



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACION Y DISEÑO DIGITAL
CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de Integración Curricular
previa la obtención del Grado
Académico de Ingeniero en
Telemática.

Título del Proyecto de Investigación:

ECUALIZADOR DE CANAL PARA TRANSMISIÓN EN BANDAS DE FRECUENCIA
QUE UTILIZAN FIBRA ÓPTICA PARA HOGAR

Autor:

Walter Gustavo Cadme Zambrano

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **WALTER GUSTAVO CADME ZAMBRANO**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Lcy de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Walter Cadme

WALTER GUSTAVO CADME ZAMBRANO

C.I: 1752534543



CERTIFICACIÓN DE REDACCIÓN TÉCNICA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 59, literal b), del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, y conforme al procedimiento establecido en el literal a) del mismo artículo, se extiende el presente certificado al estudiante Walter Gustavo Cadme Zambrano, portador de la cédula de ciudadanía N.º 1752534543, perteneciente a la carrera de Telemática, por haber sometido a revisión su Trabajo de Integración Curricular titulado *"Ecuilizador De Canal Para Transmisión En Bandas De Frecuencia Que Utilizan Fibra Óptica Para Hogar"*, durante la sesión ordinaria del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular celebrada el día 02 de octubre de 2025.

Una vez realizada la evaluación correspondiente, este Tribunal **CERTIFICA** que dicho trabajo cumple con los estándares de redacción técnica y diseño experimental, conforme a lo establecido en la normativa vigente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Quevedo, 30 de septiembre de 2025.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Ángel Iván Torres Quijije, M. Sc



**CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE
COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO**

El suscrito, Ing. **Diego Fernando Intriago Rodriguez, M. Sc.**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado “**Ecualizador De Canal Para Transmisión En Bandas De Frecuencia Que Utilizan Fibra Óptica Para Hogar**” Presentado por el estudiante **Walter Gustavo Cadme Zambrano**, egresado de la Carrera de Telemática, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias De La Computación Y Diseño Digital, que se ha desarrollado de acuerdo al Artículo 57 y 59 del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 96% y similitud 4%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

CENTRO DE ANÁLISIS
ECONÓMICO

Trabajo de Titulación - Walter Cadme Zambrano

44
Taurus

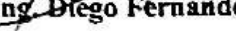
1% sustituidores entre
 comales
 0% entre las Fuentes
 mineralizadas
 5% minerales no recomendados
 (diferencia)

Tamaño del documento: Trabajo de titulación - Walter Cadme
Entero por pdf

ID del documento: A790C8E-76BDC7F-A4D8B4A06A3A26A2A
Tamaño del documento enrutado: 2.23 MB

Deposante: DIEGO FERNANDO RETRAGO RODRIGUEZ
Fecha de depósito: 12/11/2025
Tipo de carga: interface
Fecha de fin de análisis: 12/11/2025

Número de palabras: 12.818
Número de caracteres: 112.064


Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



INFORME FAVORABLE DEL DIRECTOR SOBRE LA CULMINACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

El suscrito, Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Walter Gustavo Cadme Zambrano**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **"Ecualizador De Canal Para Transmisión En Bandas De Frecuencia Que Utilizan Fibra Óptica Para Hogar"**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones establecidas para el efecto en los Arts. 52, 54, 57 y 59 del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular.



Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la sabiduría que me ha dado a lo largo de estos años y que le he pedido en cada una de mis oraciones, por guiarme en el cumplimiento del sueño más anhelado que ha sido culminar mis estudios universitarios, por darme la fuerza de mantenerme aún en los momentos difíciles a lo largo de la carrera.

Agradezco a todos quienes en el tiempo transcurrido me han inculcado valores maravillosos como la resiliencia, la paciencia, la perseverancia y cambiar mi mentalidad hacia una que no se rinda en las adversidades, a tener una enorme fe y convicción de que siempre me poder levantar de cada resbalón y caída que nos depare la vida.

Agradezco a mi familia entera parte importante en mi desarrollo profesional, por sus consejos, apoyo, motivación y sustento en esta etapa de mi vida, debido a que fue todo un reto para mí como para ellos también les agradezco el cariño y paciencia para conmigo y el cumplimiento de esta meta.

También le agradezco a todos mis educadores a lo largo de mi vida académica que me han compartido sus vivencias, experiencias y formas de ver la vida más allá de lo académico, que me han permitido afrontar muchas situaciones de la vida en las que me sentido desmotivado, agradezco al Ing. Diego Intriago Rodríguez por la dedicación y tiempo que ha brindado para que este trabajo concluya de la mejor manera, teniendo de mi parte mi total respeto y admiración por su paciencia y dedicación en el cumplimiento de este proyecto.

Finalmente agradezco a los amigos y compañeros que hice en mi formación académica que estuvieron conmigo en estos años como regalo de la vida, agradezco sus palabras, confianza e inspiración que motivó a no decaer en los momentos desafiantes, les expreso mi adeudamiento con ellos y su apoyo incondicional para alcanzar la plenitud significativa de mi formación, los llevo conmigo en mis recuerdos más bellos.

Walter Gustavo Cadme Zambrano

DEDICATORIA

Al igual que le agradezco a Dios se lo dedico a él por la vida y las oraciones respondidas en cada momento en que le pedí fuerza, voluntad y sabiduría para cumplir este anhelado sueño de ser profesional.

A mi madre Santa Isabel por su ternura a mi padre Rubén Vásquez por su sacrificio en todos los años de carrera que supieron brindarme consejos, ánimos, valentía y sabiduría en los momentos de flaqueza mental que me ayudaron a levantarme cada mañana en este arduo sendero del aprendizaje.

A mis hermanas Blanca y Jennifer por su atención, risas y cariño a lo largo de la vida, porque sin su forma de distraerme en cada momento de estrés no habría podido ser más llevadero el camino hacia esta meta, a mi hermano Jorge y mi sobrina Isabel que son las risas del hogar en que crecí.

A mis amigos que supieron demostrarme que, aunque nuestros caminos se separen siempre habrá un camino que nos una, a Carolay Banchón por su cariño y motivación en los momentos más difíciles para no rendirme, a todos los compañeros de clases que de alguna manera supieron ser de gran ayuda en situaciones que necesité una mano.

A mi abuela Rosario Llor por su amor incondicional desde el día que me conoció, por tenerme en sus oraciones, sus buenos deseos y ser la mejor madrina que alguien pude tener.

Walter Gustavo Cadme Zambrano

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular centra su desarrollo en el diseño, simulación y comparación de un ecualizador digital basado en la mitigación de los efectos que produce la dispersión en redes de fibra óptica hasta el hogar (FTTH), enfocándose en las bandas que se transmiten a través de estos canales como lo son la banda O (original), C (convencional) y la banda L (larga longitud), que son de las bandas más usadas y comerciales en las redes FTTH. El análisis del problema se basa en estudiar la dispersión en sus principales tipos como lo son la dispersión cromática, modal y por modo de polarización a través de los parámetros que conforman la dispersión como lo son la interferencia intersímbolo la relación señal ruido, la tasa de error de bit y los debidos coeficientes de dispersión, mediante un marco teórico basado la búsqueda documental y debidamente referenciado se especifican las normas técnicas nacionales e internacionales así mismo, se justifica la elección del algoritmo que ecualizará el canal como herramienta computacional capaz de optimizar el desempeño de las comunicaciones ópticas, en este estudio se encuentran tanto filtros como algoritmos como lo son el FIR adaptativo, DFE, LMS, RLS, OFDM y como principal algoritmo el MLSE del cual se nos arrojó un análisis comparativo en el que este algoritmo muestra una mayor influencia en los parámetros de dispersión al actuar más directamente en las métricas de fiabilidad mostro una mejorar del canal en un 90%. Mediante simulación en entornos controlados se desarrolló un modelo funcional que procese la información transmitida y permita someterla a condiciones que alteren las métricas de fiabilidad y hagan posibles los parámetros de dispersión para poder replicar el ecualizador basado en el MLSE ya diseñado y finalmente comparar las métricas y parámetros de desempeño. Los resultados muestran que aplicar el ecualizador basado en el algoritmo MLSE mejora significativamente la secuencia de una señal a través de un canal óptico, consolidándose como solución viable y efectiva que garantiza la calidad de servicio en entornos de FTTH

Palabras clave: *Fibra óptica, Dispersión, Ecualización digital, Calidad de transmisión, fiabilidad*

ABSTRACT

This curricular integration work focuses its development on the desing, simulation and comparison of a digital equalizer based on the mitigation of the effects produced by dispersion in fiber optic networks to the home (FTTH), focusing on the bands that are transmitted through these channels such as the O band (original), C (conventional) and the L band (long length), which are the most used and commercial bands in FTTH networks. The analysis of the problem is based on studying the dispersion such as intersymbol interference, signal to noise ratio, bit error rate and the due dispersion coefficient, through a theoretical framework based on documentary search and duly referenced, national and international technical standars are specified. Likewise, the choice of the algorithm that will equalize the channel is justified as a computational tool capable of optimizing the performance of optical communications, in this study there are both filters and algoritms such as adaptive FIR, DFE, LMS, RLAS, OFTM and as the main algorithm the MLSE of wich a comparative analysis was given to us in which this algorithm shows a greater influence on the dispersion parameters by acting more directly on the reliability metrics, it showed an functional model was developed that processes the transmitted information and allows it to be subjected to conditions that alter the reability metrics and enable the dispersion parameters to be replicated in order to replicate the alreedy designed MLSE based equalizer and finaly compare the metrics and performance parameters. The results show that applying the equalizer based on the MLSE algorithm significantly improves the sequence of a signal through and optical channel, consolidating itself as a viable and effective solution that guarantees the quality of service in FTTH environment.

Keywords: Optical fiber, Dispersion, Digital equalization, Transmission quality, Reliability

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ..	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
CÓDIGO DUBLIN	xviii
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO I.....	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1 Problema de Investigación.....	3
1.1.1 Planteamiento del Problema	3
1.1.2 Formulación del problema.....	3
1.1.3 Sistematización del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General:	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Justificación.....	5
CAPITULO II.....	6
FUNDAMENTACION TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1 Marco conceptual.....	7
2.1.1 <i>Redes de fibra óptica</i>	7
2.1.1.1 <i>Fibra óptica hasta el punto “x” (FTTx)</i>	7
2.1.1.2 <i>Fibra hasta el edificio (FTTB)</i>	7

2.1.1.3 Fibra hasta el nodo (FTTN)	8
2.1.1.4 Fiber to the home (FTTH)	9
2.1.2 Tipos de enlace según FTTH.....	9
2.1.2.1 Monomodo	9
2.1.2.2 Multimodo.....	10
2.1.3 La dispersión	10
2.1.3.1 Dispersión modal.....	10
2.1.3.2 Dispersión por modo de polarización	10
2.1.3.3 Dispersión cromática.....	11
2.1.3.4 Dispersión en fibra monomodo	11
2.1.3.4.1 Dispersión cromática en fibra monomodo	12
2.1.3.4.2 Dispersión modal en fibra monomodo	12
2.1.3.4.3 Dispersión por polarización en fibra monomodo.....	12
2.1.3.5 Dispersión cromática en fibra óptica multimodo	12
2.1.3.6 dispersión modal en la fibra óptica multimodo.....	13
2.1.3.7 Dispersión por polarización en fibra multimodo	13
2.1.4 Bandas de frecuencia en que se trasmite FTTH.....	14
2.1.4.1 Banda de frecuencia O (Original).....	14
2.1.4.2 Banda de frecuencia E (Extendida).....	14
2.1.4.3 Banda C (banda convencional)	14
2.1.4.4 Banda L (larga longitud)	14
2.1.4.5 Banda S (Banda de longitud de onda corta)	15
2.1.5 Ecualizadores	15
2.1.5.1 ecualizadores en FTTH.....	15
2.2 Marco referencial	16
2.3 Marco Legal.....	17

2.3.1 “Constitución de la República del Ecuador”	17
2.3.2 Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT)	17
2.3.3 Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones.....	17
2.3.4 Código de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación (Código Ingenios)	17
2.3.5 Norma técnica INEN-IEC 60793.	18
2.3.6 Políticas del Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL)	18
2.3.7 Normas de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL)	18
CAPÍTULO III	19
3.1 Localización.....	20
3.2 Metodología	20
3.2.1 Tipo de investigación	20
3.2.1.1 Investigación Documental	20
3.2.1.2 Investigación Exploratorio	20
3.2.2 Métodos de investigación.....	21
3.2.2.1 Método mixto	21
3.2.3 Fuentes de información.....	21
3.2.3.1 Primaria	21
3.2.3.2 Secundaria	21
3.2.4 Diseño de la investigación.....	21
3.2.4.1 Descriptivo.....	21
3.2.5 Fases de la Investigación.....	21
3.2.5.1 Etapa 1: exploración de la información.....	21
3.2.5.2 Etapa 2: Conceptualización de las bandas que transmiten en FTTH bajo los efectos de la dispersión	22

3.2.5.3 Etapa 3: Identificación del tipo de dispersión	22
3.2.5.4 Etapa 4: Diseño de un ecualizador	22
3.2.5.5 Etapa 5: Comprobar el ecualizador	22
CAPITULO IV	23
4.1 Tipos de algoritmos usados en ecualizadores	24
4.1.1 FIR adaptativo	24
4.1.2 Decision Feedback Equalizer (DFE).....	26
4.1.3 LMS (Least Mean Squares).....	27
4.1.4 Recursive Least Squares (RLS).....	29
4.1.5 MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation).....	31
4.1.6 Ecualizador en frecuencia para sistemas (OFDM).....	32
4.2 Selección y diseño del ecualizador	38
4.2.1 Sintaxis de las funciones del diseño del ecualizador.....	40
4.2.2 Desarrollo del diseño del ecualizador basado en procesamiento digital de señales	41
4.2.2.1 Variables que intervienen en el diseño del ecualizador	42
4.2.2.2 Estructura y funcionamiento de cada sección del ecualizador.	42
4.2.2.3 Diagrama de bloques de la secuencia del ecualizador MLSE	45
4.3 Desarrollo de un escenario que replica un entorno FTTH.....	47
4.3.1 Simulaciones en el entorno de OptiSystem de las bandas O, L y C bajo la incidencia de la dispersión.	49
4.3.3 Simulaciones en el entorno de OptiSystem de las bandas O, L y C al aplicarles el ecualizador de canal MLS.....	58
CAPÍTULO V.....	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1 Conclusiones.....	68
5.2 Recomendaciones	69

CAPÍTULO VI	70
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de red FTTx.....	7
Figura 2. Arquitectura de red FTTB.....	8
Figura 3. Fibra hasta el nodo FTTN.....	8
Figura 4. Arquitectura de red FTTH.....	9
Figura 5. Dispersión modal.....	10
Figura 6. Dispersión por polarización.....	11
Figura 7. Dispersión cromática.....	11
Figura 8. Dispersión cromática en la fibra multimodo.....	13
Figura 9. Dispersión cromática en la fibra multimodo.....	15
Figura 10. Localización de la universidad técnica estatal de Quevedo.....	20
Figura 11. Sintaxis del algoritmo FIR adaptativo.....	25
Figura 12. Diagrama del filtro FIR.....	25
Figura 13. Sintaxis básica del algoritmo DFE.....	27
Figura 14. Diagrama en bloques del filtro DFE.....	27
Figura 15. Sintaxis básica del algoritmo LMS.....	28
Figura 16. Diagrama en bloques del filtro LMS.....	29
Figura 17. Diagrama en bloques del filtro RLS.....	31
Figura 18. Sintaxis básica del algoritmo MLSE.....	32
Figura 19. Diagrama de bloques del algoritmo MLSE.....	32
Figura 20. Sintaxis básica del algoritmo OFDM.....	34
Figura 21. Diagrama de bloque del algoritmo OFDM.....	34
Figura 22. Gráfico de pastel del porcentaje de incidencia de los algoritmos en un canal dispersivo.....	37
Figura 23. Gráfico de barras del nivel de incidencia de los filtros en cada tipo de dispersión.....	37
Figura 24. Diagrama de flujo del ecualizador.....	39
Figura 25. Selección de parámetros según la banda.....	40
Figura 26. Generar y modular datos QPSK.....	40
Figura 27. Enlace óptico al que se le añade dispersión.....	41
Figura 28. Inicialización de parámetros del sistema.....	42
Figura 29. Generación y modulación de datos.....	43
Figura 30. Modelado del canal óptico.....	43

Figura 31. Adición de ruido.....	43
Figura 32. Ecualización MLSE.....	44
Figura 33. Cálculo de BER.....	44
Figura 34. Visualización de resultados.....	45
Figura 35. Esquema de bloques del diseño del ecualizador.....	46
Figura 36. Diagrama pastel del porcentaje de cada algoritmo en un canal.....	46
Figura 37. Entorno FTTH en OptiSystem.....	48
Figura 38. Señal de entrada visualizada en el dominio del tiempo.....	50
Figura 39. Señal analoga con dispersión en la red.....	50
Ilustración 40. Diagrama de ojo en la banda O con dispersión.....	51
Figura 41. Señal de entrada en el dominio del tiempo en la banda C.....	52
Figura 42. Señal analoga con dispersión en la banda C.....	53
Ilustración 43. Diagrama del ojo con dispersión de la banda C.....	53
Figura 44. Optical Time Domain Visualizer en la banda L.....	54
Figura 45. Señal analógica con dispersión obtenido de la banda L.....	55
Figura 46. Eye diagram obtenido de la banda L con dispersión.....	56
Figura 47. Acoplamiento del archivo (.m) del ecualizador diseñado en MATLAB.....	57
Figura 48. Datos del ecualizador cargan en la red simulada.....	58
Figura 49. Diagrama de ojo visual de la banda c al simularla con el ecualizador.....	59
Figura 50. Espectro óptico de la banda O al ser simulada con el ecualizador.....	60
Figura 51. Espectro óptico de la banda O al ser simulada con el ecualizador.....	61
Figura 52. Eye diagram obtenido de la banda o después de aplicar el ecualizador.....	62
Figura 53. Eye diagram obtenido de la banda c después de ser ecualizada.....	63
Figura 54. Eye diagram de la banda C después de ser ecualizada.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo FIR	24
Tabla 2. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo DFE	26
Tabla 3. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo LMS	28
Tabla 4. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo RLS	30
Tabla 5. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo MLSE	31
Tabla 6. Métricas de dispersión que inciden en el algoritmo OFDM	33
Tabla 7. Impacto de algoritmos de ecualización en métricas del PDS	36
Tabla 8. Potencia, frecuencia y fase inicial para comenzar la simulación.....	49
Tabla 9. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la banda O con dispersión.	52
Tabla 10. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la banda C con dispersión.....	54
Tabla 11. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la banda L con dispersión.	56
Tabla 12. Comparación de las métricas antes y después de aplicar el ecualizador.....	57
Tabla 13. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la banda O con el ecualizador....	60
Tabla 14. Métricas obtenidas del diagrama BER de la banda L con dispersión.	61
Tabla 15. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la banda L con dispersión.	62
Tabla 16. Métricas obtenidas del diagrama de BER de la banda L con dispersión.	63
Tabla 17. Métricas obtenidas del diagrama de ojo de la C con el ecualizador.	64
Tabla 18. Métricas de la banda C después de aplicar el ecualizador.	65
Tabla 19. Observación antes y después del diagrama de ojo.....	65

