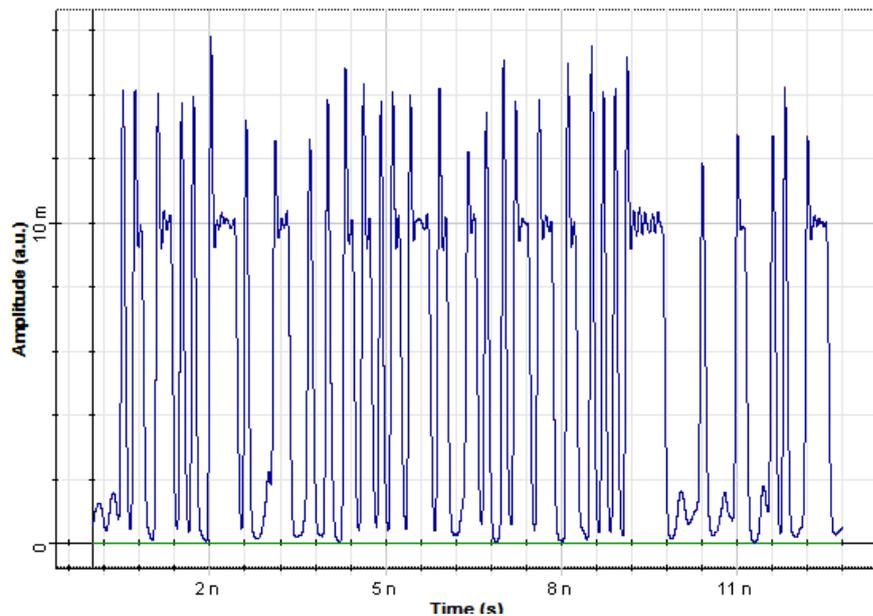


Figura 3. 5: Señal en la salida filtrada.
Elaborado por: Autor

3.2. Enlace óptico con transmisión y recepción de señales retorno a cero.

En esta simulación se diseñó un enlace óptico empleando en codificación RZ. El esquema de la simulación se muestra en la figura 3.6. Las señales codificadas se logran empleando un generador de pulsos RZ, y la fuente de información usada es un generador de secuencias pseudoaleatorias de bits.

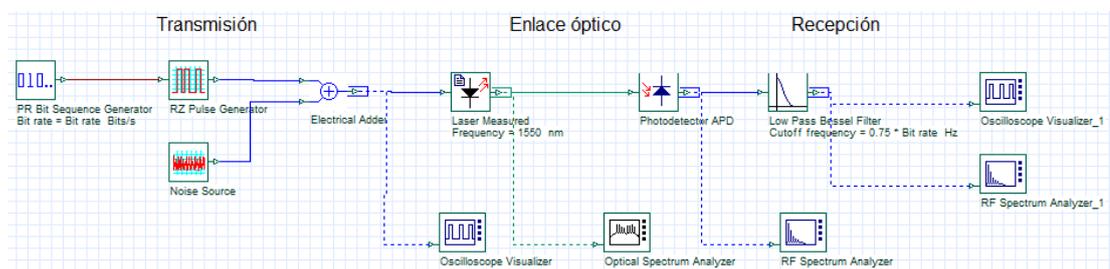


Figura 3. 6: Esquema de simulación para la transmisión y recepción de señales RZ. Elaborado por: Autor

En esta simulación se analizan los efectos de la presencia del ruido en el extremo transmisor, que en la práctica puede generarse en los componentes activos eléctricos y ópticos. Como se puede observar en la figura 3.6, el ruido es generado por el bloque *Noise Source* y se adiciona a la señal RZ. La transmisión de la señal resultante se realiza con un diodo láser de inyección que opera a 1550 nm.

La señal RZ, el ruido y la señal resultante se ilustran en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9, respectivamente. El espectro de potencia (en dBm) contra longitud de onda puede estudiarse mediante en el analizador óptico del espectro, tal como se muestra en la figura 3.10.

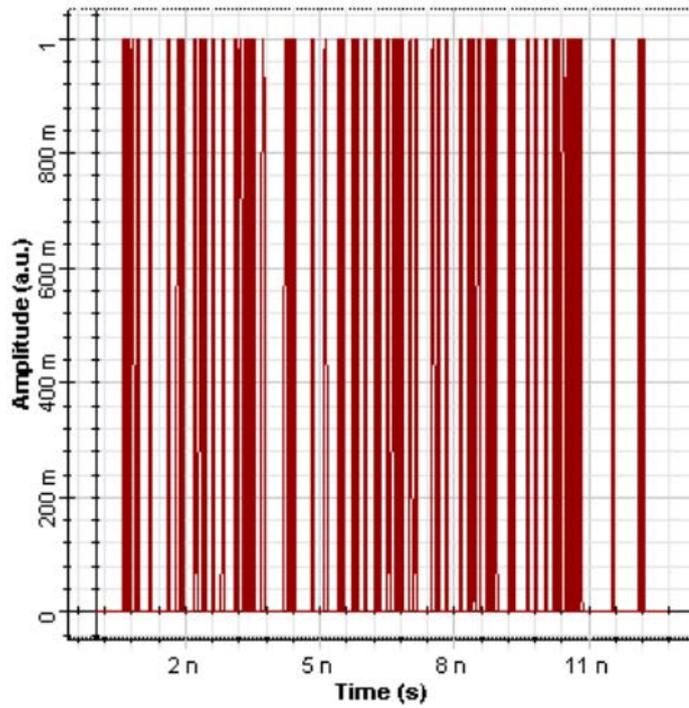


Figura 3. 7: Señal con codificación RZ
Elaborado por: Autor

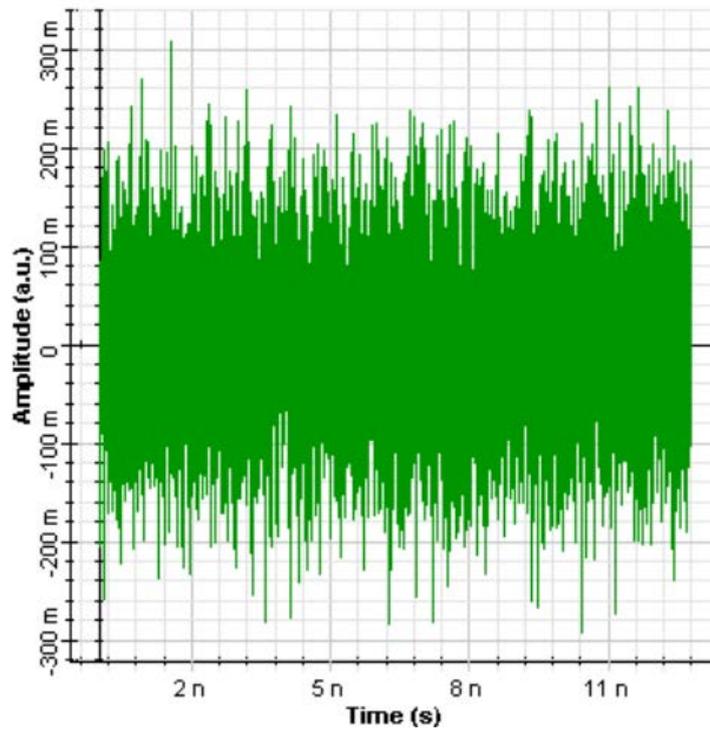


Figura 3. 8: Ruido presente en la señal a transmitir
Elaborado por: Autor

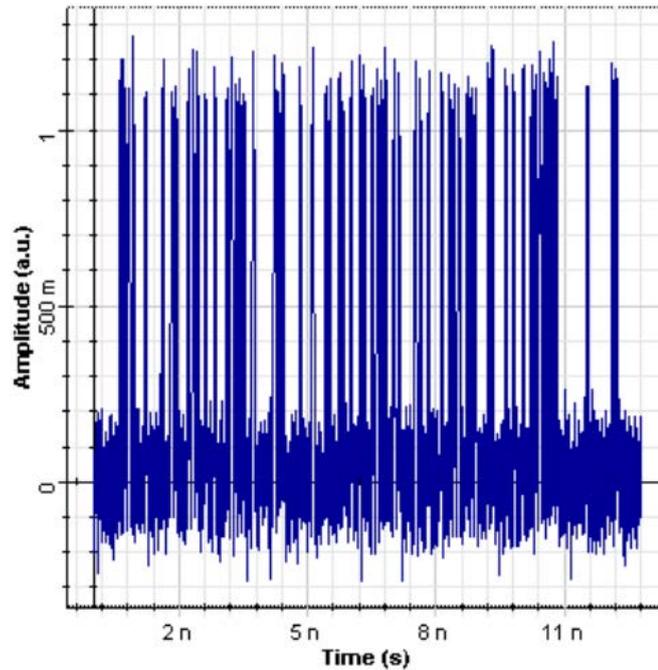


Figura 3. 9: Señal RZ con presencia de ruido
Elaborado por: Autor

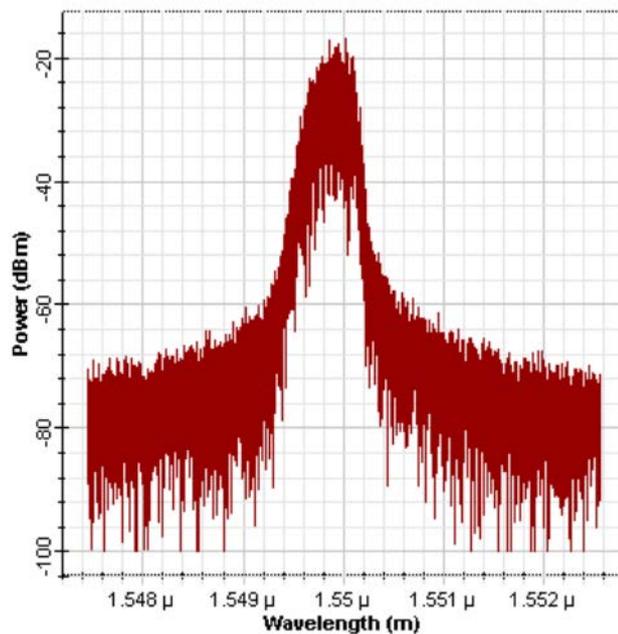


Figura 3. 10: Espectro de potencia de la señal transmitida
Elaborado por: Autor

Para la detección de las señales RZ se empleó un fotodetector APD; la señal que se obtiene a la salida del mismo es filtrada con un filtro pasabajo de Bessel, cuya frecuencia de corte está dada por el 75 % de la tasa de bit de la fuente de información. En las figuras 3.11 y 3.12 se pueden observar las

componentes espectrales del ruido presente en la señal detectada y en la señal filtrada, respectivamente; nótese que, como consecuencia del filtrado, la amplitud del ruido ha disminuido notablemente en las frecuencias superiores a 20 GHz. Finalmente, en la figura 3.13 se muestra la señal recuperada luego del proceso de filtrado.