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Ecuadorizador de canal para transmisión en bandas de frecuencia que utilizan fibra para hogar.				
Autora:	Walter Gustavo Cadme Zambrano				
Palabras claves:	Fibra óptica	Dispersión	Ecuadorización digital	Calidad de transmisión	Fiabilidad.
Fecha de publicación:	Noviembre, 2025				
Editorial:	Quevedo- UTEQ, 2025				
Resumen:	La presente tesis se centra en el diseño, simulación y evaluación de un ecualizador digital orientado a mitigar los efectos de la dispersión en redes ópticas FTTH, con énfasis en las bandas O, C y L, que son ampliamente utilizadas en telecomunicaciones modernas. Se parte del análisis del problema de la dispersión cromática, la dispersión por modo de polarización y la interferencia intersímbolo, fenómenos que degradan parámetros clave como la relación señal-ruido (SNR), la tasa de error de bits (BER) y la confiabilidad del sistema. A través de un marco referencial sustentado en literatura especializada y normativas técnicas nacionales e internacionales, se justifica la elección de la ecualización digital como herramienta robusta para optimizar el desempeño de las transmisiones ópticas. Entre los algoritmos estudiados se encuentran FIR adaptativo, DFE, LMS, RLS, OFDM y, de manera principal, el MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation), cuyo análisis comparativo mostró un desempeño sobresaliente en la reducción de errores, con una influencia superior al 90 % sobre la mejora del BER. Mediante simulaciones en MATLAB y OptiSystem, se desarrolló un modelo funcional que permite procesar la señal transmitida, someterla a condiciones de ruido y dispersión, aplicar ecualización y finalmente calcular métricas de desempeño. Los resultados evidencian que la implementación del MLSE mejora significativamente la recuperación de la secuencia original, consolidándose como una solución viable y efectiva para garantizar la calidad del servicio en entornos FTTH, alineada con los requerimientos de conectividad, innovación tecnológica y sostenibilidad impulsados por la realidad ecuatoriana y global.				
Abstract:	This thesis focuses on the design, simulation, and evaluation of a digital equalizer aimed at mitigating the effects of dispersion in FTTH optical networks, with emphasis on the O, C, and L bands, which are widely used in modern telecommunications. It begins with the analysis of the problems of chromatic dispersion, polarization mode dispersion, and intersymbol interference, phenomena that degrade key parameters such as the signal-to-noise ratio (SNR), the bit error rate (BER), and system reliability. Through a theoretical framework supported by specialized literature and national and international technical standards, the choice of digital equalization is justified as a robust tool to optimize the performance of optical transmissions. Among the studied algorithms are adaptive FIR, DFE, LMS, RLS, OFDM, and, most importantly, MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation), whose comparative analysis demonstrated outstanding performance in error reduction, with an influence greater than 90% on BER improvement. Through simulations in MATLAB and OptiSystem, a functional model was developed to process the transmitted signal, subject it to noise and dispersion conditions, apply equalization, and finally calculate performance metrics. The results show that the implementation of MLSE significantly improves the recovery of the original sequence, consolidating itself as a viable and effective solution to ensure service quality in FTTH environments, aligned with the requirements of connectivity, technological innovation, and sustainability driven by the Ecuadorian and global context.				
Descripción:	95 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162				
URI:					

INTRODUCCION

En la era de la información, el acelerado crecimiento de la demanda de servicios en telecomunicaciones de alta velocidad ha impulsado el diseño y creación de tecnologías que permitan la transmisión de datos. Es así como las redes ópticas han desplazado progresivamente las redes basadas en cobre, debido a su gran capacidad para manejar anchos de banda superiores y por lo tanto contar con mayor alcance y menos susceptibilidad a interferencias del entorno. Entre estas tecnologías destaca la fibra óptica que constituye la base de las redes modernas debido a que presenta alta eficiencia en la transmisión de datos a mayores distancias en menos tiempo [1].

En este contexto una de las tecnologías en redes más implementadas son las de fibra hasta el hogar FTTH (fiber to the home) por sus siglas en inglés, que permite que la fibra óptica llegue hasta la residencia del usuario final. Esta arquitectura ha sido diseñada para superar las limitaciones de las redes tradicionales de cobre, permitiendo que la velocidad de transmisión sea superior y tenga mayor estabilidad, sin embargo a pesar de estas ventajas sobre las redes de cobre las redes FTTH no están exentas a los desafíos técnicos que afectan la calidad de transmisión entre estos se encuentra la dispersión, fenómeno inherente a la propagación de la señal óptica en la fibra, que puede generar retardo, afectaciones en el ancho de banda y presentar coeficientes de dispersión [2].

La dispersión en fibra óptica ocurre cuando los pulsos de luz que transportan la información se ensanchan durante la transmisión, debido a que distintas partes del pulso viajan a velocidades diferentes. Esto provoca que, al llegar al receptor, la señal pueda distorsionarse o solaparse con otros pulsos. Existen tres tipos principales de dispersión, la modal propia de fibra multimodo, la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización, originada por imperfecciones en la fibra [3].

Este proyecto aborda el análisis de estos tipos de dispersión, con el fin de proponer una solución digital que permita mitigar sus efectos. Se plantea el diseño y simulación de un ecualizador digital, orientado a recuperar la forma original de la señal óptica y mejorar así las métricas de fiabilidad, para esto se aplican algoritmos de procesamiento digital de señales, los cuales permiten interpretar los resultados de la simulación y evaluar el grado de compensación logrado en cada banda de frecuencia [4].

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Planteamiento del Problema

Un sistema de comunicación óptico guiado no garantiza una total fiabilidad teniendo en cuenta que este tipo de comunicación, al igual que todos presenta condiciones de retardo, distorsión, atenuación y dispersión de la señal, esto condiciona a los participantes de un sistema de comunicación digital acceder plenamente a los estándares de fiabilidad que a su vez se derivan en problemas de calidad de servicio en las comunicaciones. Entre las diversas condiciones de calidad de servicio destaca la dispersión de la señal y sus diversos tipos presentes en la fibra óptica [5].

La dispersión cromática y las dispersiones por polarización se pueden describir como fenómenos en los sistemas de comunicación, el tipo de dispersión cromática provoca que diferentes longitudes de onda de luz que viajan a diferentes velocidades dentro de la fibra óptica lleguen al destino más rápidas unas que otras mientras que la dispersión por polarización provoca que la onda de luz se vea afectada por los campos eléctricos, magnéticos y asimetrías en la fibra, estos tipos de dispersión se encuentran presentes únicamente en transmisiones ópticas afectando las bandas específicas que transmiten en FTTH [6].

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo puede un ecualizador de canal, utilizando técnicas de procesamiento digital de señales, contribuir a compensar la dispersión de la señal y mejorar la calidad del servicio en las bandas de frecuencia empleadas en sistemas FTTH?

1.1.3 Sistematización del problema

¿Qué técnicas de ecualización y parámetros de dispersión permiten establecer alternativas efectivas para mitigar la degradación de la señal y mejorar la calidad del servicio en sistemas de comunicación?

¿Cuáles son las herramientas y metodologías de procesamiento digital de señales más viables para diseñar un ecualizador eficaz que compense la dispersión en las bandas de frecuencia utilizadas en redes FTTH?

¿Cómo se pueden establecer diferencias significativas en las métricas de dispersión al aplicar un ecualizador en distintas bandas de transmisión utilizadas en sistemas FTTH?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

Simular un ecualizador de canal mediante algoritmos de procesamiento digital de señales mejorando la transmisión en bandas de frecuencia utilizadas en sistemas de fibra hasta el hogar (FTTH).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar algoritmos implementados en ecualizadores, a través de la literatura previa identificando su incidencia en las métricas y parámetros de dispersión.
- Diseñar un ecualizador basado en algoritmos de procesamiento digital de señales en bandas específicas utilizadas en fibra hasta el hogar.
- Comparar métricas y parámetros en escenarios simulados con ecualizador y sin ecualizador observando diferencias en la compensación en términos de dispersión de la señal.

1.3 Justificación

Las comunicaciones ópticas en la actualidad son una herramienta de gran importancia para los participantes de un sistema de comunicaciones digital, hace posible la transmisión de información de forma fiable a través de los canales, con el tiempo su uso extendiendo por todos los segmentos de la red llegando hasta el hogar a través de la red de acceso a servicios, conocidos como fibra hasta el hogar (FTTH), siendo en esta parte más importante garantizar la velocidad y amplio alcance convirtiéndola en una tecnología innovadora respecto a las redes tradicionales de cobre [7].

La dispersión presente en los sistemas de comunicación han llevado a que los fenómenos lineales como la atenuación y la dispersión degraden significativamente la información que es enviada, lo que se traduce como poca fiabilidad del sistema, la dispersión cromática que son las diferentes ondas de una misma señal que viaja a diferentes velocidades causando retardos en la transmisión mientras que la dispersión por polarización es la diferencia en los tiempos de propagación, en las bandas de frecuencia en que trasmite FTTH los problemas causados por la dispersión son más evidentes esto debido a que la señal es puesta a prueba por los usuarios finales de este servicio [8].

Para mitigar este efecto de retardo en los sistemas de comunicación se han desarrollado varias estrategias entre ellas los ecualizadores digitales que cuentan con la optimización del criterio de minimizar el margen de error en la transferencia mitigando la interferencia producida por la dispersión cromática, modal o por modo de polarización por medio de procesamiento digital de señales visto como herramientas computacionales en el área de las telecomunicaciones [9].

CAPITULO II
FUNDAMENTACION TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Redes de fibra óptica

2.1.1.1 Fibra óptica hasta el punto “x” (FTTx)

En termino general FTTx es una red que agrupa diversas arquitecturas de acceso basadas en fibra óptica en la que “x” representa el punto específico hasta el cual se pretende hacer llegar la fibra. Estas arquitecturas incluyen tecnologías como FTTH (hasta el hogar), FTTB (hasta el edificio) y FTTN (hasta el nodo) siendo estas las más comerciales y por lo tanto las más usadas, cuyo objetivo en común es llevar la fibra óptica lo más cerca posible del usuario final, ofreciendo así mayor velocidad y estabilidad de transmisión [10].

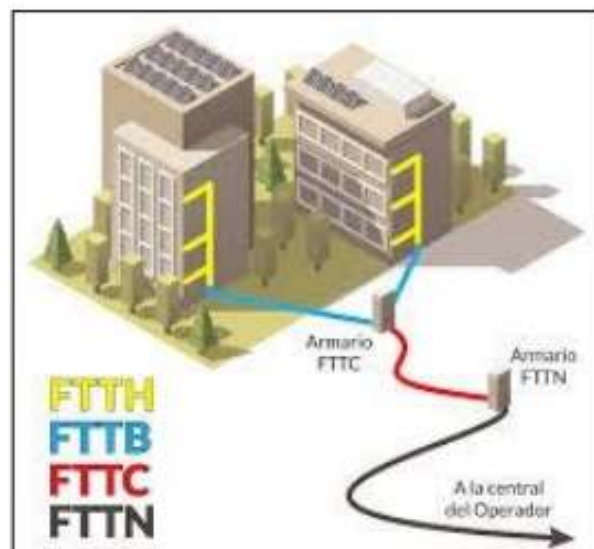


Figura 1. Arquitectura de red FTTx.

Fuente: prored

2.1.1.2 Fibra hasta el edificio (FTTB)

Es una arquitectura de red óptica en la cual la fibra óptica llega hasta el interior o el exterior del edificio en el que se encuentran múltiples usuarios, como oficinas, departamentos, locales comerciales y salas de esparcimiento. Desde ese punto, la conexión hacia cada unidad final mayormente se termina mediante cable de cobre sea este coaxial o ethernet. Esta configuración permite aprovechar gran parte de los beneficios de la fibra óptica como alta velocidad y estabilidad teniendo en cuenta que la calidad del servicio puede depender del tramo de red al que está conectado el usuario final del edificio [11].

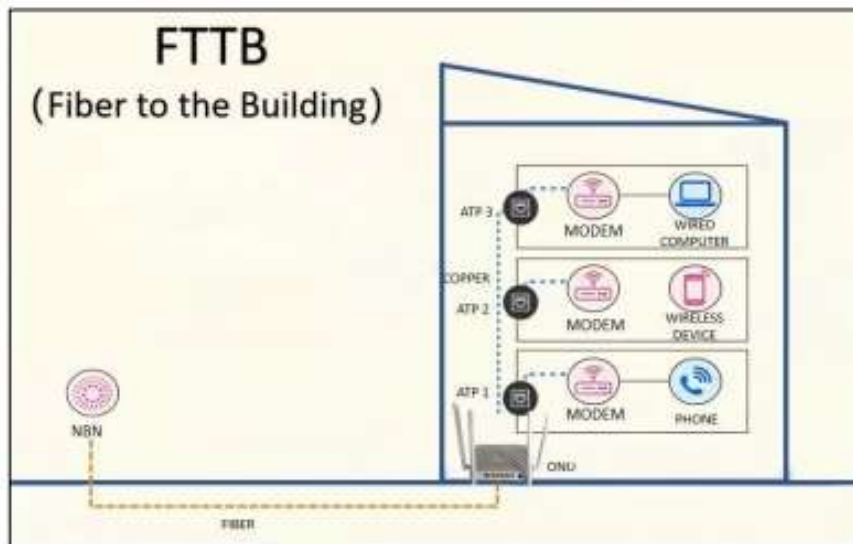


Figura 2. Arquitectura de red FTTB.

Fuente: Baudcom

2.1.1.3 Fibra hasta el nodo (FTTN)

FTTN es una arquitectura de red en la que la fibra óptica llega hasta el nodo o gabinete de distribución ubicado en la vía pública, generalmente a unos cientos de metros del usuario final. Desde el nodo, la conexión hacia los hogares o empresas se completa mediante tecnologías de cobre, como coaxial o ethernet, aunque no ofrece la misma calidad que TFFH, FTTN permite tener una mayor cobertura con menor costo en implementación de fibra, demostrando una mejora notable en comparación con las redes basadas en cobre [12].

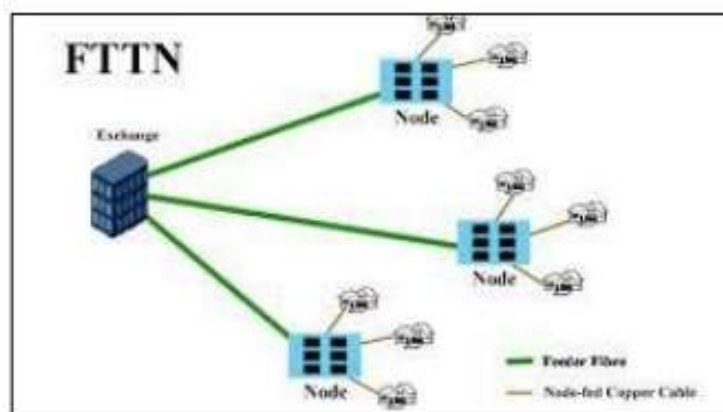


Figura 3. Fibra hasta el nodo FTTN.

Fuente: Linked in

2.1.1.4 Fiber to the home (FTTH)

FTTH es una arquitectura de red óptica en la que la fibra llega directamente hasta el Domicilio del usuario final, sin tramos intermedios de cobre u otros medios. Esta configuración garantiza el máximo rendimiento en términos de velocidad, estabilidad y capacidad de transmisión de datos, siendo ideal para aplicaciones que demandan alto ancho de banda como videoconferencia, teletrabajo y servicios en la nube. FTTH es considerada la solución más avanzada, eficaz y fiable entre las diversas arquitecturas de redes FTTx [13].

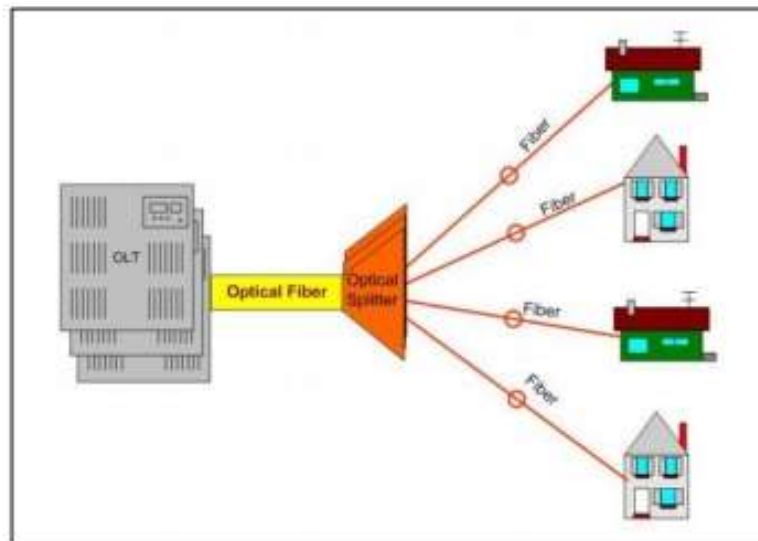


Figura 4. Arquitectura de red FTTH.

Fuente: TARLUZ

En redes de fibra óptica existen tres tipos principales de dispersión, la modal, la cromática y la dispersión por polarización,

2.1.2 Tipos de enlace según FTTH

2.1.2.1 Monomodo

El tipo de fibra monomodo está diseñada para transmitir solo un modo de luz a través del núcleo extremadamente fino de la fibra. Esta característica permite que la señal viaje a largas distancias con muy baja atenuación y mínima dispersión lo que la convierte en un modo ideal para aplicaciones de alta velocidad y enlaces de larga distancia en telecomunicaciones [14].

2.1.2.2 Multimodo

La fibra multimodo es un tipo de fibra óptica con un núcleo mayormente ancho entre 50 o 62,5 micras de metro que permite la propagación simultanea de varios modos de luz, esta característica la hace adecuada para distancias cortas, ya que todos los modos de luz viajan a distintas velocidades, lo que provoca dispersión modal y limita el enlace. Es más usada en redes locales, centros de datos y conexiones dentro de edificios [15].

2.1.3 La dispersión

2.1.3.1 Dispersión modal

La dispersión modal es un fenómeno que provoca ensanchamiento de pulsos e interferencia entre los símbolos, que reduce la capacidad de transmitir de la fibra. Esto ocurre porque la transmisión de múltiples modos, que experimentan diferentes retardos, siendo la dispersión modal un eje importante en cuanto a la pérdida de velocidad en fibra, debido al solapamiento de los símbolos conocida como interferencia Inter símbolo, lo que produce que los límites entre los símbolos no estén claramente definidos, esto lleva a errores en la interpretación de los datos recibidos [16].

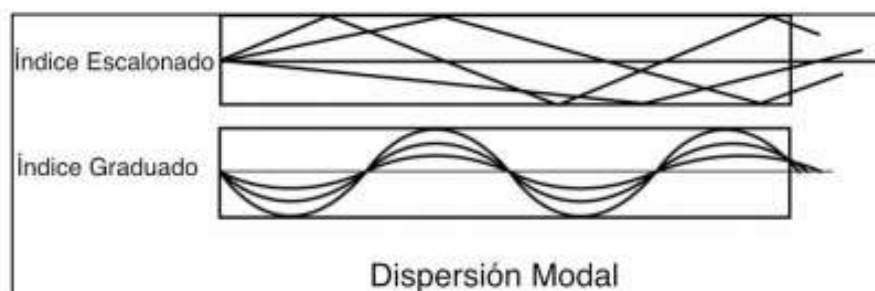


Figura 5. Dispersión modal.

Fuente: FOA.org

2.1.3.2 Dispersión por modo de polarización

La dispersión por modo de polarización hace referencia al fenómeno en el que los dos modos de polarización ortogonal de la luz que viajan en la fibra se propagan a diferentes velocidades, debido a que en la práctica, la fibra no es perfecta debido a pequeñas imperfecciones en la fabricación de esta o, a tensiones mecánicas aplicadas durante su instalación o uso lo que produce una dispersión del pulso óptico a lo largo del tiempo, las causas de la dispersión por polarización son impredecibles y difíciles de explicar [17].

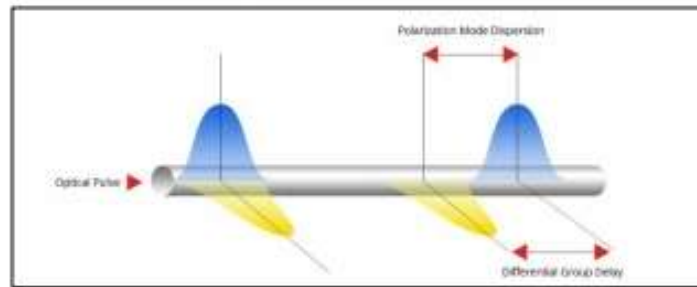


Figura 6. *Dispersión por polarización.*

Fuente: HTFUTURE

2.1.3.3 Dispersión cromática

Se establece que la dispersión cromática es el fenómeno en el que las diferentes longitudes de ondas de luz viajan a distintas velocidades dentro del núcleo de la fibra, debido a variaciones en el índice de refracción. Esto provoca que los pulsos ópticos se ensanchen al propagarse, causando solapamiento entre los bits y aumento de la tasa de error (BER), su efecto limita tanto la distancia de transmisión como el ancho de banda del sistema. Se mide en ps/(nm.km) y combina la dispersión del material la de la guía de onda [18].

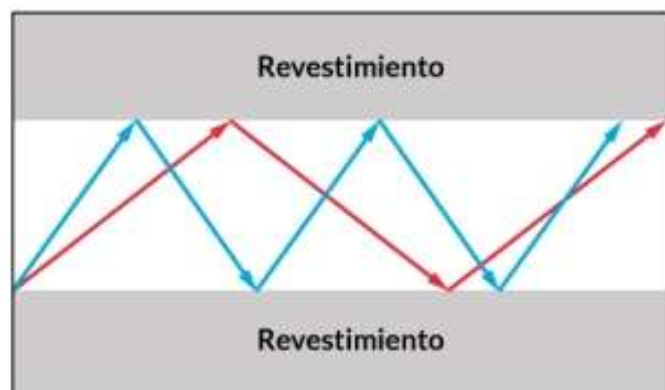


Figura 7. *Dispersión cromática.*

Fuente: PRORED

2.1.3.4 Dispersión en fibra monomodo

La dispersión en fibra monomodo es un problema clave que afecta el rendimiento de las comunicaciones ópticas, a continuación, se detalla cada tipo de dispersión estudiada desde la fibra monomodo y como se ve afectada este tipo de transmisión en específico.

2.1.3.4.1 Dispersión cromática en fibra monomodo

en la fibra monomodo, donde un solo modo de luz se propaga, la dispersión cromática puede ser particularmente problemática aplicándola en transmisión de alta velocidad y largas distancias, como en telecomunicaciones, este tipo de dispersión genera superposición en los pulsos a medida que se propagan a través de la fibra, esto puede ser provocado debido a la relación de dependencia de la fibra con el índice de refracción del material con la longitud de la onda [19].

2.1.3.4.2 Dispersión modal en fibra monomodo

Este tipo de dispersión está presente cuando las diferentes trayectorias de la luz viajan a diferentes velocidades en fibra monomodo, solo se propagan un único modo. Debido a esto en la fibra monomodo ideal, no existe este tipo de dispersión debido a que no existen más de un modo de luz que se propague a través de la fibra [20].

2.1.3.4.3 Dispersión por polarización en fibra monomodo

La dispersión por polarización en fibras monomodo es un tipos de dispersión que ocurre debido a imperfecciones en la estructura de la fibra, aunque la fibra monomodo está diseñada para permitir que solo un modo de luz se propague, en realidad, este modo puede dividirse en otros dos modos ortogonales, estos son ligeramente diferentes en sus velocidades debido a una propiedad conocida como birrefrgerancia, que es la diferencia en el índice de refracción para polarizaciones de la luz dentro del material de la fibra [21].

El impacto de la dispersión por polarización se vuelve más significativo en sistemas de comunicación de alta velocidad y largas distancias. El ensanchamiento del pulso que genera la dispersión puede limitar la capacidad de la fibra para transmitir datos a altas tasas, que causa la necesidad de implementar técnicas de compensación o usar fibra con bajo índice de dispersión

2.1.3.5 Dispersión cromática en fibra óptica multimodo

Cuando un pulso de luz, que contiene varia longitudes de onda, es inyectado en la fibra óptica multimodo, cada longitud de onda experimenta una velocidad de propagación diferente debido a la variación de índice de refracción, las ondas más cortas es decir las que se derivan hacia el azul tienden a viajar más lentamente que las longitudes de onda más largas que son las que se inclinan más hacia el rojo, lo que resulta en distintas componentes espectrales de un pulso de luz llegan al extremo de la fibra en diferentes tiempos, que genera ensanchamiento temporal del pulso [22].

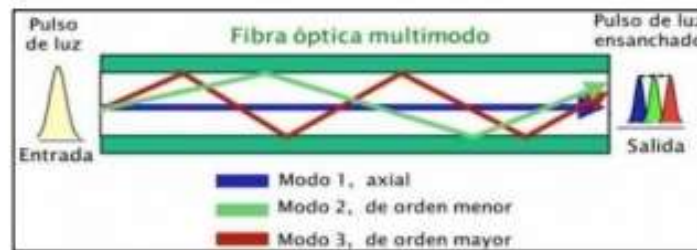


Figura 8. Dispersión cromática en la fibra multimodo.

Fuente: ELCAJONDELELECTRONICO

2.1.3.6 dispersión modal en la fibra óptica multimodo

La dispersión modal ocurre debido a la existencia de diferentes modos de propagación dentro de la fibra multimodo, donde cada modo recorre un trayecto distinto y, por lo tanto, tiene una longitud de recorrido diferente. Los modos que viajan más cerca del eje central de la fibra recorren una distancia más corta y llegan al extremo de la fibra más rápidamente. En cambio, los modos que viajan en ángulos más grandes respecto al eje central tienen trayectoria más larga y, por lo tanto, llegan más tarde [23].

Debido a las diferentes longitudes de las trayectorias recorridas por cada modo, los modos más rápidos y más lentos llegan al extremo de la fibra en momentos diferentes, lo que provoca un desfase temporal entre ellos, este desfase temporal causa un ensanchamiento del pulso original a medida que se propaga a través de la fibra, lo que se traduce en una dispersión temporal del pulso [24].

En fibra multimodo, aunque la dispersión por polarización es menos pronunciada que en fibra monomodo, puede haber un acoplamiento entre modos que afecta la dispersión. Estos tipos de dispersión es más compleja debido a la coexistencia de múltiples modos de propagación, cada uno con sus propios estados de polarización.

2.1.3.7 Dispersión por polarización en fibra multimodo

Similar a otros tipos de dispersión, esta causa un ensanchamiento temporal del pulso de luz debido a la llegada en tiempos diferentes de los componentes polarizados, esta dispersión en fibra multimodo es un factor limitante en la velocidad de transmisión de datos, especialmente en redes de alta velocidad mayores a 10 Gbps.

En las bandas de transmisión, este ensanchamiento reduce la capacidad de la fibra para distinguir entre diferentes pulsos de luz, limitando la velocidad de datos que se puede

transmitir sin errores. Cuanto mayor es la dispersión cromática, mayor es la distorsión y la atenuación de la señal en la banda de transmisión [25].

Los diferentes tipos de dispersión en la fibra óptica se ven reflejados en sus transmisiones las cuales se llevan a cabo en las diferentes bandas de transmisión, en el actual estudio se consideran las bandas más comerciales en la fibra óptica para el hogar, como son las bandas; Original, Convencional, Longitud de onda más Larga.

2.1.4 Bandas de frecuencia en que se transmite FTTH

2.1.4.1 Banda de frecuencia O (Original)

La banda O en las redes de fibra óptica hasta el hogar se refiere a un rango de longitudes de onda en el espectro óptico, que abarca aproximadamente desde 1260 nm (nanómetros) hasta 1360 nm. Esta banda se denomina original debido a que fue una de las primeras bandas usadas para la transmisión de señales en la fibra óptica debido a sus características de baja dispersión, su frecuencia es de 237.9 hasta 220.4 THz [26].

2.1.4.2 Banda de frecuencia E (Extendida)

La banda E en las redes FTTH es un rango de longitudes de onda en el espectro óptico que abarca aproximadamente desde 1360 nm hasta 1460 nm, esta banda se denomina “extendida” porque se encuentra justo después de la banda O y amplía el rango de la longitud de onda disponible para la transmisión óptica. Aunque la banda E no es tan comúnmente usada como la banda O, C y L se considera para aplicaciones especializadas y para expandir la capacidad de transmisión de la red en cuanto a su frecuencia oscila entre 220.4 y 205.3 THz [27].

2.1.4.3 Banda C (banda convencional)

La banda C ofrece equilibrio óptimo entre la baja atenuación de la fibra y la capacidad de amplificación, permitiendo enlaces de larga distancia con alta capacidad de amplificación, permitiendo enlaces de larga distancia con alta capacidad de transmisión[28].

2.1.4.4 Banda L (larga longitud)

La banda L es un rango del espectro óptico que va aproximadamente desde 1565 nm hasta 1625 nm y se utiliza en redes FTTH y otros sistemas de fibra; óptica para aumentar la capacidad de transmisión, especialmente en tecnologías como WDM (Wavelength Division Multiplexing) Su uso permite agregar más canales ópticos, expandiendo el ancho de banda disponible sin necesidad de instalar más fibra [28].

2.1.4.5 Banda S (Banda de longitud de onda corta)

Es una banda que va desde 1460 a 1530, la banda S permite ampliar el rango de longitudes de onda utilizables en la fibra óptica, ofreciendo una alternativa cuando las bandas C y L están saturadas. Aunque presenta una atenuación ligeramente mayor que la banda C, puede aprovecharse en sistemas WDM para aumentar la capacidad total del enlace, especialmente en redes metropolitanas o en FTTH avanzado [29].

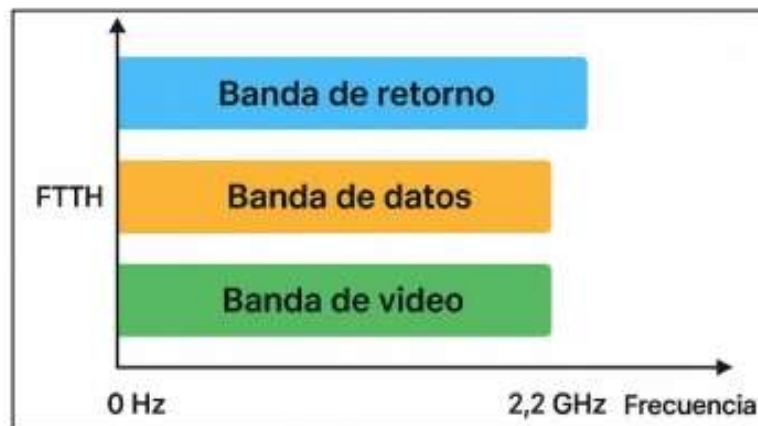


Figura 9. Dispersión cromática en la fibra multimodo.

Fuente: BITAG

2.1.5 Ecualizadores

En telecomunicaciones, un ecualizador es un componente o algoritmo diseñado para compensar las distorsiones que sufre una señal durante su transmisión a través de un canal. Estas distorsiones pueden ser causadas por fenómenos como la atenuación, la interferencia intersímbolo (ISI) o la dispersión en medios como el cobre, el aire o la fibra óptica. El ecualizador actúa ajustando la forma de la señal recibida para que se aproxime lo más posible a la señal original transmitida, mejorando así la fidelidad de la transmisión y reduciendo el índice de errores en la recepción de datos [30].

2.1.5.1 ecualizadores en FTTH

Un ecualizador digital para FTTH es un componente clave dentro del receptor óptico, diseñado para compensar las distorsiones que afectan a la señal de datos transmitida por la fibra óptica hasta el usuario final. A medida que las señales ópticas viajan por largas distancias en la red de acceso, pueden verse afectadas por fenómenos como la dispersión cromática, que provoca que diferentes componentes espectrales lleguen en momentos distintos y la interferencia entre símbolos, que degrada la calidad de la señal.

El ecualizador digital actúa sobre la señal eléctrica una vez convertida desde el dominio óptico, utilizando algoritmos avanzados de procesamiento digital para restaurar la forma original de la señal y garantiza una comunicación precisa. Estos se implementan en procesadores digitales de señal (DSPs) ubicados en la unidad receptora del usuario o en el nodo de distribución y utilizar técnicas como filtros adaptativos, algoritmos o incluso inteligencia artificial para ajustarse a las condiciones del canal [31].

2.2 Marco referencial

En su libro "Optical communications essential" Gered Keiser presentó parte de una necesidad técnica real en las redes ópticas actuales, mejorar la calidad de transmisión en sistemas FTTH, donde la dispersión sigue una de las principales causas de degradación de la señal, diversos estudios y trabajos científicos han evidenciado que la dispersión modal y dispersión por modo de polarización afectan directamente parámetros clave como el BER, la interferencia inter símbolo y el retardo de grupo, comprometiendo la fiabilidad del sistema [32].

En este contexto, en el libro "Perancangan Jaringan Fiber to the Home Berbasis Gigabit Passive Optical Network Dengan Dual Stage Passive Splitter" Gede Sukadarmika demostró que el uso de ecualizadores digitales puede mitigar estos efectos de manera efectiva. Tecnologías como filtros FIR, DFE, LMS o incluso algoritmos basados en MLSE han sido aplicadas en investigación previas con resultados positivos, especialmente cuando se combinan con técnicas de procesamiento digital de señales (DSP)[33].

En el estudio "Velocidad de información alcanzables para la fibra óptica: aplicaciones y cálculos" de Alvarado, se destacan las velocidades de información alcanzables (AIR) como métricas clave para el análisis de los sistemas de comunicaciones ópticas. A diferencia de los indicadores tradicionales como el BER o el factor Q en particular la información mutua y la información generalizada [33].

Con base en este panorama, el presente estudio se orienta a diseñar y simular un ecualizador digital que responda a las condiciones particulares de dispersión en las bandas mencionadas. La propuesta parte del artículo "Compensación de los efectos dispersivos de la fibra óptica en un sistema IM-DD usando ecualizador MLS y MLSE" escrito por Roberto David Gallego Ruiz que menciona la incidencia de estos algoritmos sobre un canal dispersivo los parámetros que determinan el nivel de dispersión [34].

En los sistemas ópticos de acceso como FTTH, la dispersión construye un desafío persistente, ya que provoca ensanchamiento temporal de los pulsos y superposición entre símbolo, generando interferencia intersimbólica que degrada la calidad de servicio. Este efecto se ve reflejado en materia como la apertura del ojo, el factor Q y la tasa de error de bit, indicadores ampliamente utilizados en la literatura para evaluar el desempeño de la transmisión [35].

2.3 Marco Legal

2.3.1 “Constitución de la República del Ecuador”

Artículo 385: Establece que el estado promoverá la ciencia, la tecnología y los saberes ancestrales para fomentar el bien común, priorizando la innovación y el desarrollo tecnológico con pertinencia social.

Artículo 16: Reconoce el derecho de las personas al acceso universal a las tecnologías de la información y comunicación (TIC), en condiciones de calidad, libertad e igualdad[36].

2.3.2 Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT)

Artículo 4: Garantiza la prestación eficiente de los servicios de telecomunicaciones y el uso óptico del espectro radioeléctrico, promoviendo el desarrollo tecnológico.

Artículo 16: Impulsa la modernización de las redes mediante tecnologías avanzadas como la fibra óptica y garantiza la calidad y continuidad del servicio[37].

2.3.3 Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones

Establece los requisitos técnicos y administrativos para asegurar que los servicios de telecomunicaciones cuenten con calidad, eficiencia y cobertura, en concordancia con los estándares internacionales de transmisión óptica y digital [38].

2.3.4 Código de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación (Código Ingenios)

Artículo 31: Fomenta la investigación científica, el desarrollo experimental y la innovación tecnológica para contribuir al desarrollo nacional.

Artículo 63: Incentiva la cooperación entre instituciones educativas, científicas y tecnológicas para la transferencia de conocimientos que mejoren procesos técnicos y servicios [39].

2.3.5 Norma técnica INEN-IEC 60793.

Esta norma regula los requisitos de desempeño y pruebas para fibras ópticas, incluyendo parámetros como la dispersión cromática y la atenuación, que son fundamentales en el diseño de ecualizadores digitales para FTTH[40].