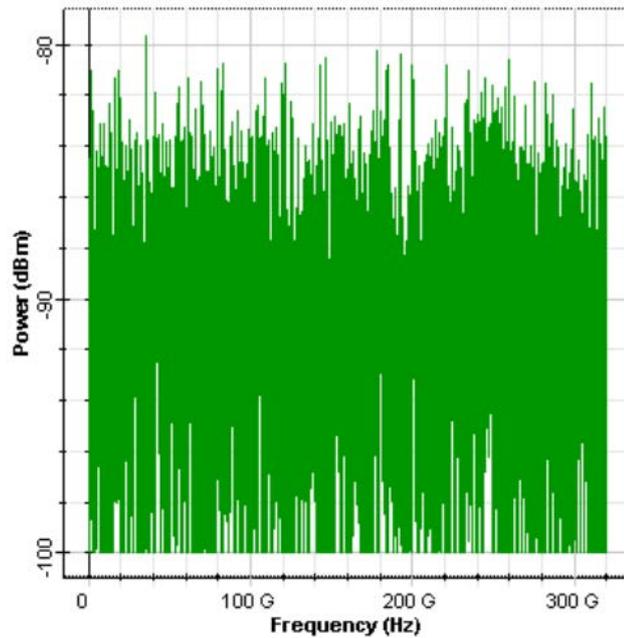


Figura 3. 11: Ruido presente en la señal detectada.
Elaborado por: Autor

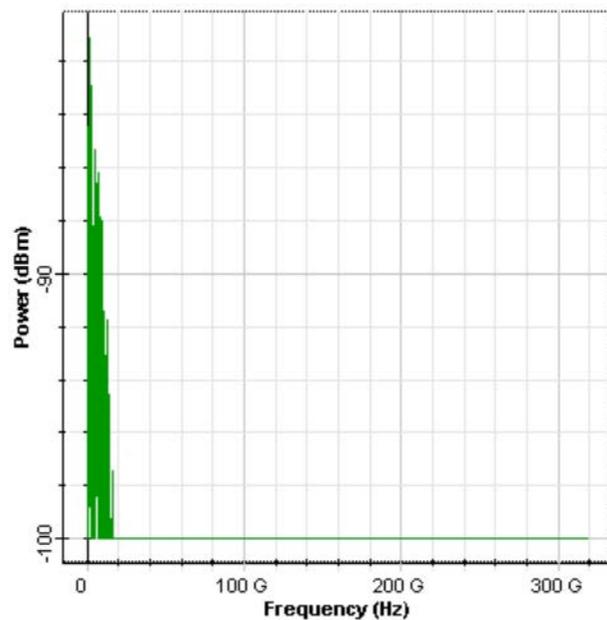


Figura 3. 12: Presencia de ruido luego del filtrado
Elaborado por: Autor

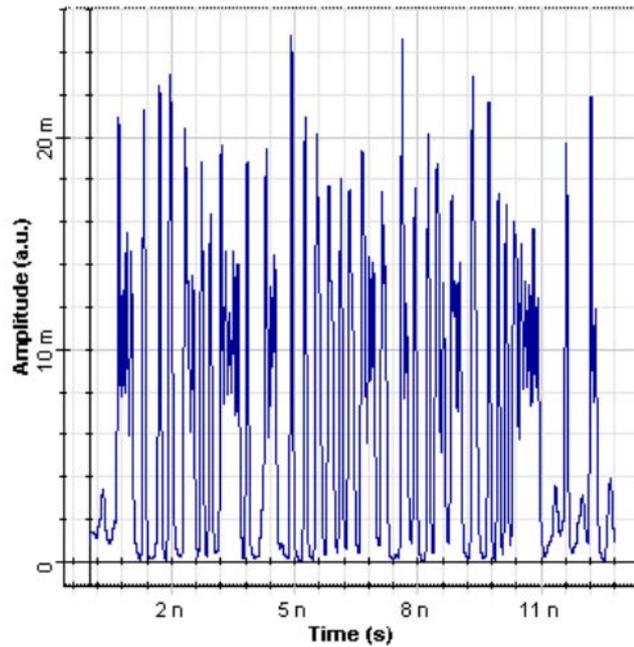


Figura 3. 13: Señal filtrada
Elaborado por: Autor

3.3. Enlace óptico con codificación y decodificación Manchester.

En la figura 3.14 se muestra el esquema empleado para la simulación de un enlace óptico utilizando codificación y decodificación de señales Manchester.

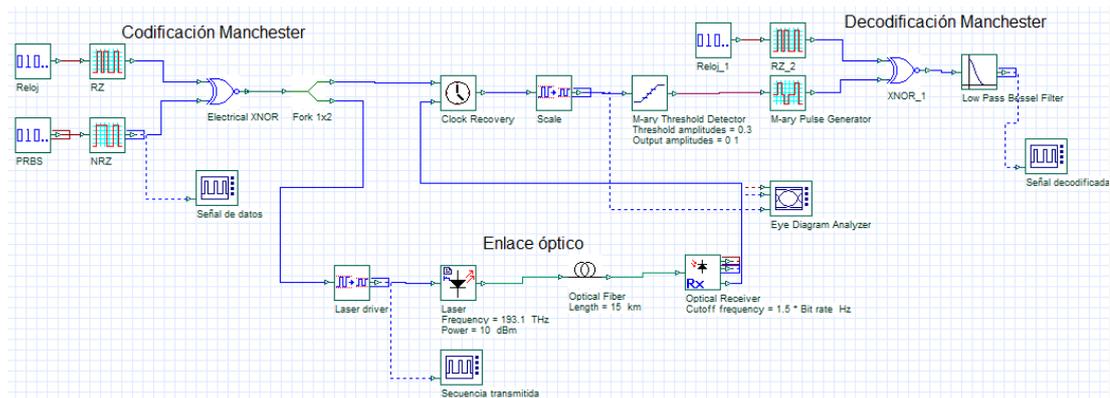


Figura 3. 14: Esquema de simulación empleado para la simulación del enlace óptico con codificación Manchester.