2.3.6 Políticas del Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL)

Apoyan la expansión de redes FTTH (Fiber To The Home) como parte de los planes de conectividad nacional para reducir de brecha digital, donde se exige eficiencia y calidad en los sistemas de transmisión de datos[41].

2.3.7 Normas de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL)

Dicta lineamientos técnicos sobre la operación de redes ópticas en el Ecuador, estableciendo parámetros de calidad del servicio que deben ser cumplidos por los proveedores y operadores.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo situado en la Av. Carlos J. Arosemena 38, Quevedo - Los Rios – Ecuador, con coordenadas geográficas de latitud -1.01248 y longitud -79.4692, a una altitud de 74 metros sobre el nivel del mar.



Figura 10. Localización de la universidad técnica estatal de Quevedo.

Fuente: Google Maps

3.2 Metodología

3.2.1 Tipo de investigación

3.2.1.1 Investigación Documental

El tipo de investigación de esta tesis se considera documental porque se basa en la revisión, y sistematización de información proveniente de fuentes documentales como artículos científicos, libros, normas técnicas y estudios previos. No se realizó recolección de datos primarios, en cambio se construyó el marco teórico y técnico a partir del conocimiento ya existente.

3.2.1.2 Investigación Exploratorio

La investigación es exploratoria, ya que se buscó profundizar en el estudio de los algoritmos de ecualización basados en procesamiento digital de señales y su impacto en la calidad de servicio en redes FTTH. Este enfoque es idóneo debido a que existen áreas poco abordadas en la literatura, lo que requirió un análisis preliminar y abierto para identificar tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades de mejora en el diseño de ecualizadores.

3.2.2 Métodos de investigación

3.2.2.1 Método mixto

Se empleó un método de investigación mixto debido a la naturaleza integral del problema abordado. Por un lado, se emplea un enfoque cuantitativo, ya que el estudio se fundamenta en simulaciones realizadas en un entorno especializado, de donde se obtienen métricas objetivas como el Q factor, la tasa de error de bit y la apertura del diagrama de ojo, paralelamente, se incorpora un enfoque cualitativo, orientado a interpretar estos resultados en función de la literatura científica y del contexto técnico de las redes FTTH.

3.2.3 Fuentes de información

3.2.3.1 Primaria

La fuente de información secundaria del presente proyecto fueron las simulaciones obtenidas de trabajos presentados en artículos de suma importancia para entender de manera visual como ocurre la dispersión en la fibra óptica.

3.2.3.2 Secundaria

Las principales fuentes de información han sido dirigidas por los motores de búsqueda como “Google Académico”, “IEEE”, “Scielo” y demás sitios web contenedores de textos académicos como lo son tesis de grado en idiomas nativos y americanos, que han permitido abarcar la información teórica de las dispersiones en fibra óptica y todo cuando gira en torno a las redes FTTH.

3.2.4 Diseño de la investigación

3.2.4.1 Descriptivo

La investigación presentó un diseño descriptivo debido a que describe la función de los distintos filtros y algoritmos que permiten diseñar un ecualizador, así como su incidencia en los tres tipos de dispersión mencionadas anteriormente, de igual manera describe un escenario en que se aplica el diseño del ecualizador y las imágenes resultantes de la simulación antes y después de aplicar el ecualizador.

3.2.5 Fases de la Investigación

3.2.5.1 Etapa 1: exploración de la información

En esta primera fase se realizó un proceso exhaustivo de recopilación y análisis de información relacionada con la fiabilidad de redes de fibra óptica hasta el hogar (FTTH). Para ello, se revisaron investigaciones previas, artículos académicos y normativas técnicas

que abordan tanto los parámetros de dispersión como las métricas de desempeño de la red, tales como atenuación, dispersión y distorsión.

3.2.5.2 Etapa 2: Conceptualización de las bandas que transmiten en FTTH bajo los efectos de la dispersión

En esta etapa se procedió a caracterizar las bandas de transmisión utilizadas en sistemas FTTH, específicamente las bandas O, L y C. a partir de fuentes científicas y técnicas oficiales se investigaron las condiciones de propagación de cada una y su susceptibilidad frente a los distintos tipos de dispersión. Además, se diseñaron escenarios teóricos y pruebas preliminares con el fin de anticipar como estas bandas pueden ver afectada su calidad de transmisión.

3.2.5.3 Etapa 3: Identificación del tipo de dispersión

Una vez delimitadas las bandas, se realizó la identificación de los principales tipos de dispersión que afectan la propagación de la señal en la fibra óptica. Para ello, se realizaron parámetros como la reducción de velocidad de transmisión, la llegada asincrónica de la información, la degradación visible en el cable y la influencia de la longitud de la fibra. Estos aspectos fueron estudiados a partir de mediciones y simulaciones, lo que permitió clasificar los efectos observados en categorías como dispersión cromática, dispersión modal y dispersión por polarización.

3.2.5.4 Etapa 4: Diseño de un ecualizador

Con base en la información recolectada y en la caracterización del fenómeno de dispersión, se procedió al diseño del ecualizador como herramienta de compensación. En esta fase se seleccionaron los algoritmos y métodos de ecualización más adecuados para el entorno de estudio, considerado criterios de eficiencia computacional, robustes frente a distintos tipos de dispersión y facilidad de implementación. Se definieron además los parámetros de la fibra óptica y las consideraciones de simulación que orientarían el diseño.

3.2.5.5 Etapa 5: Comprobar el ecualizador

Se implementó entornos virtuales controlados que permitan la simulación de una red FTTH con dispersión a la cual se le aplicó este ecualizador en las bandas de transmisión mencionadas O, L y C, a continuación, se observaron los resultados en cuanto a estándares de fiabilidad de la red.

CAPITULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tipos de algoritmos usados en ecualizadores

4.1.1 FIR adaptativo

Un filtro FIR (Respuesta al Impulso Finita) tiene una respuesta finita en el tiempo. Se compone de una serie de coeficientes w_k aplicados a entradas retrasadas del sistema, la salida $y(n)$ se calcula como:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} W_k(n) \cdot x(n-k) \quad (1)$$

Donde:

- $x(n)$ entrada en tiempo discreto
- W_k coeficientes adaptativos
- N longitud del filtro

TABLA 1

MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO FIR

Metrica	Canal dispersivo	Filtro FIR
VER (Bit error rate)	$>10^{-3}$	$<10^{-6}$
Ancho de banda del canal	Limitado por la dispersión (~200 MHz. Km)	Restaurado parcialmente (~GHz)
Velocidad de transmisión	A 10 Gbps: ISI severa	A 10 Gbps: ISI manejable con FIR $\geq$ orden 15
ISI (Interferencia Intersímbolo)	Los simbolos se solapan	Reducida y normalizada

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la tabla 1 se describe la incidencia de este algoritmo en la dispersión, se detalla a partir de los parámetros que generan la dispersión

Bit Error Rate (BER): El ecualizador compensa el ISI causado por dispersión (modal, cromática o PMD), evitando errores de decisión en el receptor. Sin ecualización, el BER se incrementa notablemente en canales dispersivos.

Ancho de banda del canal: El FIR puede compensar distorsión dentro del rango de su respuesta de frecuencia, si la dispersión limita el ancho de banda efectivo, el FIR ayuda a restaurar componentes de frecuencia importantes para la reconstrucción símbolos.

Velocidad de transmisión: A mayor tasa de transmisión, el tiempo entre símbolos es menor, por lo que cualquier dispersión genera ISI más crítico. El FIR debe tener mayor resolución temporal.

Interferencia Intersímbolo (ISI): La función principal de FIR es precisamente mitigar el ISI que resulta de la dispersión temporal, lo hace revirtiendo la convolución del canal[42].

En la ilustración 3 se muestra una sintaxis básica con la que trabaja este algoritmo al incidir en las métricas de dispersión.

```
>> % Supongamos canal y señal recibida conocidos
h = [0.5 1 0.5];           % Respuesta del canal
rx = conv(tx, h);          % Señal recibida (ejemplo)

N = 5;                     % Orden del ecualizador
fir_eq = fir1(N, 0.5);     % Diseño del ecualizador
eq_out = filter(fir_eq, 1, rx); % Señal ecualizada
```

Figura 11. Sintaxis del algoritmo FIR adaptativo.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

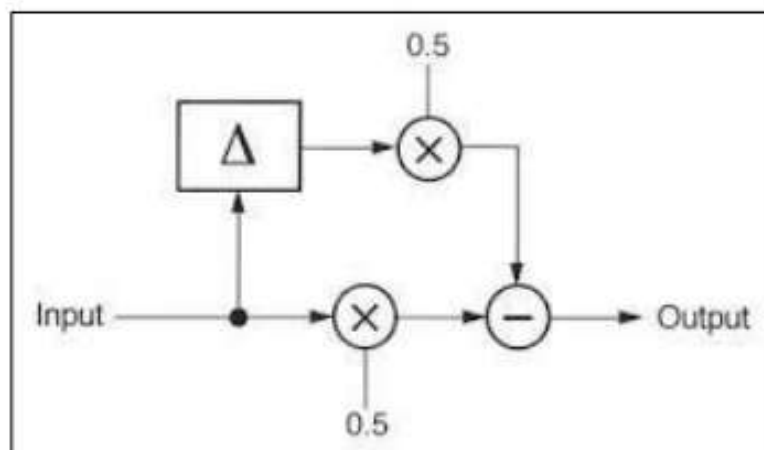


Figura 12. Diagrama del filtro FIR.

Fuente: Discover scientific knowledge and stay connected to the world of science.

4.1.2 Decision Feedback Equalizer (DFE)

El ecualizador DFE (Decisión de Ecualizador de Retroalimentación) es un ecualizador que se adapta y combina una sección anticipativa, similar a un filtro FIR, para compensar la interferencia intersímbolo (ISI) precursora es decir, la que ocurre antes del símbolo actual, con una sección de retroalimentación que utiliza las decisiones preventivamente tomadas por el receptor para cancelar la ISI postcursor, causada por símbolos anteriores, mejorando así la detección de señales en canales afectados por la dispersión temporal

$$\hat{X}(n) = \sum_{i=0}^n a_i x(n-i) + \sum_{j=1}^M b_j \hat{x}(n-j) \quad (2)$$

a_i : coeficiente del filtro FIR

b_j : coeficiente del filtro de retroalimentación

$\hat{x}(n-j)$: decisiones pasadas

$X(n)$: muestra actual

En la revisión de la incidencia de este algoritmo en las métricas de dispersión ya establecidas se encontró lo siguiente

TABLA 2

MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO DFE

Métrica	Canal dispersivo sin ecualizador	Filtro DFE
VER (Bit Error Rate)	$>10^{-3}$	$\sim 10^{-6}$ o menor
Velocidad de Transmisión	≥ 10 Gbps: presenta error en los símbolos	$\geq$ Gbps: responde a decisiones estables
Longitud de onda (λ)	1310/1550 nm con dispersión cromática alta	Efectos de CD mitigados

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Bit Error Rate (BER): Reduce ISI posterior al símbolo actual. Al usar al usar decisiones previas, evita amplificación de ruido, lo cual baja el BER. En canales con dispersión fuerte, supera a FIR lineal

Velocidad de transmisión: En altas tasas mayores a 10 Gbps, un pequeño retardo puede causar errores en las decisiones pasadas es decir pueden inducir errores en cascada. Requiere decisiones rápidas y precisas.

Longitud de onda (λ): La dispersión cromática depende de λ , el DFE no actúa directamente sobre λ , pero si sobre los efectos de CD inducidos por operar en 1310/1550 nm [43].

En la ilustración 13 se muestra la sintaxis del filtro con el que trabaja este algoritmo.

```
>> M = 2; % Modulación BPSK
dfe = dfreq(3, 2, lms(0.01)); % Filtro anticipativo, retroalimentado y LMS
eq_out = equalize(dfe, rx, tx); % tx = señal original transmitida
```

Figura 13. Sintaxis básica del algoritmo DFE.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

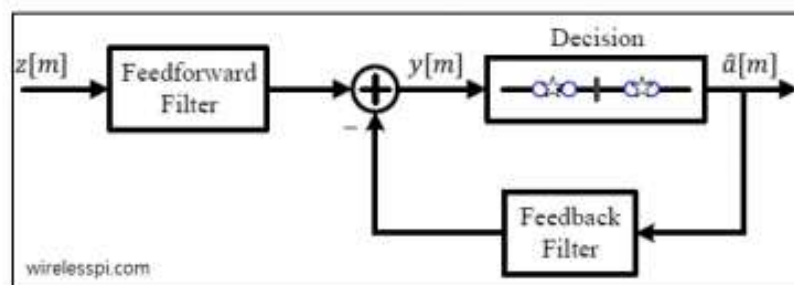


Figura 14. Diagrama en bloques del filtro DFE

Fuente: Wireless Pi

4.1.3 LMS (Least Mean Squares)

El LMS (Métrica cuadrática media) es un algoritmo de aprendizaje adaptativo que ajusta los coeficientes de un filtro como los FIR o DFE para minimizar el error cuadrático medio entre la salida del filtro y una señal deseada.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n) \quad (3)$$

Donde:

$w(n)$: vector de coeficientes en tiempo

μ : paso de aprendizaje (learning rate)

$e(n) \cdot x(n)$: error entre la señal deseada $d(n)$ y la salida del filtro $y(n)$

$x(n)$: vector de entrada actual

El algoritmo LMS no tiene muchos factores de incidencia en los efectos que produce la dispersión como muestra en la siguiente tabla

TABLA 3

MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO LMS

Métrica	Canal dispersivo sin ecualizador	Aplicando el ecualizador LMS
Velocidad de transmisión	≥ 10 Gbps errores frecuentes con la ISI	≥ 10 Gbps requiere cambios en μ
Ancho de banda del canal	Limitado por la dispersión	Recuperación parcial del espectro útil

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Así mismo en la tabla 3 se revisaron las métricas de dispersión en las que este algoritmo tiene incidencia descritas a continuación

Velocidad de transmisión: A tasas altas es decir a más de 10 Gbps el tiempo entre muestras es muy corto, LMS necesita valores de μ más pequeños y más muestras para converger sin inestabilidad.

Ancho de banda del canal: LMS ajusta el filtro para restaurar el espectro dañado por la dispersión, aunque no expande el ancho de banda recupera su uso efectivo[44].

En la ilustración 8 se muestra la sintaxis de aprendizaje que tiene el algoritmo LMS..

```
>> mu = 0.01;           % Tasa de aprendizaje
nTaps = 8;               % Número de coeficientes
eq = adaptfilt.lms(nTaps, mu);
[eq_out, err] = filter(eq, tx, rx); % tx: señal deseada, rx: entrada ruidosa
```

Figura 15. Sintaxis básica del algoritmo LMS

Fuente: el autor

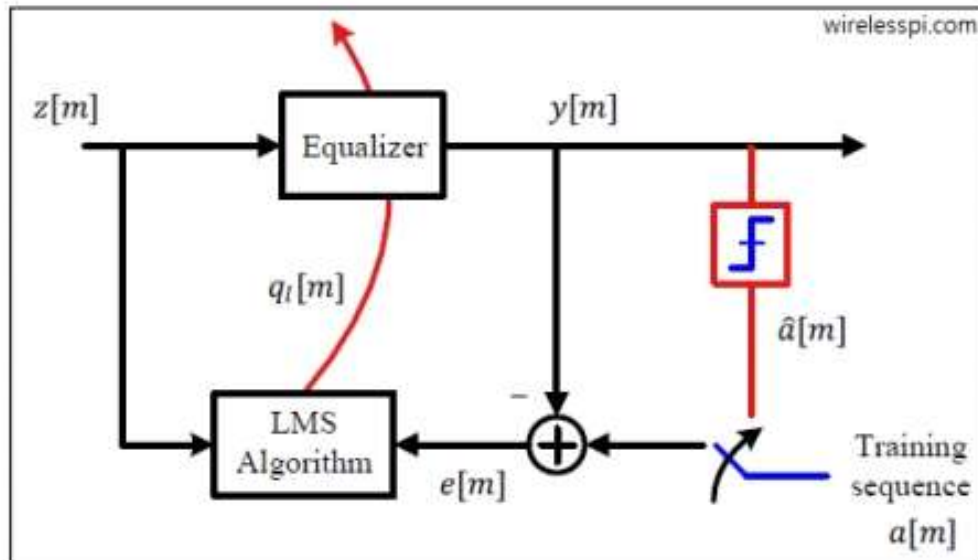


Figura 16. Diagrama en bloques del filtro LMS.

Fuente: Wireless Pi

4.1.4 Recursive Least Squares (RLS)

El RLS (Mínimos Cuadráticos Recursivos) es un algoritmo de adaptación que ajusta los coeficientes de un ecualizador para minimizar el error cuadrático total acumulado entre la salida del ecualizador y una señal de referencia, dando más importancia a las muestras más cercanas.

$$w(n) = w(n-1) + K(n) \cdot e(n) \quad (4)$$

$$k(n) = \frac{P(n-1) \cdot x(n)}{\lambda + x^T(n) \cdot P(n-1) \cdot x(n)} \quad (5)$$

$w(n)$: coeficiente del ecualizador.

$K(n)$: vector ganancia adaptativa.

$P(n)$: matriz de correlación inversa.

λ : factor de olvido ($0.95-1$), controla qué tan rápido olvida el canal pasado.

$e(n)$: error de predicción: $d(n) - y(n)$.

En la tabla 4 se muestra el nivel de incidencia del algoritmo RLS en las métricas de dispersión

TABLA 4**MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO RLS**

Métrica	Canal dispersivo sin ecualizador	Con ecualizador RLS
BER (Bit Error Rate)	$>10^{-3}$	$\sim 10^{-10}$ o menos
ISI (Interferencia Inter Símbolo)	Alta en canales dinámicos	Muy baja, con canales variables
Velocidad de transmisión	≥ 10 Gbps con alto BER	≥ 10 Gbps con convergencia rápida sin pérdida de bits
Longitud de onda (λ)	LA dispersión cromática afecta la onda	Efecto mitigado por la adaptación.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Las métricas mencionadas en la tabla número 4 se explican a continuación.

Bit Error Rate (BER): El RLS se ajusta finalmente al canal dispersivo, mejorando significativamente la precisión en la detección de símbolos, en muchos casos, alcanzar BER del orden de 10^{-10} o mejor.

Interferencia Intersímbolo (ISI): Su alta velocidad de adaptación permite eliminar ISI en canales que cambian rápidamente (mediante PDM dinámico), excelente para compensar distorsión severa.