Elaborado por: Autor

Los datos digitales provienen de un generador pseudoaleatorio de bits y alimentan un generador de pulsos NRZ; el reloj del sistema alimenta un

generador de pulsos RZ. A las señales RZ y NRZ se les realiza la operación lógica XNOR con una compuerta eléctrica, obteniéndose la señal con codificación Manchester. En el osciloscopio “Señal de datos” se visualiza la forma de onda de la señal NRZ, tal como se presenta en la figura 3.15.

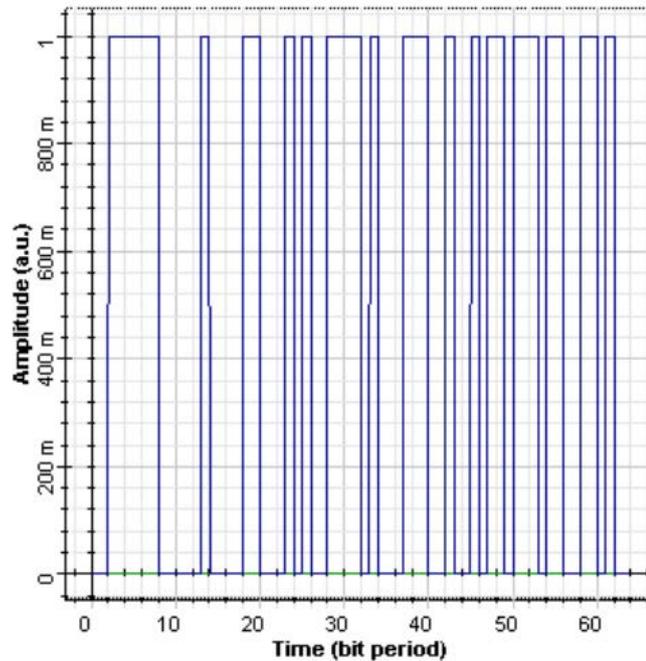


Figura 3. 15: Secuencia de datos NRZ.
Elaborado por: Autor

En la figura 3.16 se ilustra la secuencia de datos codificados transmitidos. Con la ayuda de la herramienta *Eye Diagram Analyzer* se graficó el diagrama de ojos de la señal obtenida luego de la conversión óptico-eléctrica, como se muestra en la figura 3.17. El máximo valor del factor de calidad Q, el mínimo valor de la BER y la altura del ojo, se muestran en las figuras 3.18, 3.19 y 3.20, respectivamente.

Como se puede observar en la figura 3.17 existe solo un ojo en el eje vertical del diagrama, esto corrobora que la señal recibida es una señal digital binaria. La apertura vertical del perímetro interno del ojo indica el máximo valor

de la interferencia inter-símbolo y la apertura horizontal está relacionada con el “*jitter*” y, por consiguiente, con la calidad en la necesaria sincronización que se establece en el receptor para poder realizar la detección de la señal óptica.

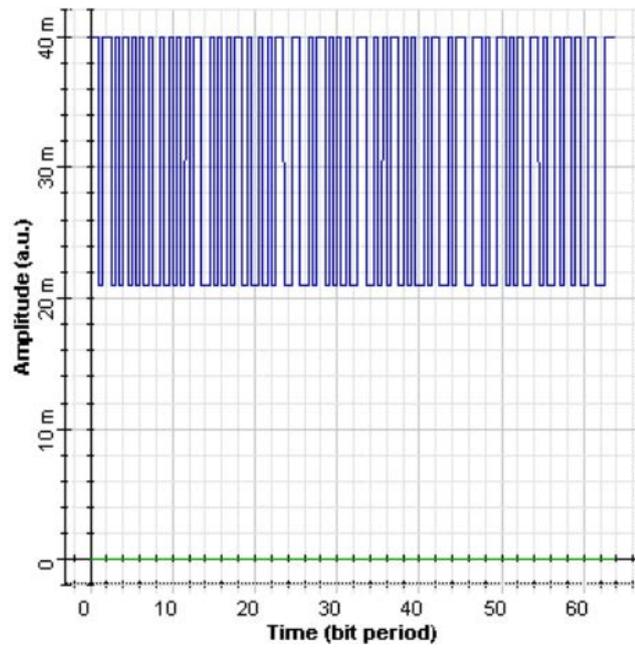


Figura 3. 16: Señal Manchester transmitida.
Elaborado por: Autor

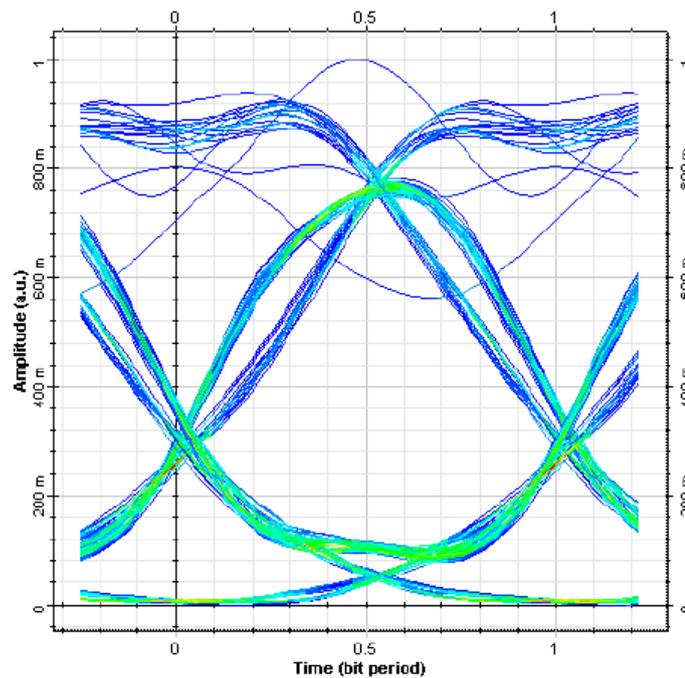


Figura 3. 17: Diagrama de ojos de la señal recibida.
Elaborado por: Autor

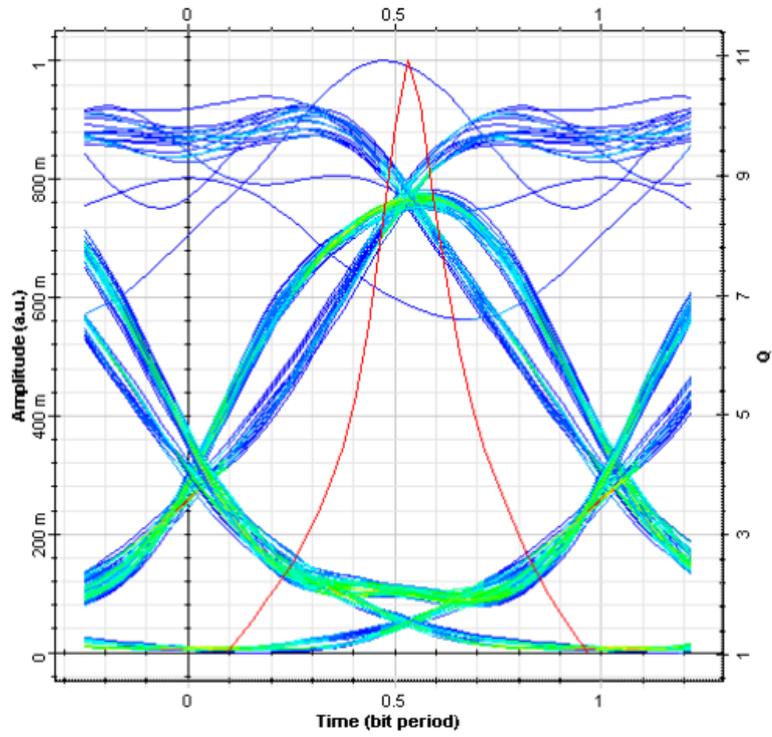


Figura 3. 18: Gráfica del factor Q.
Elaborado por: Autor

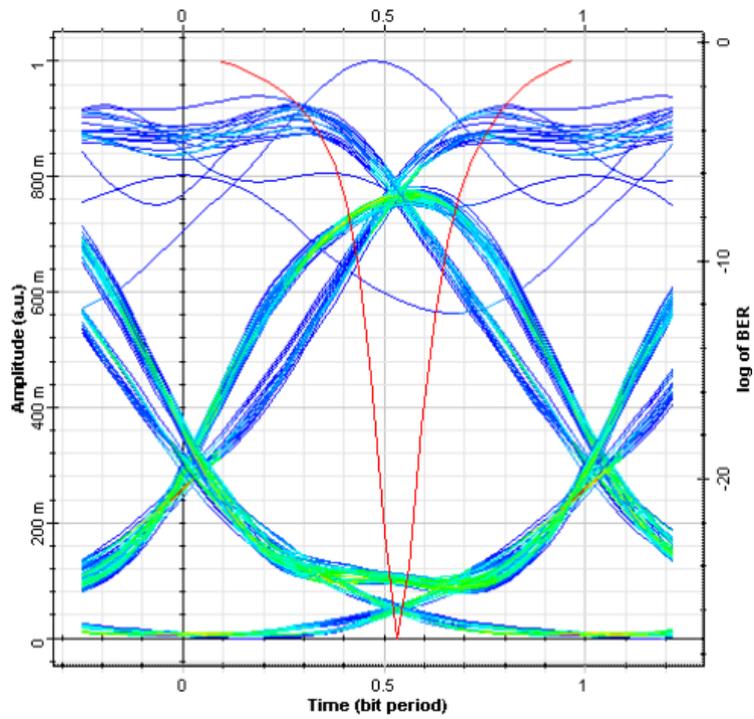


Figura 3. 19: Gráfica de la BER.
Elaborado por: Autor

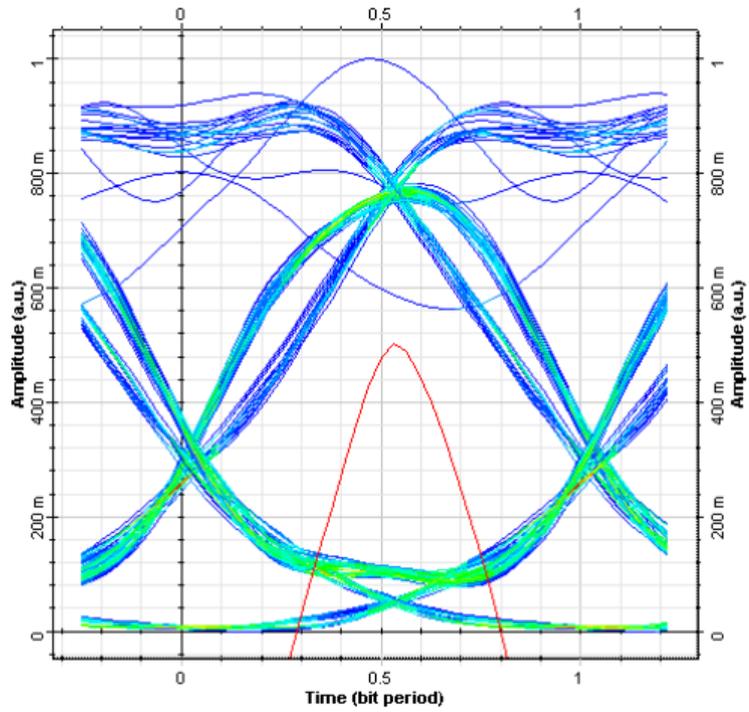


Figura 3. 20: Representación del Threshold.
Elaborado por: Autor

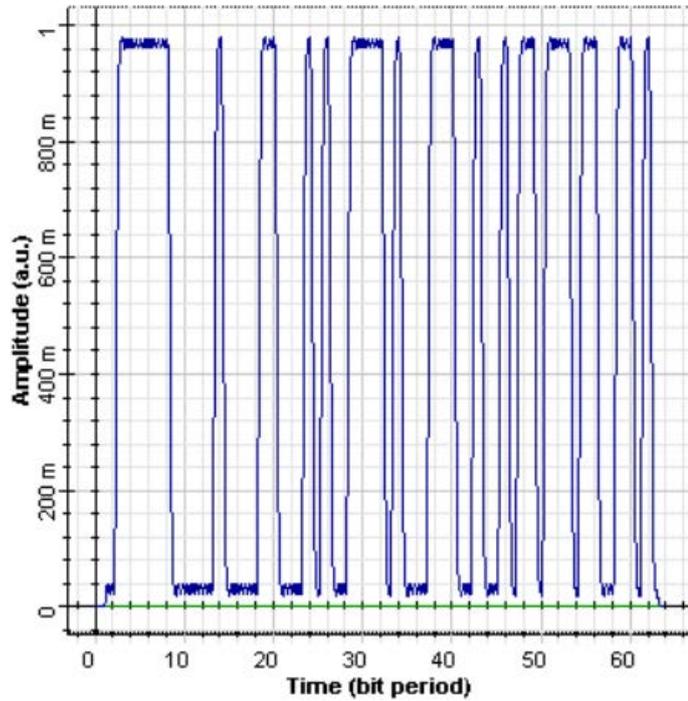


Figura 3. 21: Señal recuperada después de los procesos de decodificación y filtrado.
Elaborado por: Autor