Velocidad de transmisión: RLS puede adaptarse muy bien a sistemas de alta velocidad siempre que haya suficiente poder de cómputo, no necesita muchos bits para converger

Ancho de banda del canal: No amplía el canal, pero al mitigar distorsión y recuperar la forma de pulso, permite un uso más eficiente del espectro

Longitud de onda (λ): Aunque RLS no actúa sobre λ , se ajusta a los efectos de dispersión que depende de ella, como la CD que es más severa en 1550 nm[45].

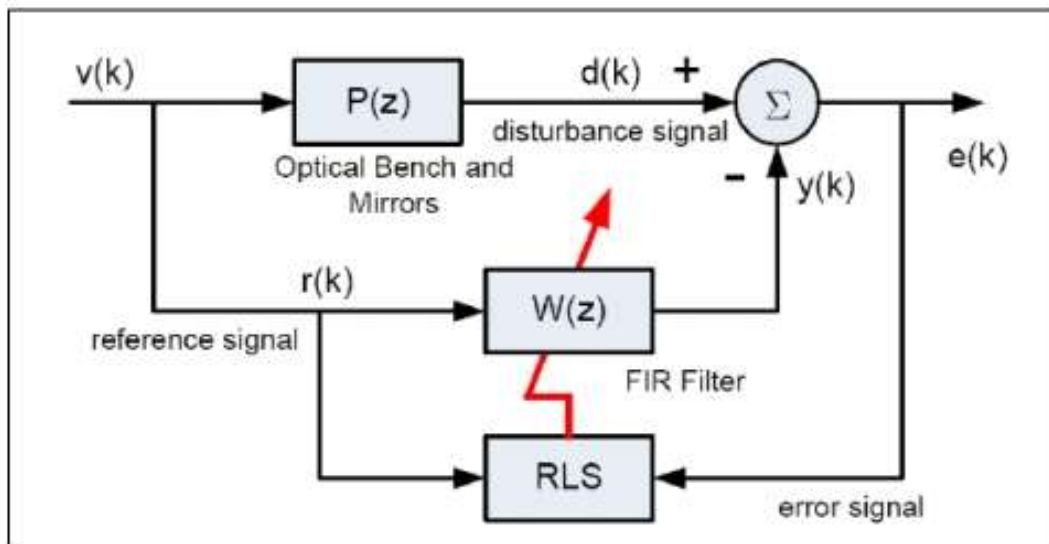


Figura 17. Diagrama en bloques del filtro RLS.

Fuente: ResearchGate

4.1.5 MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation)

MLSE (Estimación de Secuencia de Maxima Verosimilitud) es una técnica óptima de detección digital que busca la secuencia de bits más probable que pudo haber generado la señal recibida, considerando el efecto del canal.

En sistemas ópticos como FTTH, cuando la dispersión causa ISI severa y prolongada y la relación señal-ruido no es suficiente, MLSE es la mejor opción teórica para recuperar los datos transmitidos con mínimo BER

TABLA 5

MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO MLSE

Métrica	Canal dispersivo sin ecualizador	Con Ecualizador MLSE
BER (Bit Error Rate)	$>10^{-3}$	$\approx 10^{-12}$ alcanza su límite teórico
ISI (Interferencia Intersimbolo)	Alto solapamiento de los signos	En el canal ideal se elimina
Velocidad de transmisión	≥ 10 Gbps alto BER	≥ 10 Gbps

Fuente: el autor

BER: MLSE puede alcanzar el limite inferior de BER en presencia de ISI y ruido. Es la referencia frente a otros algoritmos.

ISI: Modela la dispersión como una memoria de canal y considera todas las posibles secuencias afectadas por ISI. No compensa directamente el canal, no que detecta con ISI incluido.

Velocidad de transmisión: Para sistemas de alta velocidad mayores a 10 Gbps, el número de estados crece exponencialmente con la memoria del canal esto debido a que requiere PDS con simplificaciones potentes [46].

```
>> chan = [0.5 1 0.5];           % Modelo del canal
trellis = poly2trellis(3, [5 7]);
mlse_eq = mlseeq(rx, chan, trellis, 'cont', tx); % Decodificación MLSE
```

Figura 18. Sintaxis básica del algoritmo MLSE.

Fuente: el autor

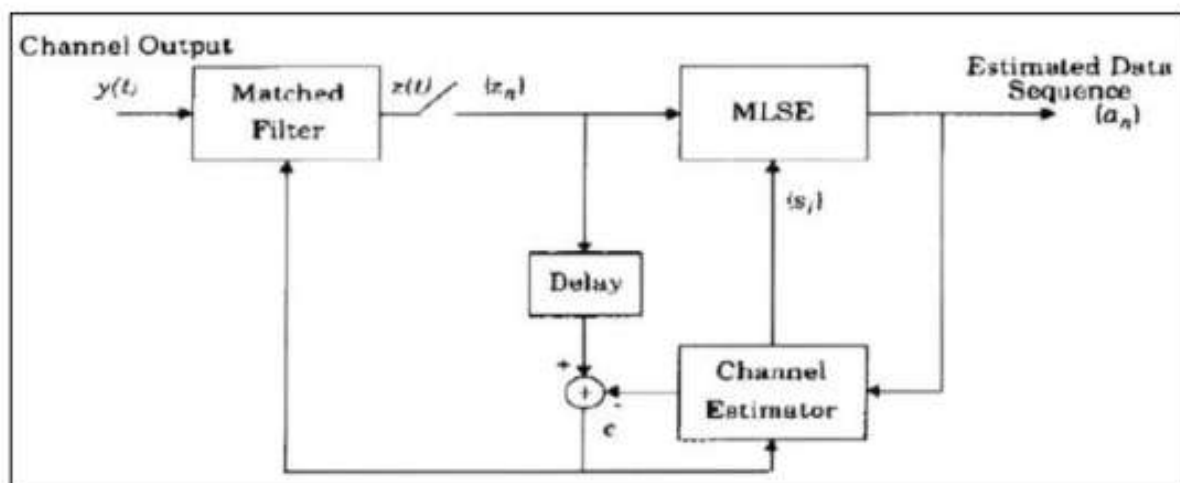


Figura 19. Diagrama de bloques del algoritmo MLSE.

Fuente: ResearchGate

4.1.6 Ecualizador en frecuencia para sistemas (OFDM)

La ecualización MLSE (Maximun Likelihood Sequence Estimation) no busca invertir directamente la respuesta del canal como lo hacen los filtros FIR o DFE, si no que modela el canal como un sistema con memoria debido a la dispersión que introduce ISI y evalúa todas las posibles secuencias transmitidas para seleccionar aquella que maximiza la

probabilidad o, de forma equivalente, minimiza la métrica de error de haber generado la señal recibida.

$$y(n) = \sum_{k=0}^L h_k \cdot x(n-k) + w(n) \quad (6)$$

$y(n)$ símbolo recibido en el tiempo n .

$x(n-k)$ símbolo transmitido en el tiempo $n-k$.

h_k : respuesta impulsiva del canal (efecto de la dispersión).

$w(n)$ ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN).

L : orden del canal (profundidad del ISI).

En la tabla 6 se muestra la incidencia de este algoritmo en las métricas de dispersión.

TABLA 6

MÉTRICAS DE DISPERSIÓN QUE INCIDEN EN EL ALGORITMO OFDM

Métrica	Canal Dispersivo	Con ecualizador en frecuencia (OFDM)
BER (Bit Error Rate)	$>10^{-3}$	$\approx 10^{-6}$ a 10^{-9} según su relación señal ruido
ISI (Interferencia Intersimbolo)	Alta	Elimina todo el solapamiento de los símbolos
Velocidad de transmisión	≥ 10 Gbps: se ve afectada por la dispersión	≥ 10 Gbps

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Interferencia Intersimbolo ISI: Elimina completamente el ISI mientras el canal usado sea el correcto.

Bit Error Rate (BER): Minimiza el BER hasta su límite teórico

Ancho de banda: Permite usar canales estrechos compensando la distorsión severa.

Velocidad de transmisión: Necesita más potencia de cómputo a mayor tasa.

Longitud de onda (λ): No actúa directamente sobre λ , pero sí sobre los efectos de dispersión cromática que depende de ella [47].

```

>>
>> % Suponiendo señal transmitida en frecuencia y canal conocido
N = 64; % Número de subportadoras
tx = randn(1, N); % Señal transmitida (ejemplo)
H = fft([0.9 0.3 0.1], N); % Canal en frecuencia (ejemplo)
rx = ifft(fft(tx) .* H); % Simulación de paso por canal

% Ecualización ZF (división subportadora por subportadora)
RX_freq = fft(rx);
eq_out = RX_freq ./ H; % Ecualización en frecuencia
tx_rec = real(ifft(eq_out)); % Reconstrucción temporal

```

Figura 20. Sintaxis básica del algoritmo OFDM.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

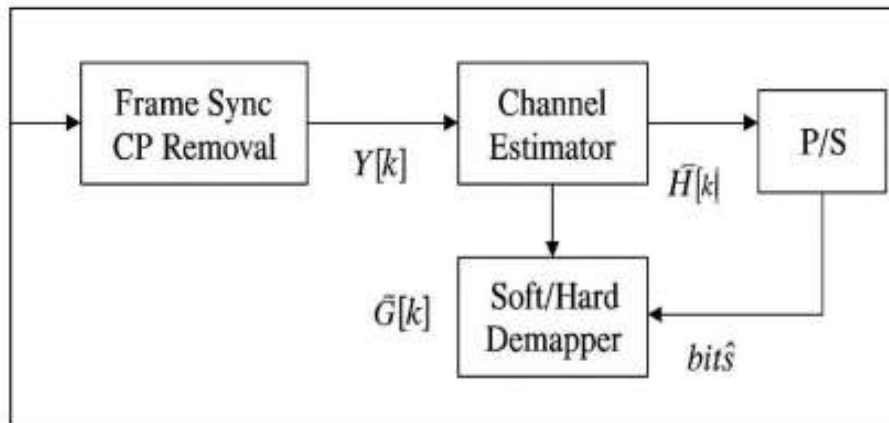


Figura 21. Diagrama de bloque del algoritmo OFDM.

Fuente: Biblus.us.es

El análisis de algoritmos de ecualización mostró que el MLSE y el DFE destacan en la reducción de BER y la mitigación de ISI, respectivamente, filtro FIR adaptativo aporta al incremento del ancho de banda al corregir distorsiones en el canal, los métodos LMS y RLS permite ajustes dinámicos en tiempo real ante variaciones de señal. Teniendo esto en cuenta se puede ver que la ecualización en OFDM resulta clave para manejar la interferencia intersímbolo en entornos multitrayectoria.

Para conocer el alcance comparativo de cada algoritmo y filtro de ecualización mencionados anteriormente se presenta una tabla comparativa de porcentajes basada en un rango de preponderancia e incidencia en las métricas de fiabilidad que intervienen en un canal dispersivo.

Las ecuaciones presentadas para la pendiente y la ordenada al origen, corresponden a los valores regulares las cuales permiten construir el modelo lineal de cada algoritmo. Estas contante se obtienen a partir de la relación entre la métrica de preponderancia y el porcentaje de incidencia en un canal dispersivo. Al sustituir dichos valores en la ecuación general se calcula los porcentajes de incidencia específicos para cada ecualizador.

Pendiente

$$b = \frac{\Delta m}{\Delta I} \quad (7)$$

Ordenada de origen

$$a = Im_0 - b \cdot m_0 \quad (8)$$

Ecuación general

$$I(m) = a + b \cdot m \quad (9)$$

FIR adaptativo

$$I(40) = 5.976 + 1.7024.40$$

$$I(40) \approx 5.976 + 68.096 = 74.07$$

Decision Feedback Equalizer (DFE)

$$I(50) = 5.976 + 1.7024.50$$

$$I(50) \approx 5.976 + 85.12 = 91.10$$

Least Mean Squares (LMS)

$$I(50) = 5.976 + 1.7024.35$$

$$I(50) \approx 5.976 + 50.584 = 65.56$$

Recursive Least Squares (RLS)

$$I(50) = 5.976 + 1.7024.45$$

$$I(50) \approx 5.976 + 76.608 = 82.59$$

Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE)

$$I(50) = 5.976 + 1.7024.50$$

$$I(50) \approx 5.976 + 85.12 = 91.096$$

Ecualización en frecuencia (OFDM)

$$I(45) = 5.976 + 1.7024.45$$

$$I(45) \approx 5.976 + 76.608 = 82.584 [48]$$

TABLA 7

IMPACTO DE ALGORITMOS DE ECUALIZACIÓN EN MÉTRICAS DEL PDS

Algoritmos y filtros de ecualización	Métrica más preponderante	Rango de preponderancia	Porcentaje de incidencia
FIR adaptativo	Ancho de banda del canal	40	75 %
Decisión Feedback Ecualizer (DFE)	Interferencia Intersimbolo (ISI)	50	90%
Least Mean Squares (LMS)	Longitud de onda (λ)	35	65%
Reursive Least Squares (RLS)	Velocidad de transmisión	45	80%
Maximun Likelihood Sequence Estimation	BER (Bit Error Rate)	50	92%
Ecualización en frecuencia	nterferencia Intersimbolo (ISI)	45	85%

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La tabla numero 7 resume el impacto de distintos algoritmos de ecualización sobre métricas fundamentales mediante PDS dentro de sistemas ópticos como FTTH. Cada algoritmo tiene un nivel diferente de efectividad dependiendo de la métrica sobre la que actúa, lo cual se refleja en un rango de preponderancia y un porcentaje estimado de incidencia, esta clasificación permite identificar que técnica resulta más adecuada según el tipo de dispersión o limitación a corregir.

En el siguiente gráfico de pastel se especifica el nivel porcentual de cada tipo de algoritmo en un canal dispersivo

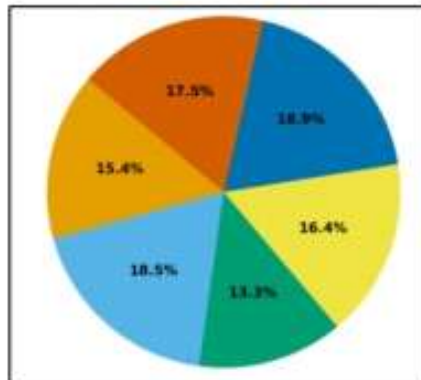


Figura 22. Gráfico de pastel del porcentaje de incidencia de los algoritmos en un canal dispersivo.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

El diagrama pastel muestra la distribución porcentual normalizada de la incidencia de distintos algoritmos de ecualizadores en el PDS, cada sector representa la proporción que aporta cada algoritmo al total de 100%, facilitando la comparación visual. Se observa que los algoritmos con mayor participación relativa son el MLSE (18.9%) y el DFE (18.5 %) seguido por la ecualización en frecuencia OFMD (17.5%) y RLS (16.4%), el filtro FIR adaptativo (15.4%) y como menos incidente el LMS (13.3%) que a pesar de ellos no pierde relevancia.

Para una mejor apreciación de la influencia de cada algoritmo en un canal dispersivo se desarrolló un diagrama de barra que compara el nivel de eficacia de cada algoritmo con cada tipo de dispersión

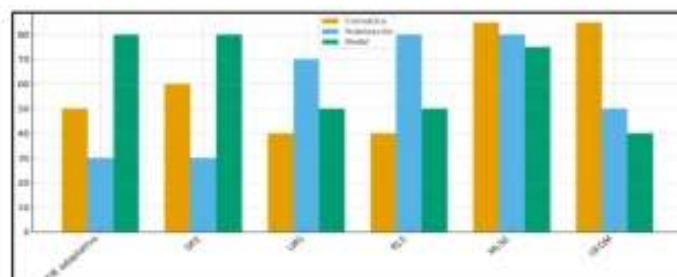


Figura 23. Gráfico de barras del nivel de incidencia de los filtros en cada tipo de dispersión.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

El gráfico de barras muestra la incidencia de distintos algoritmos de ecualización frente a los tipos de dispersión mencionados. Los colores representan un tipo de dispersión, el azul la cromática, naranja es por modo de polarización y el color verde dispersión modal, se observa que FIR adaptativo y DFE mayor respuesta en dispersión modal, RLS y LMS destacan en polarización, mientras que OFDM sobresale en cromática, el MLSE mantiene valores altos y equilibrados en los tres colores, demostrando su versatilidad para compensar DFEfectos dispersivos combinados.

Discusión

El análisis del primer objetivo demostró que el filtro FIR adaptativo FIR constituye una herramienta efectiva para mitigar la dispersión en sistemas ópticos, mejorando el BER y el ancho de banda, lo que concuerda con lo planteado por Domínguez, sobre la importancia de la simulación para evaluar impactos en redes de alta velocidad, además los algoritmos LMS y RLS mostraron capacidades adaptativas para reducir interferencias.

De igual manera según Gonzales Barajas cada algoritmo o filtro coincide en evitar el solapamiento entre los símbolos, sin embargo, MLSE presenta mayor convergencia en cuanto a la recuperación de la señal lenta y limitada frente a transmisiones típicas de 10 Gbps, mientras que RLS presenta mayor desempeño y eficiencia en la recuperación del espectro afectado [49].

4.2 Selección y diseño del ecualizador

La selección del algoritmo MLSE para el diseño del ecualizador se fundamentó en el análisis de la tabla comparativa de algoritmos y su incidencia sobre las principales métricas del procesamiento digital de señales, dicho análisis evidencio que el MLSE alcanzó el desempeño más destacado en la reducción de errores, especialmente en la métrica BER, donde presentó una incidencia aproximada del 92%, así se determinó que este algoritmo constituye la alternativa más idónea para el desarrollo de la presente investigación.

El algoritmo MLSE se caracteriza por ofrecer una máxima eficiencia en la reducción de errores, ya que permite estimar de manera óptima la secuencia original de bits incluso cuando la señal se ve deteriorada por dispersión y ruido, lo cual resulta esencial en entornos ópticos como las redes FTTH, además, presenta un desempeño robusto frente a la ISI, gracias a su capacidad de modelar el canal y evaluar múltiples trayectorias posibles, lo que lo convierte en una herramienta altamente precisa para la recuperación de señales afectadas por retardo y solapamiento [50].

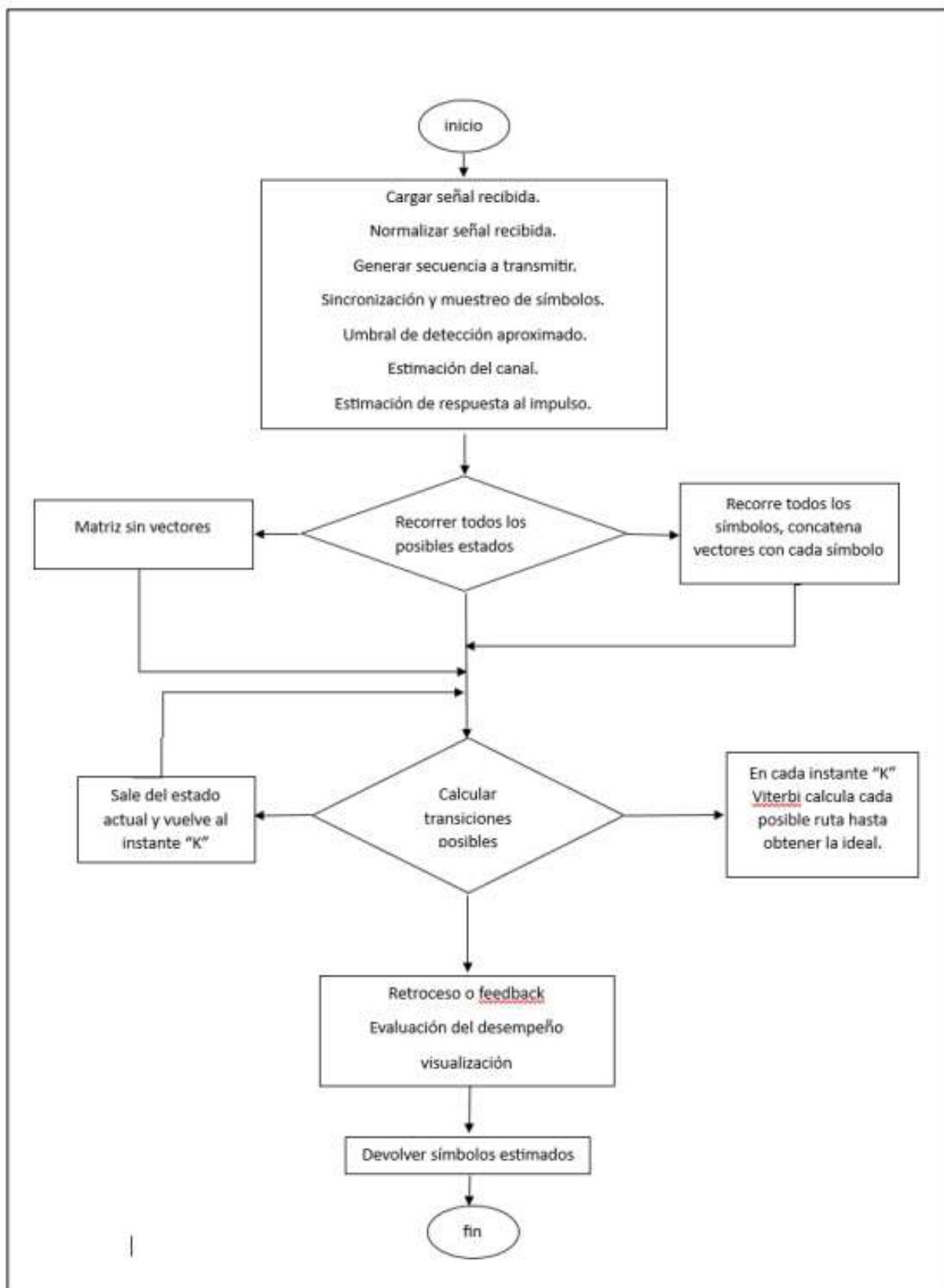


Figura 24. Diagrama de flujo del ecualizador.

Elaborado por: Gustavo Cadme (autor)

El diagrama de flujo describe el proceso integral de ecualización en el sistema óptico, el MLSE y el DFE se destacan por su capacidad para reducir la BER y mitigar la ISI, mientras que el FIR adaptativo compensa distorsiones y optimiza el ancho de banda útil, los algoritmos LMS y RLS aportan adaptaciones dinámicas mediante la actualización en tiempo real de sus coeficientes, a su vez, la ecualización en OFDM ofrece fiabilidad en escenarios con dispersión multitrayectoria.

En la misma secuencia, el flujo implementa el MLSE, empieza por ingresar las métricas de estado y camino, posteriormente, cada símbolo recibido se procesa calculando métricas de rama y actualizando punteros de decisión, este procesamiento conduce al backtracking que reconstruye la secuencia de símbolos más probable bajo máxima verosimilitud, así la señal estimada se demodula, se calcula la BER y se genera resultados numéricos y gráficos que validan el desempeño del ecualizador [51].

4.2.1 Sintaxis de las funciones del diseño del ecualizador

Teniendo en cuenta el diagrama de flujo se desarrolló la sintaxis del diseño del ecualizador

```
if strcmp(tipoFibra,'monomodo')
    valorDispersion = DC_monomodo(bandaOptica);
    valorPMD = PMD_monomodo(bandaOptica);
else
    valorDispersion = DM_multimodo(bandaOptica);
    valorPMD = 0;
end
```

Figura 25. Selección de parámetros según la banda.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 25 se realizó la respectiva asignación dinámica de los parámetros seleccionados para la dispersión en función del tipo de fibra y la banda elegida. Esto permitió adaptar la simulación a los distintos escenarios en los que se presenta la propagación y sus variables sin necesidad de reescribir el código.

```
bitsEntrada = randi([0 1],1,1000);
simbolosTx = qpsk_modular(bitsEntrada);
```

Figura 26. Generar y modular datos QPSK.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

A continuación, en la ilustración 26 se generó una secuencia de bits aleatoria que posteriormente fue modulada en símbolos QPSK, este paso represento la conversión de información digital en señales aptas para ser transmitidas a través del canal óptico, mediante selección de caminos e iteraciones que recibe los símbolos más adelante, es decir trazar un camino a seguir por los bits.

```
% Creación del canal dispersivo
canalOptico = crear_canal_dispersivo(valorDispersion, valorPMD, distanciaKm);
% Transmisión y distorsión
senalRx = filtrar_canal(canalOptico, simbolosTx);
% Añadir ruido blanco
senalRx_ruido = awgn(senalRx, SNR_dB, 'measured');
% Ecualización MLSE
senalEq = mlse_ecualizador(senalRx_ruido);
% Demodulación y cálculo de BER
bitsSalida = qpsk_demodular(senalEq);
tasaError = calcular_BER(bitsEntrada, bitsSalida);
% Resultados
fprintf('BER estimado: %.5f\n', tasaError);
```

Figura 27. Enlace óptico al que se le añade dispersión.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

En la ilustración 27 de creación del canal dispersivo se representó la fibra óptica como un medio real, aplicando un filtro que reproducirá los efectos de ensanchamiento y atenuación causados por la dispersión, posteriormente, en la fase de transmisión y distorsión, los símbolos modulados fueron propagados a través de dicho canal, generando una señal recibida con características degradadas, para incrementar el realismo de la simulación, se incorporó ruido blanco gaussiano, que representa las perturbaciones externas presentes en el enlace óptico [52].

4.2.2 Desarrollo del diseño del ecualizador basado en procesamiento digital de señales

Teniendo en cuenta los pasos a seguir en el diagrama de flujo y la sintaxis básica para el diseño del ecualizador se llevó a cabo su desarrollo en el software MATLAB debido a que ofrece un entorno robusto y especializado para la simulación de sistemas de comunicaciones ópticas y su facilidad para modelar y analizar fenómenos complejos como la dispersión cromática, modal, y por modo de polarización, mediante funciones matemáticas precisas [53].

4.2.2.1 Variables que intervienen en el diseño del ecualizador

Rb: tasa de bits del Sistema.

M: orden de modulación.

K: bits por símbolo calculado.

N: número de símbolo.

EbN0_dB: vector de valores de relación energía por bit a ruido.

EbN0: valores lineales de SNR, convertidos desde dB.

Tx_bits: vectores de bits generados aleatoriamente.

tx_symbols: secuencia de símbolos modulados.

h_channel: respuesta al impulso del canal óptico simulado.

tx_signal: señal transmitida luego de pasar por el canal.

noise: ruido blanco gaussiano.

rx_signal: señal recibida.

trellis: estructura de trellis para el decodificador viterbi.

tblen: longitud de la memoria del canal.

rx_eq_bits: bits estimados a la salida del ecualizador.

figure(), semilogy(): comandos de visualización[54].

4.2.2.2 Estructura y funcionamiento de cada sección del ecualizador.

```
Rb = 10e9;           % Tasa de bits (10 Gbps)
M = 4;               % Orden de modulación (QPSK)
k = log2(M);         % Bits por símbolo
N = 1e5;             % Número de símbolos transmitidos
EbN0_dB = 0:2:16;    % Rango de SNR en dB
EbN0 = 10.^(EbN0_dB/10); % Conversión a escala lineal
```

Figura 28. Inicialización de parámetros del sistema

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 28 se define los parámetros fundamentales que controlan la simulación, la tasa de bits (R_b) fija la velocidad de transmisión del enlace, mientras que (M) define el orden de modulación, (K) representa la cantidad de bits por símbolo, lo que influye directamente en la densidad espectral de la señal, (N) determina cuantos símbolos se han generado, afectando la duración de la simulación y la precisión.

```
tx_bits = randi([0 1], N*k, 1);           % Bits aleatorios
tx_symbols = qammod(tx_bits, M, 'InputType', 'bit'); % Modulación QPSK
```

Figura 29. Generación y modulación de datos.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 29 se genera una secuencia de bits aleatorios que representa la información digital que se desea transmitir, estos bits son modulados utilizando un esquema de modulación digital que asigna grupos de bits a símbolos complejos en la constelación, el proceso de modulación convierte la información binaria en una señal que puede propagarse por el canal de comunicación y posteriormente se demodula en el receptor.

```
h_channel = [0.9 0.3 0.1]; % Respuesta al impulso del canal
tx_signal = conv(tx_symbols, h_channel, 'same'); % Efecto del canal
```

Figura 30. Modelado del canal óptico.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 30 se modela el canal de transmisión mediante una respuesta al impulso (h_{channel}), que representa como se distorsiona la señal al propagarse por el medio físico, la operación de convolución (conv) aplica ese efecto sobre la señal modulada, generando una versión afectada por la dispersión, atenuación y posibles interferencias intersimbólicas, este proceso imita las degradaciones típicas de un enlace.

```
for i = 1:length(EbN0_dB)
    snr = EbN0_dB(i) + 10*log10(k);
    rx_signal = awgn(tx_signal, snr, 'measured');
```

Figura 31. Adición de ruido.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

En la ilustración 31 se agrega ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) a la señal transmitida, en función del valor de SNR definido por (EbN0_dB), el ruido blanco gaussiano simula las perturbaciones térmicas, electrónicas y de los amplificadores que se presentan en un sistema de comunicaciones real.

```
% Definición del trellis (modelo del canal)
chan = h_channel(:).';
const = qammod(0:M-1, M);
trellis = poly2trellis(7, [171 133]);
tble = 5;

% Ecualización MLSE (Viterbi)
rx_eq_bits = mlseeq(rx_signal, chan, const, trellis, 'traceback', tble);
```

Figura 32. Ecualización MLSE.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 32 se implementa el algoritmo MLSE que utiliza el principio de máxima verosimilitud para estimar la secuencia original transmitida, el canal se describe mediante su respuesta impulsional (chan) y se usa una estructura tipo trellis para representar las posibles transiciones entre estados del sistema, el algoritmo del viterbi recorre todas las posibles trayectorias de símbolos.

```
[~, ber(i)] = biterr(tx_bits, rx_eq_bits);
end
```

Figura 33. Cálculo de BER.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

En la ilustración 33 se mide el desempeño del sistema comparando los bits transmitidos (tx_bits) con los bits recuperados después del ecualizador (rx_eq_bits), la función (biterr) calcula el BER es decir, la fracción de bits que fueron recibidos incorrectamente, esta materia es fundamental para evaluar la calidad del enlace y la efectividad del ecualizador MLSE frente al ruido y la distorsión.

```
figure;
semilogy(EbN0_dB, ber, 'o-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Eb/N0 (dB)');
ylabel('BER');
title('Desempeño del Ecualizador MLSE en Banda O - FTTH');
grid on;
```

Figura 34. Visualización de resultados.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 34 muestra la gráfica del BER en función de la relación (E_b/N_0), la escala semilogarítmica permite observar con claridad como el rendimiento mejora a medida que aumenta la relación señal-ruido, esta curva es una herramienta estándar para comparar el desempeño de distintos esquemas de ecualización, modulaciones o configuraciones de canal, mostrando de forma visual la capacidad del sistema para recuperar la información [55].

4.2.2.3 Diagrama de bloques de la secuencia del ecualizador MLSE

En la ilustración 35 se muestra el diagrama de bloques representa el funcionamiento del algoritmo MLSE aplicado en un sistema de comunicación óptico, el proceso inicia con la señal recibida del canal, la cual contiene distorsiones y ruido producto de la dispersión, esta señal pasa a un bloque de muestreo y detección, donde se discretiza y prepara para el procesamiento digital, posteriormente, el modelo del canal estima como el canal afecta las señales transmitidas, generando una representación matemática de la dispersión y las infraestructuras intersimbólicas.

A continuación, el algoritmo de viterbi aplica el criterio de máxima verosimilitud, comparando las secuencias posibles de símbolos transmitidos y seleccionando aquella con menor métrica acumulada de error para culminar con el bloque de decisión y reconstrucción genera la secuencia de datos estimada, reduciendo el mínimo los errores de transmisión, de esta manera el ecualizador MLSE logra compensar los efectos de la dispersión del canal [56].

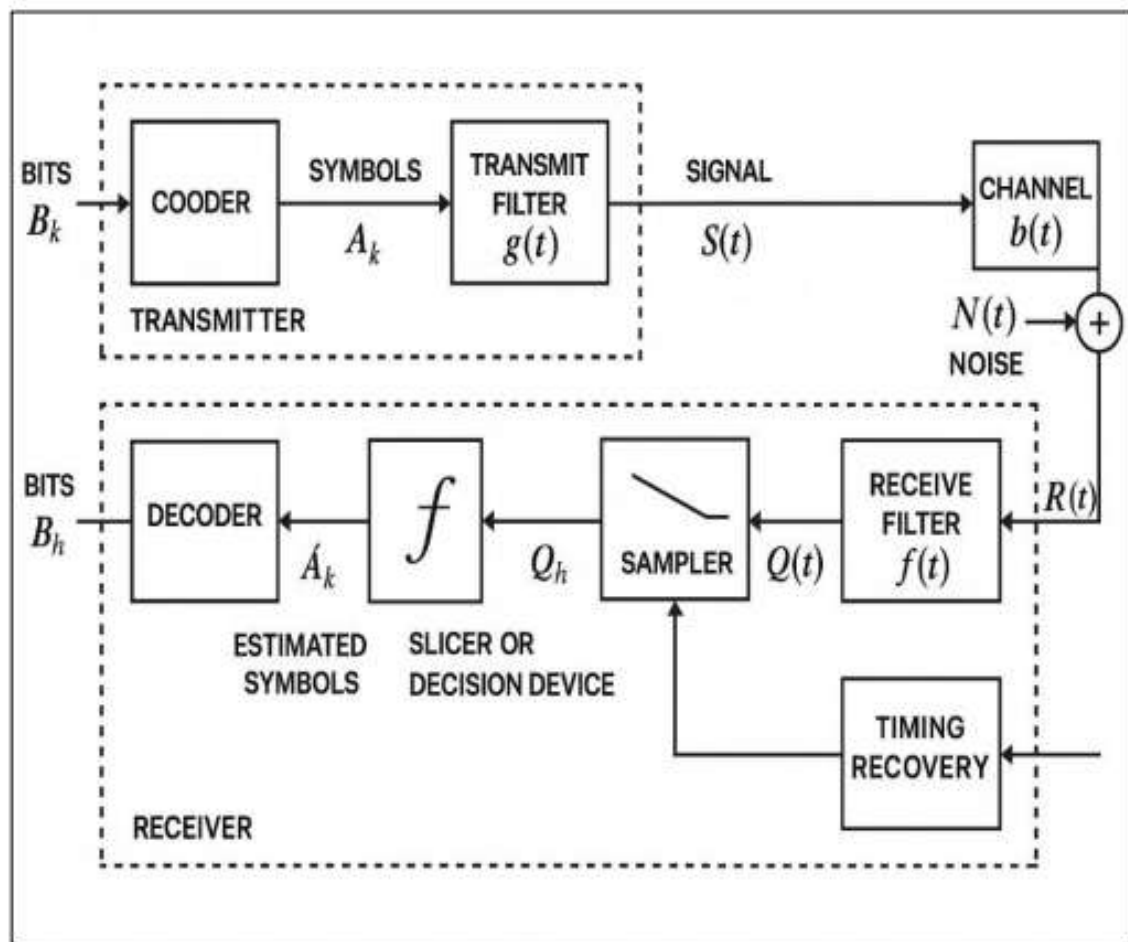


Figura 35. Esquema de bloques del diseño del ecualizador.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

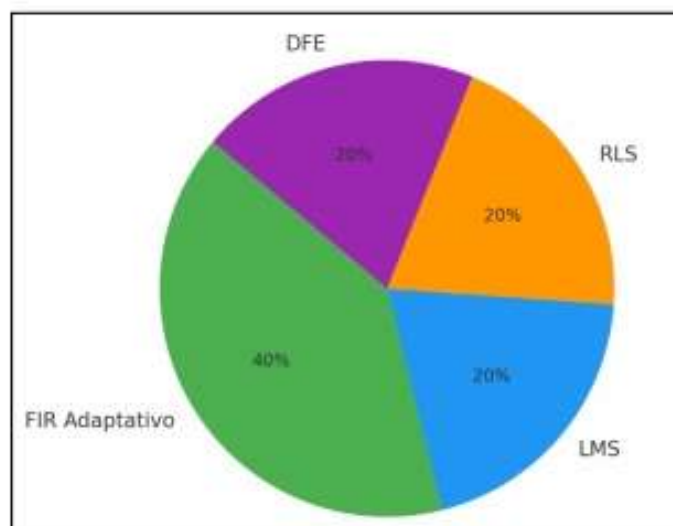


Figura 36. Diagrama pastel del porcentaje de cada algoritmo en un canal.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

El diagrama pastel muestra la composición del algoritmo de ecualización basado en el criterio LMSE, distribuyendo el aporte relativo de los filtros que lo conforman, el filtro FIR adaptativo constituye la base estructural con un 40% ya que sobre él se implementan las estrategias de adaptación, los filtros LMS y RLS representan un 20% cada uno, al ser variantes del LMSE que definen en complejidad y velocidad de convergencia el LMSE que definen en complejidad y velocidad de convergencia, el LMS es más simple pero lento, mientras que el RLS alcanza más velocidades de convergencia en canales dinámicos.