Después del proceso de decodificación de la señal recibida, esta se pasa por un filtro pasabajo de Bessel, que tiene la función de limitar en banda. La frecuencia de corte establecida está dada por el 85 % de la tasa de bit de la fuente de información; la señal filtrada se presenta en la figura 3.21. Nótese que luego del proceso de filtrado se ha recuperado la misma secuencia de datos transmitida, lo cual se verifica comparándose las figuras 3.15 y 3.21.

3.4. Transmisión de señales retorno a cero empleando un modulador Mach – Zehnder.

El escenario de esta simulación se ilustra en la figura 3.22; como se puede observar la transmisión de señales con codificación RZ se implementa mediante el uso de un modulador del tipo Mach-Zehnder.

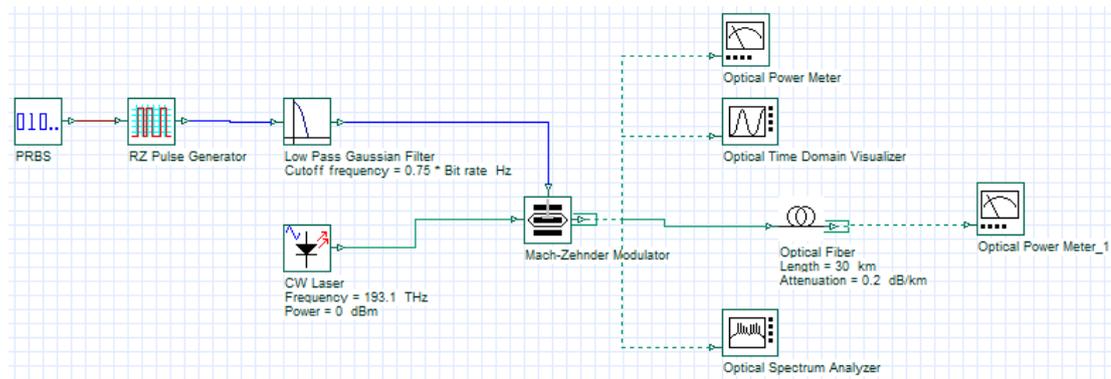


Figura 3. 22: Esquemático de la transmisión de señales RZ empleando un modulador Mach-Zehnder.

Elaborado por: Autor

El esquema de simulación empleado puede explicarse de la siguiente forma: la fuente de información (generador de secuencias aleatorias de bits) alimenta el generador de pulsos RZ, lográndose la codificación de la línea deseada. A continuación, se filtra la señal eléctrica obtenida y se conecta a la entrada de modulación del Mach-Zehnder. La fuente luminosa empleada

(diodo láser a 193.1 THz con 0 dBm) se acopla a la entrada de la portadora óptica de dicho modulador. La salida del modulador se conecta directamente a la fibra óptica. En las figuras 3.23 y 3.24 se muestran los análisis de la señal óptica en el dominio del tiempo y de la frecuencia, respectivamente.

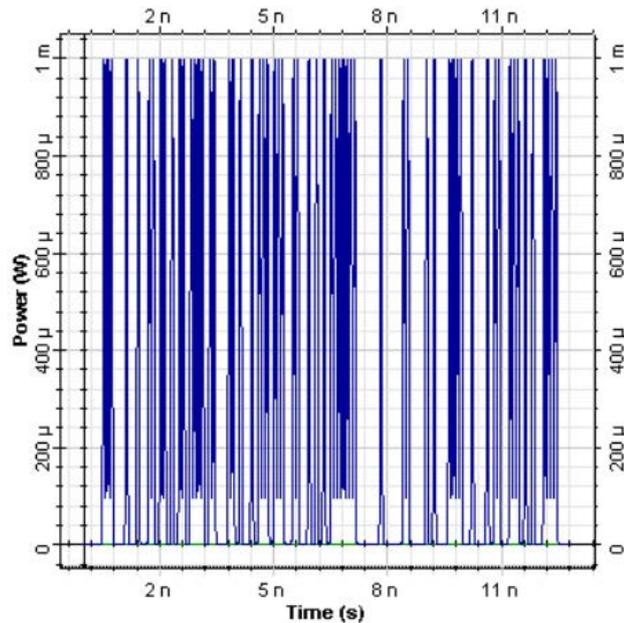


Figura 3. 23: Señal óptica con modulación Mach-Zehnder en el dominio del tiempo.
Elaborado por: Autor

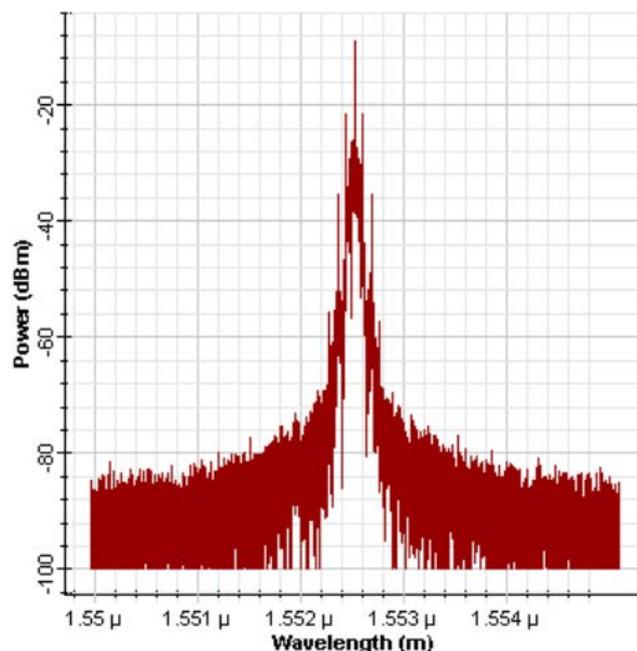


Figura 3. 24: Señal óptica con modulación Mach-Zehnder en el dominio de la frecuencia.
Elaborado por: Autor

Este enlace cubre una distancia de 30 km, la fibra óptica empleada tiene una constante de atenuación de 0,2 dB/km, por lo que la pérdida de potencia en la fibra es de 6 dB ($0,2\text{dB/km} \cdot 30\text{ km} = 6\text{dB}$). En la Figura 1 se muestran los resultados de las mediciones de potencia de las señales ópticas en ambos extremos del enlace. Con los valores obtenidos se comprueba el cálculo realizado de la pérdida de potencia en la fibra óptica.



Figura 1. Mediciones de la potencia óptica de las señales en los extremos del enlace.

Elaborado por: Autor

Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio de los fundamentos teóricos de los códigos de línea, particularmente en la transmisión óptica. Se pudo constatar que estos son de gran importancia en la transmisión digital, pues permiten mantener el sincronismo, controlar errores, reducir la potencia en bajas frecuencia y evitar la componente de corriente directa en dichos sistemas.

Con la ayuda del software OptiSystem 7.0 se realizaron simulaciones para el estudio de aplicaciones de códigos de línea en la transmisión óptica, lo que permitió demostrar de una manera más práctica el buen desempeño de las técnicas de codificación estudiadas para el caso óptico. Fueron utilizadas herramientas tales como el analizador de diagrama de ojos, medidor de potencia óptica, osciloscopio, visualizador óptico de la señal en el dominio del tiempo y analizadores del espectro de las señales eléctricas y ópticas.

Se diseñó un enlace óptico con transmisión de señales NRZ. También con transmisión de señales RZ en presencia de ruido. La simulación evidenció el efecto negativo del mismo en la transmisión de los datos. En el extremo receptor, mediante un proceso de filtrado, logró eliminarse notablemente componentes espectrales del ruido en las frecuencias superiores a 20 GHz.