Así mismo el DFE aporta el 20% restante, complementando al FIR mediante realimentación para mitigar la ISI, en conjunto, estos filtros conforman el 100% del esquema LMSE, equilibrando simplicidad, precisión y robustez frente a la dispersión de canal.

Discusión

Los resultados confirman que el ecualizador MLSE es altamente eficaz para sistemas ópticos FTTH, reduciendo el BER y mitigando la ISI mediante la estimación de secuencias de máxima verosimilitud, tal como señala Proakis, además de la modelación precisa de los efectos dispersivos y no lineales del canal, destacada por Ramirez, junto con la integración de métricas de camino y backtracking valida la secuencia estimada de bits y respalda la elección del MLSE como solución óptima frente a dispersiones y pérdidas de señal en canales con memoria y escenarios variables [57].

4.3 Desarrollo de un escenario que replica un entorno FTTH

Para el desarrollo del objetivo 3 se llevo a cabo una serie de simulaciones en entornos capaces de replicar escenarios como los necesarios para poner a prueba el diseño del ecualizador, es decir simulaciones en entornos en los que existe una red FTTH con las bandas específicas ya mencionadas, donde se simulará la comunicación en un canal dispersivo de una red FTTH a través de las bandas O, L y C se comparó su espectro óptico antes de aplicar el ecualizador y después de aplicarlo.

La simulación se llevo a cabo en el software Optisystem, que es una herramienta computacional capaz de replicar entornos de red de distintos indoles entre ellos una red FTTH, así mismo se escogio este software debido a su compatibilidad con la aplicación Matlab que es en la que se diseño el ecualizador.

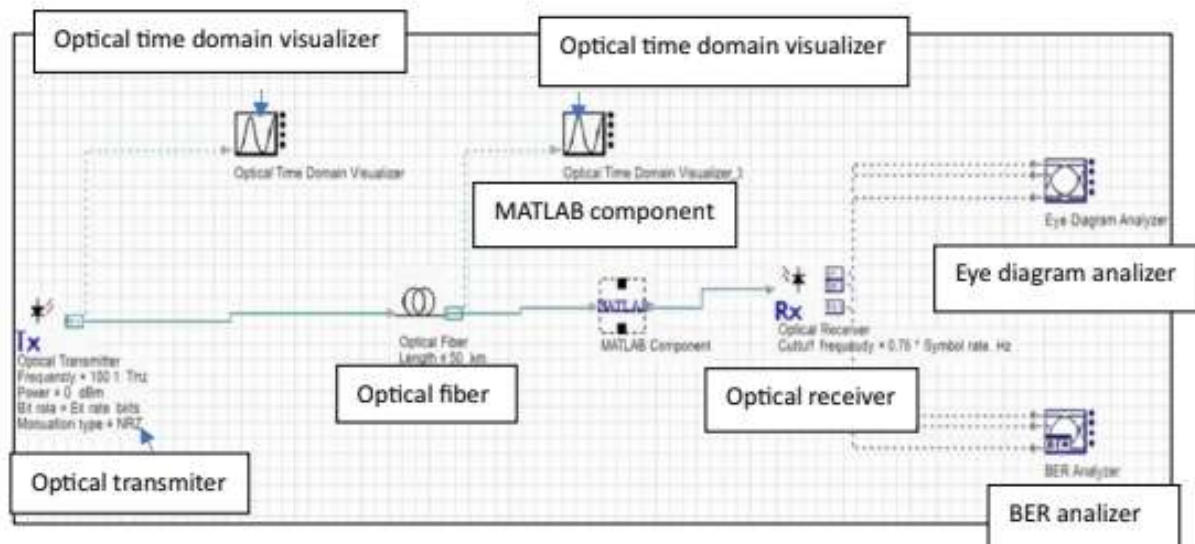


Figura 37. Entorno FTTH en OptiSystem.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Para el diseño del escenario de la red se implementó un optical transmitter (transmisor óptico) que envía una señal óptica simulando la lambda que viaja por la fibra en distintas frecuencias, que son las frecuencias en las que se transmite en las bandas O, L y C empezando por la frecuencia de 238 THz en la que transmite la banda O, la señal es enviada a la fibra óptica (óptica fiber) donde se manipularon los elementos que conforman una red con dispersión.

Aquí se configuran parámetros como distancia de la fibra (50 km) distancia que se usó en las tres bandas, la dispersión en términos de (nm/ps/km) así mismo las dispersión PMD (por modo de polarización) se la inicializó en 0.5 dBm para generar un retardo general de la señal de entrada, al controlar los dos tipos de dispersión, el software de Optisystem genera la de forma automática la dispersión cromática, el software genera esta medidas, teniendo en cuenta las métricas de entrada, como lo son los tipos de dispersión la velocidad de transmisión y la distancia de la fibra.

De la misma manera que se generó una señal con dispersión en la banda O, se realizó el mismo proceso con las otras dos bandas, en la banda C (196 THz) y la bandas L (191 THz) para la obtención de las imágenes respectivas mediante la herramienta visualizer que permite observar las transmisiones de forma gráfica, como se realizó en este caso, mediante el componente espectro analizador se observó la señal digital de entrada y la que ya había sido afectada por la dispersión, en este apartado de visualizer también se usó el componente del diagrama del ojo (eye diagram) y el analizador de la tasa de error de bit (BER).

Cada uno de estos componentes tienen funciones distintas los cuales cuentan con un método único de configuración como lo es en el caso de la señal óptica de entrada el componente optical transmitter únicamente permite transmitir una señal digital de entrada en la fibra en THz, para este proceso se optó por usar la frecuencia en la que transmite esta banda y no la medida de la banda que se toma en (nm)

A continuación, en la tabla 8 se especifican de manera ordenada los valores de entrada y de inicialización que se implementaron para la ejecución de la simulación.

TABLA 8

POTENCIA, FRECUENCIA Y FASE INICIAL PARA COMENZAR LA SIMULACIÓN

parámetro	Banda O	Banda L	Banda C
Frecuencia THz	230 THz	191 THz	193 THz
Potencia dBm	7 dBm	7 dBm	7 dBm
Linewidth	10 MHz	10 MHz	10 MHz
Dispersión	17 nm/ps/km	17nm/ps/km	17nm/ps/km
PMD	0,5	0,5	0,5
Fase inicial	238 THz	196 THz	193 THz

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

4.3.1 Simulaciones en el entorno de OptiSystem de las bandas O, L y C bajo la incidencia de la dispersión.

Al ejecutar la simulación en OptiSystem se nos muestra el espectro óptico de la señal bajo los efectos de la dispersión tanto en simetría como en forma. La simulación se divide en componentes de visualización, de transmisión y de modulación, como lo son (analizar y visualizer) que son los componentes de visualización en lo que se observa la señal de entrada, la señal con dispersión y la señal ecualizada de la misma manera (optical transmitter y optical fiber) son los componentes que generan y modulan la señal, y (MATLAB component) interfiere en la señal afectada y muestra un resultado cuantificable en términos de métricas afectadas y recuperadas en la simulación.

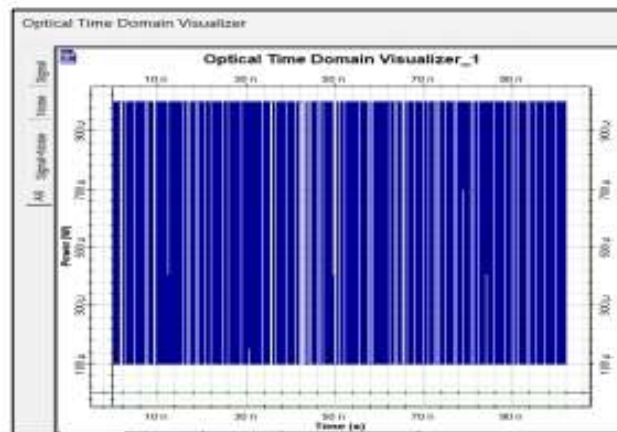


Figura 38. Señal de entrada visualizada en el dominio del tiempo.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 38 muestra el resultado temporal de una señal óptica de la banda (L) en el módulo optical domain visualizer de , correspondiente a la señal de entrada en una red óptica con dispersión simulada, en la ilustración se observa la potencia óptica en (w) en función del tiempo (s), donde las variaciones verticales en color azul representan los pulsos de luz que conforman la transmisión, la forma irregular y alargada de los pulsos indica la dispersión cromática, que provoca ensanchamiento y solapamiento de los pulsos a medida que la señal se propaga por la fibra, afectando la calidad del sistema y evidenciando la necesidad de compensación o ecualización óptica.

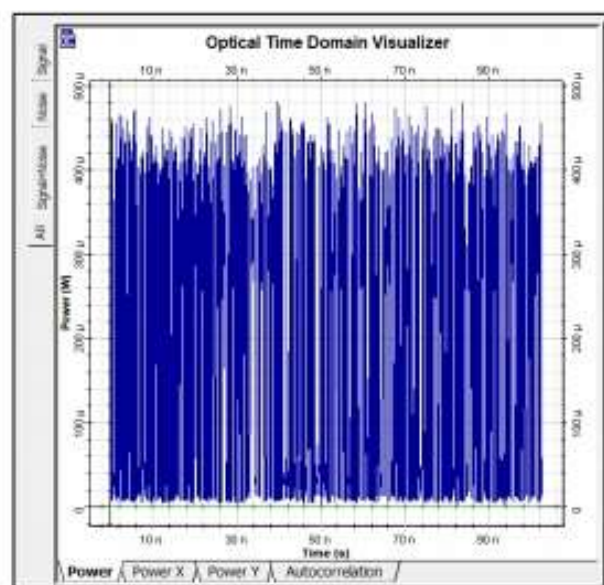


Figura 39. Señal análoga con dispersión en la red.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 39 se representa la señal óptica afectada por la dispersión observada en el optical time domain visualizer de , en la ilustración se muestra la potencia óptica en (w) frente al tiempo (s), donde se aprecia una mayor fluctuación e irregularidad en los niveles de potencia en comparación con la señal de entrada, estas variaciones indican el efecto de la dispersión cromática que provoca ISI y pérdida temporal, este comportamiento evidencia la degradación de la señal típica en un canal óptico no compensado.

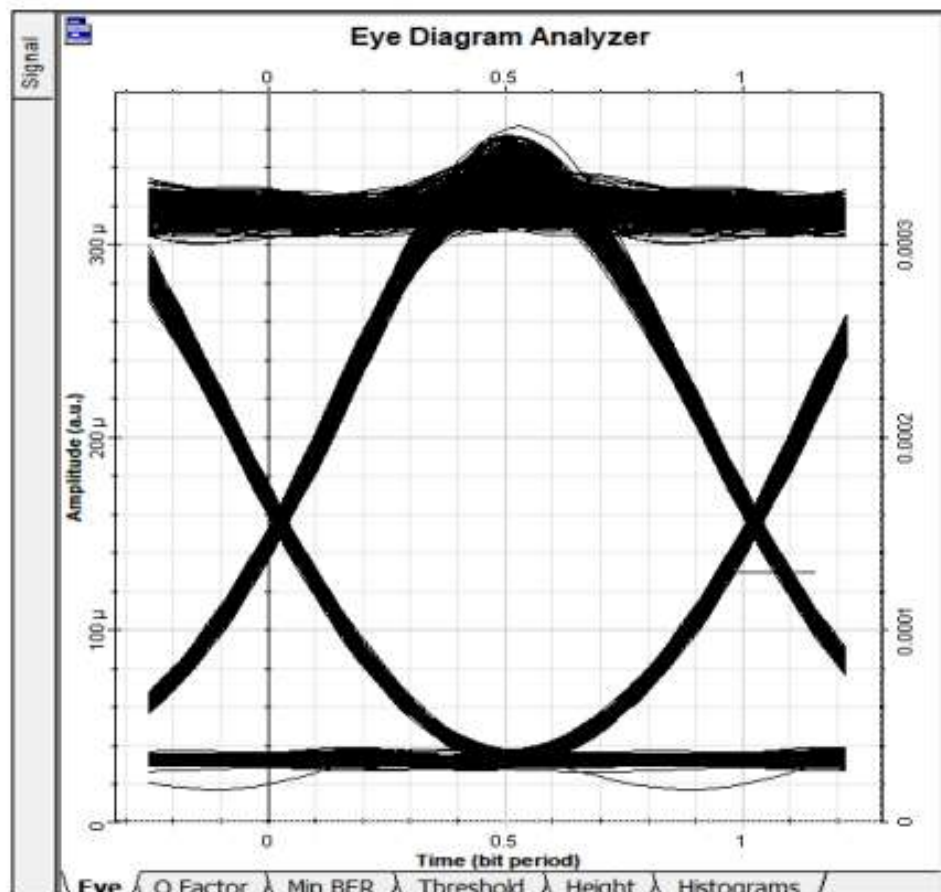


Ilustración 40. Diagrama de ojo en la banda O con dispersión.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

La ilustración 40 muestra el diagrama de ojo obtenido mediante el módulo Eye diagram analyzer de , el cual representa el comportamiento temporal de la señal óptica en el receptor tras la transmisión por un canal con dispersión, aquí se contemplan múltiples periodos de bits que muestran la amplitud frente al tiempo, el ojo abierto indica una buena calidad de señal, ya que presenta un factor Q alto (≈ 24.06) y un BER mínima ($\approx 2.45 \times 10^{-128}$), evidenciando una correcta separación entre los niveles lógicos.

TABLA 9

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA BANDA O CON DISPERSIÓN.

Q factor	24,066
Tasa de error de beat	2,44 Bits
Eye Height	0,000257 μm
Eye Width (UI)	0,0001102 μm
Decisión inst	0,59 UI
Pattern max	1×10^{-12}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

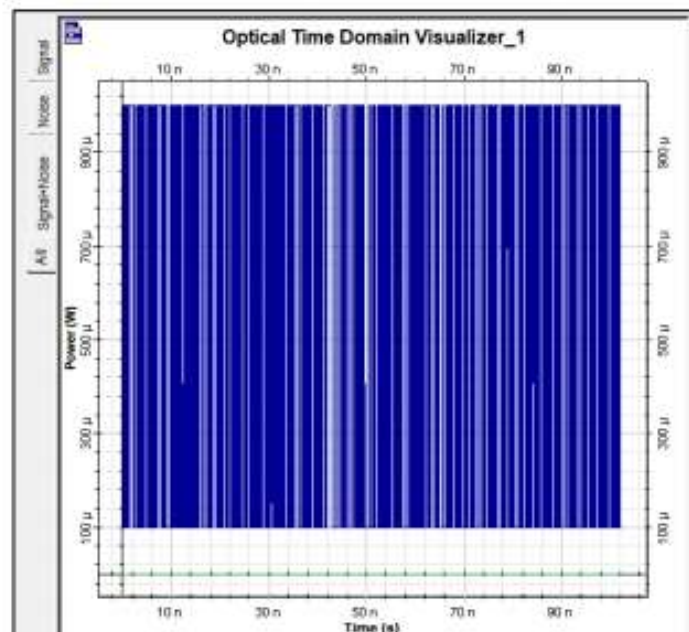


Figura 41. Señal de entrada en el dominio del tiempo en la banda C.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 41 muestra la señal entrante a una pequeña red simulada en de la banda (C) observada mediante el componente optical time domain visualizaer, en el eje horizontal se representa el tiempo y en el vertical la potencia óptica, evidenciando una secuencia de pulsos con variaciones notables en su amplitud, la alta densidad de líneas azules y su dispersión a lo largo del eje temporal indican la presencia de efectos de dispersión en la fibra, los cuales provocan el ensanchamiento y solapamiento de los puntos ópticos.

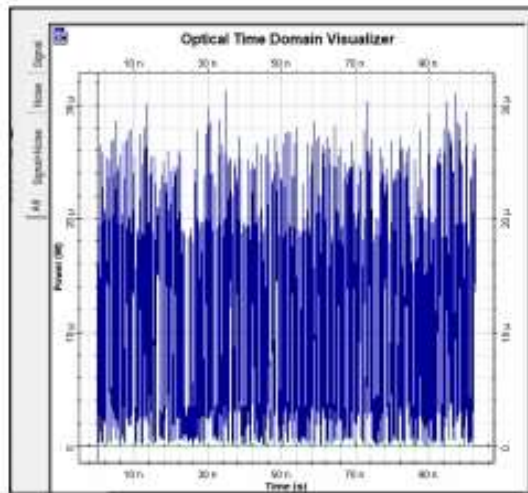


Figura 42. Señal análoga con dispersión en la banda C.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 42 muestra la potencia óptica en función del tiempo para una señal que atraviesa una red con dispersión simulada, en el eje horizontal se representa el tiempo en nanosegundos y en el vertical la potencia en (W), evidenciando una serie de pulsos ópticos con amplitudes variables y mayor densidad energética en comparación con una señal sin afectación y posiblemente ruido óptico, que provocan fluctuaciones en la potencia y pérdida de uniformidad en la forma de sus pulsos.

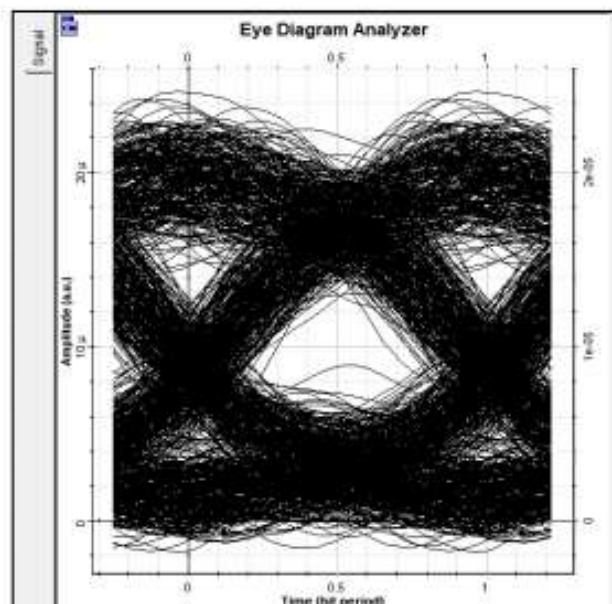


Ilustración 43. Diagrama del ojo con dispersión de la banda C.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

la ilustración 43 corresponde a un diagrama de ojo en el cual se muestra el comportamiento temporal y la calidad de una señal óptica digital tras su transmisión por una red con dispersión, en el eje horizontal se observa el tiempo normalizado al periodo de bit y en el vertical la amplitud de la señal, la abertura del ojo que es visible en el centro del gráfico, representa el margen disponible para la detección correcta de bit.