Se simuló un enlace por fibra óptica para la transmisión de señales con codificación Manchester a partir de señales RZ y NRZ. En el extremo receptor

se comprobó la recuperación de la secuencia de datos emitida. Se simuló la transmisión de señales RZ empleando un modulador Mach-Zehnder en un enlace de 30 km de distancia. En el diseño se calculó la pérdida de potencia óptica en la fibra y se corroboró el valor obtenido con los resultados de la simulación.

Con los resultados obtenidos se crean las condiciones para el desempeño de trabajos investigativos que conduzcan a abundar en el estudio de los códigos de línea para las transmisiones ópticas y sus aplicaciones específicas.

Recomendaciones

Para propósitos de investigación de trabajos de titulación se recomiendan los siguientes temas de interés que están relacionados al uso de los esquemas de codificación de línea:

- ✓ Implementación y análisis de diferentes esquemas de codificación de línea utilizando Verilog sobre la plataforma Quartus II de Altera.
- ✓ Análisis de los esquemas de codificación de línea alternativa con atenuación fija para ser utilizados en comunicaciones de luz visible.
- ✓ Análisis comparativo de la tasa de error de bits de los esquemas de codificación de línea en redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gbps (NG-PON2).

Bibliografía

- Abhimanyu, M. (2003). Error Correcting Codes in Optical Communication Systems. School of Electrical Engineering. Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology.
- Carlson, A. B., Crilly, P. B., & Rutledge, J. C. (2002). *Communication Systems. An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication* (FOURTH EDI). McGraw-Hill.
- Cassiolato, M. (1994). Códigos de linha para sistemas ópticos de alta capacidade. Departamento de Comunicações. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas.
- Farrell, G. (2002). *Optical Communications Systems. Overview of Optical Transmitters and Receivers*. (Dublin Institute of Technology. School of Electronic and Communications Engineering., Ed.).
- Harry, J., & Dutton, R. (1988). *Understanding Optical Communications*. (First Edit). International Technical Support Organization.
- Honda, K., Kobayashi, T., Nishihara, S., Shimada, T., Terada, J., & Otaka, A. (2016). Low-frequency Pilot Tone Management for WDM-PON toward Future Mobile Fronthaul employing 64B/66B Line Coding - VDE Conference Publication (pp. 992–994). Presentado en 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communications, ECOC, Düsseldorf, Alemania: IEEE Xplore. Recuperado a partir de

<http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/document/7767790/?section=abstract>

Jain, S., Gupta, N., & Praveen, N. (2013). Review paper for optical receiver communication using coding scheme. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2(10), 6–10.

Kaur, S., & Kaur, S. (2016). Comparative Analysis between NRZ and RZ Coding of WDM System. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE)*, 5(6), 214–218.

Oh, J., Jeong, J., Jang, Y., Lee, J., & Yoon, D. (2017). Blind Classification of Line-Coding Schemes Based on Characteristic Features. *IEEE Access*, 5, 9562–9567. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2708739>

Proakis, J. G. (2001). *Digital Communications* (Four editi). McGraw-Hill.

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communication* (5th editio). McGraw-Hill.

Raatikainen, P. (2003). Transmission techniques and multiplexing hierarchies.

Serrano, J. (2003). *Fibras ópticas y redes de comunicación*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Singh, G., Gupta, A., Gupta, K., & Pandey, N. (2016). FPGA implementation of different NRZ line coding schemes (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IICIP.2016.7975311>

Sizun, H., Boisrobert, C., & Bouchet, O. (2006). *Free-Space Optics: Propagation and Communication*.

Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de computadoras* (Cuarta edi). Pearson Prentice Hall.

Vlajic, N. (2010). Digital Transmission of Digital Data: Line and Block Coding, Digital Transmission Modes.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Espantoso España, Samuel Alberto** con C.C: # 080212980-9 autor del trabajo de titulación: Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 8 de febrero de 2018

f. _____

Nombre: **Espantoso España, Samuel**

C.C: 080212980-9



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem		
AUTOR(ES)	Espantoso España, Samuel Alberto		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	8 de febrero de 2018	No. DE PÁGINAS:	64
ÁREAS TEMÁTICAS:	Teoría de la Comunicación, Comunicaciones Ópticas, Sistemas de Comunicaciones		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Transmisión, Óptica, Códigos de Línea, Modulación, Intensidad Luminosa, OptiSystem		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>En la actualidad, entre los sistemas de comunicaciones más relevantes, se encuentran los que emplean la fibra óptica como medio de transmisión, debido a sus grandes ventajas e importantes prestaciones. En estos sistemas resulta fundamental el uso de los códigos de línea, pues logran mantener el sincronismo, controlar errores, reducir la potencia en bajas frecuencias y evitar la componente de corriente directa. En el presente trabajo primeramente se analizan las generalidades los sistemas de comunicaciones digitales en banda base, para luego introducir los códigos de línea en la transmisión digital. Se abordan los fundamentos teóricos y técnicos de los mismos para la transmisión óptica. Además, se explican los bloques básicos que conforman un sistema de transmisión por fibra óptica. Se realizan simulaciones de varios enlaces ópticos utilizando diferentes codificaciones de línea mediante el software OptiSystem 7.0. Se comprobó el correcto funcionamiento de los mismos empleando varias herramientas de visualización como osciloscopios, analizador de espectro, diagrama de ojos, medidor de potencia, entre otros.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0999743476	E-mail: samuel_espantoso@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: mromeropaz@yahoo.com		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			