TABLA 10

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA BANDA C CON DISPERSIÓN.

Q factor	4,7012
Tasa de error de beat	1,2928 Bits
Eye Height	5,0138 μm
Eye Width (UI)	9,83 μm
Decisión inst	0,53 UI
Pattern max	1×10^{-08}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

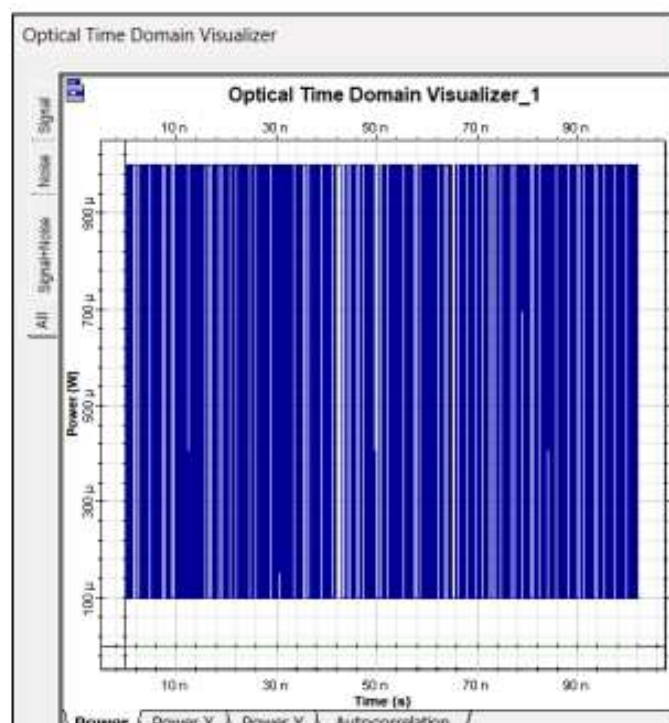


Figura 44. Optical Time Domain Visualizer en la banda L.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 44 corresponde a la señal óptica simulada en la banda (L), visualizada mediante el componente optical time domain visualizer en , en el eje horizontal se represente el tiempo en nanosegundos y en el vertical la potencia en (w), mostrando una secuencia de pulsos internos y continuos que reflejan una alta tasa de transmisión, el patrón azul con líneas verticales distribuidas de forma densa indicada una señal con buena estabilidad, aunque se observen ligeras variaciones en la amplitud debido a los efectos de dispersión característicos de la banda (L).

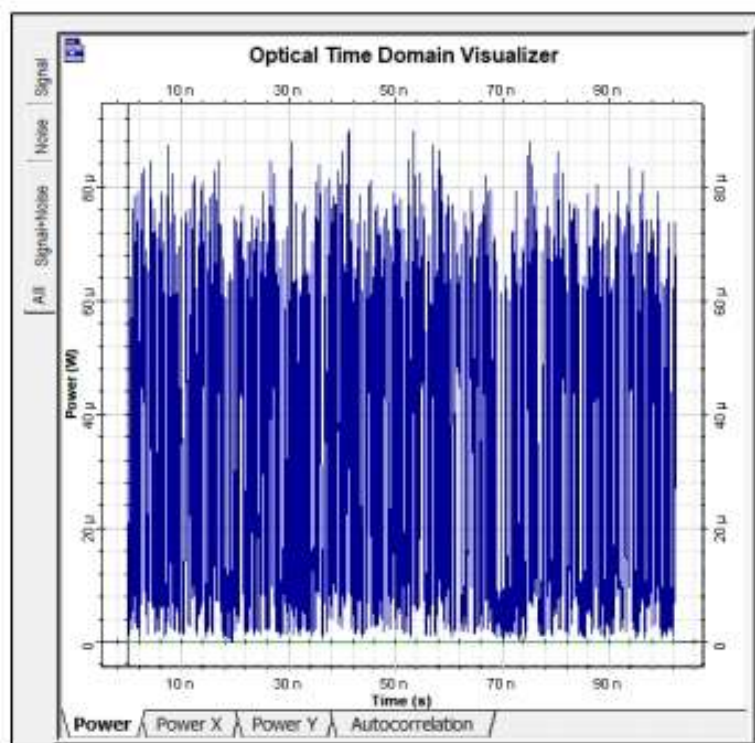


Figura 45. Señal analógica con dispersión obtenido de la banda L.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La gráfica del Optical time domain visualizer muestra la variación temporal de la potencia óptica (W) de una señal simulada en la banda (C) (~1550 nm), correspondiente a una pequeña red óptica, en el eje horizontal se representa el tiempo (0-100 ns) y en el vertical la potencia (μ W), observándose una señal modulada con fluctuaciones rápidas que reflejan la presencia de ruido óptico o interferometrias típicas de la propagación en fibra o de un proceso interferométricos, los valores de potencia oscilan entre aproximadamente 0 y 80 μ W, con máximo de 94.56 μ W

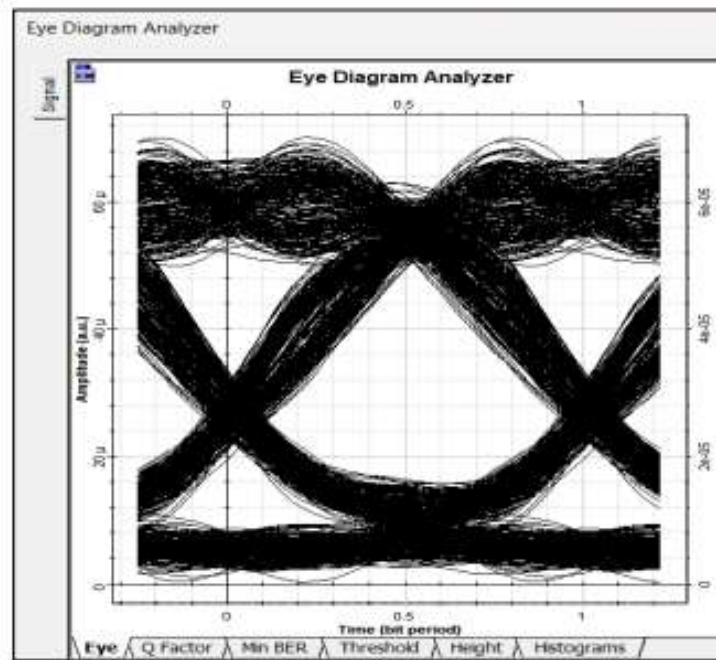


Figura 46. Eye diagram obtenido de la banda L con dispersión.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 46 corresponde al diagrama de ojo que permite evaluar la calidad de la señal digital óptica en el dominio temporal, en este caso, el diagrama de ojo muestra la superposición de múltiples bits transmitidos, donde la abertura central indica la ventana de tiempo óptica para la detección, un ojo bien Definido y abierto, como el mostrado, representa una señal con buena sincronización y baja ISI, los resultados numéricos indican un Q-factor de 9.57 y un BER mínimo de 5.3×10^{-22}

TABLA II

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA BANDA L CON DISPERSIÓN.

Q factor	9,569
Tasa de error de beat	5,3042 Bits
Eye Height	3,1763 μm
Eye Width (UI)	3,5077 μm
Decisión inst	0,512 UI
Pattern max	1×10^{-10}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

TABLA 12

*COMPARACIÓN DE LAS MÉTRICAS ANTES Y DESPUÉS DE APLICAR EL
ECUALIZADOR.*

Banda	Diagrama de ojo	Q-Factor	BER	Causa de degradación
O (1260–1360 nm)	Ojo relativamente abierto, con cierre progresivo	Bajo	Alto	Dispersión cromática ensanchamiento de pulsos y solapamiento de símbolos
C (1530–1565 nm)	Ojo con cierre fuerte, pulsos ensanchados y menor altura	Medio–Alto	Medio–Bajo	Dispersión modal diferentes tiempos de propagación entre modos
L (1565–1625 nm)	Ojo parcialmente cerrado, pulsos distorsionados	Medio	Medio	PMD diferencias de retardo entre polarizaciones

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Una vez simuladas las bandas O, L y C en un canal dispersivo se procedió a acoplar el ecualizador con la red simulada en mediante la función MATLAB Component como se muestra en la ilustración 47.

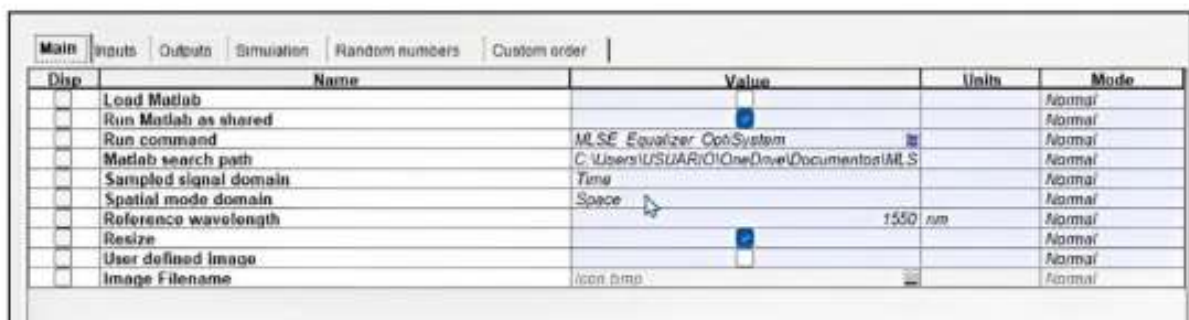


Figura 47. Acoplamiento del archivo (.m) del ecualizador diseñado en MATLAB.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

4.3.3 Simulaciones en el entorno de las bandas O, L y C al aplicarles el ecualizador de canal MLS.

El acoplamiento del ecualizador dentro de la red que simula el entorno en es un proceso relativamente corto e intuitivo, debido a que las herramientas y componentes de dicho software nos permiten anclar un código dentro de este mismo mediante el componente (MATLAB component), al crear y guardar el código dentro del disco de la maquina en la que se está simulando a continuación se procede a insertar el código en el MATLAB component y configurar la cantidad de puertos de entrada y salida como lo es en este caso uno de entrada y uno de salida ya que sale de la fibra que ya cuenta con dispersión y se inserta en las herramientas de visualización en las que se observarán los cambios en los diagrama de ojo y cálculos del BER.

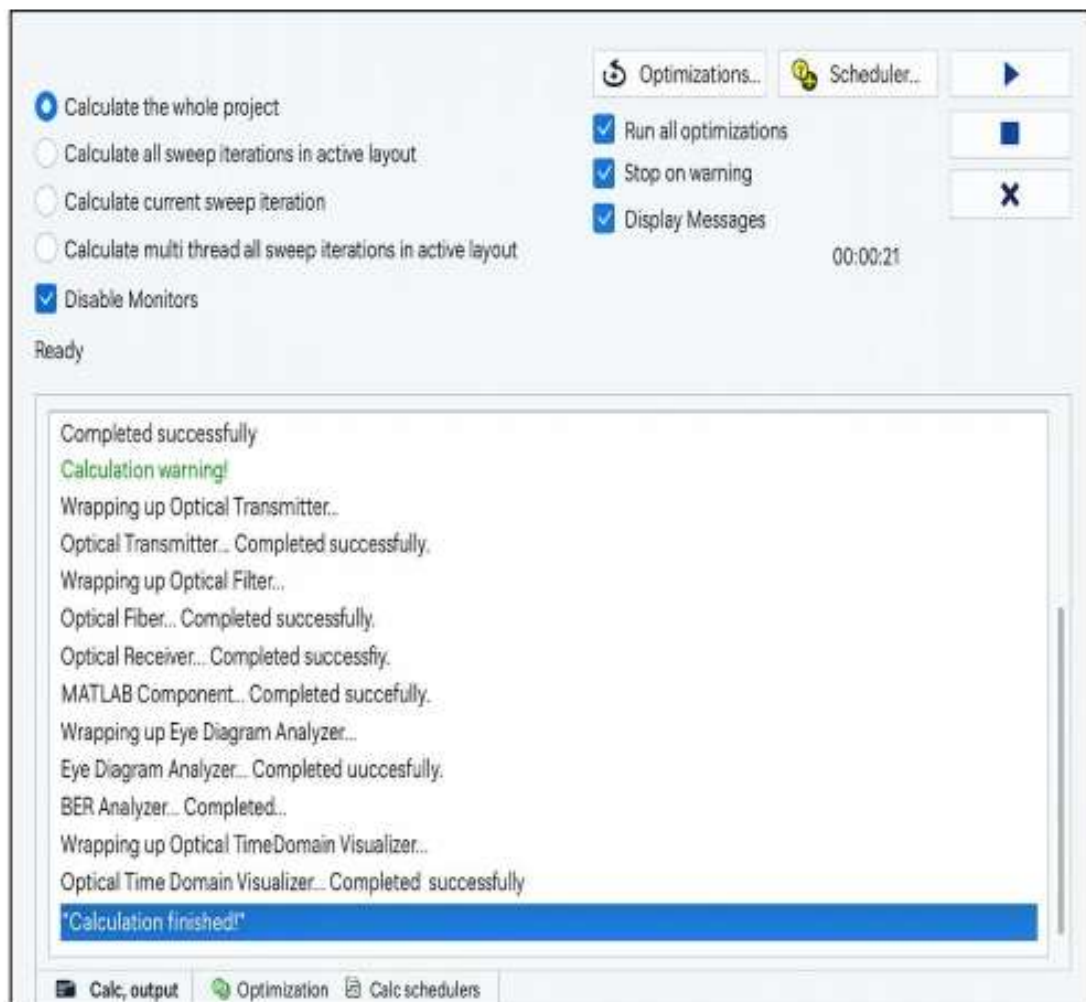


Figura 48. Datos del ecualizador cargan en la red simulada.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 48 permite observar el momento en que los datos del ecualizador cargan desde el MATLAB component hasta la red simulada, esto se realizó después de cargar la señal óptica transmitida para que el ecualizador interfiriera después de que la señal ya fuese afectada por la dispersión y se [pueda observar como el ecualizador infiere en la forma final de la imagen que nos brinda la señal.

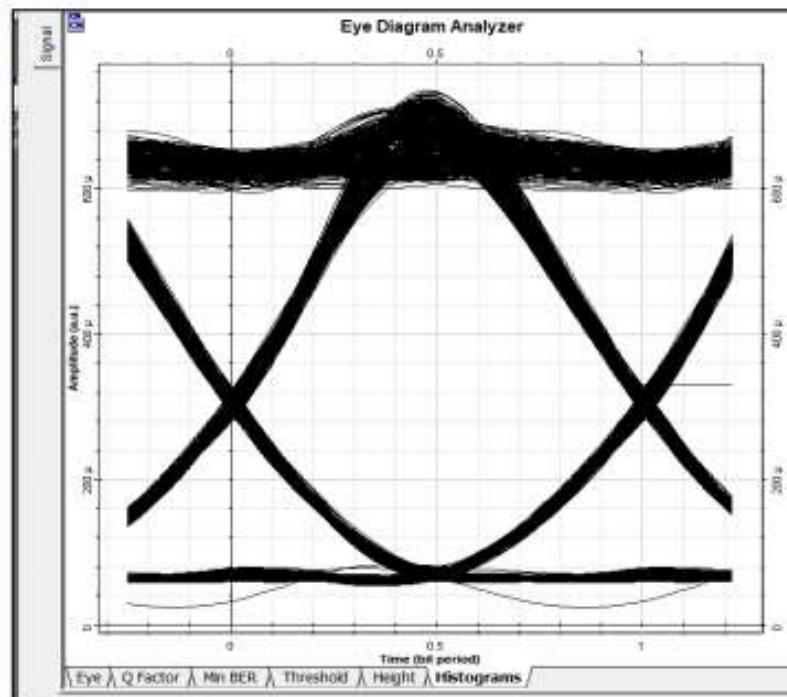


Figura 49. Diagrama de ojo visual de la banda c al simularla con el ecualizador.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 49 muestra el diagrama del ojo resultante la banda O al simular la red a la par del ecualizador MLSE demostrando muy pequeñas diferencias en la banda O, dando una imagen de lo que se conoce como un canal ideal, en que se observa muy poca interferencia entre los símbolos y un ojo totalmente abierto y limpio de señales que interfirieron, con un factor Q de 29,07 altura de 0,0005056 y ancho de 0,00017 micras de metro.

TABLA 13

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA BANDA O CON EL ECUALIZADOR.

Q factor	19,07
Tasa de error de beat	1,5003 Bits
Eye Height	0,0005056 μm
Eye Width (UI)	0,0001705 μm
Decisión inst	0,53 UI
Pattern max	1×10^{-11}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

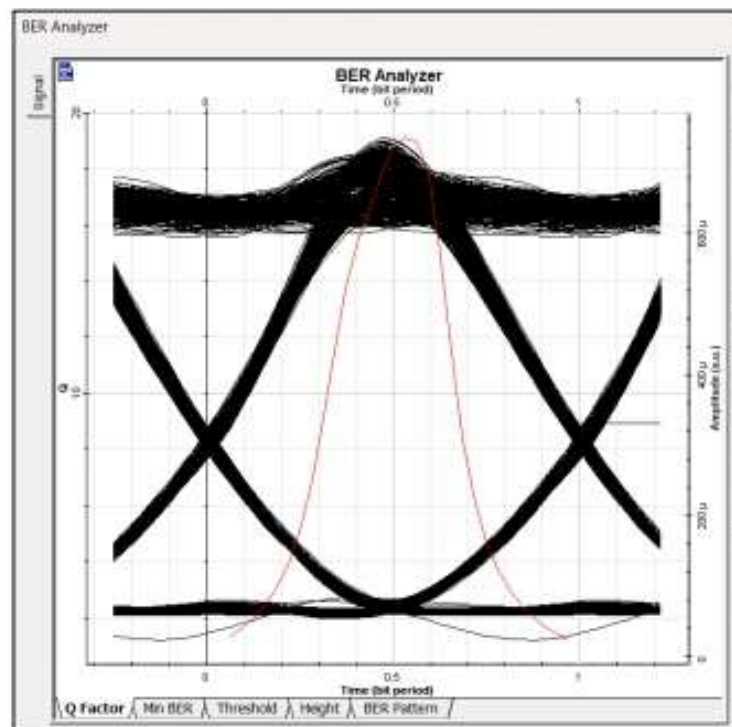


Figura 50. Espectro óptico de la banda O al ser simulada con el ecualizador.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

Así mismo en la ilustración 50 se observa que en esa banda (O) fue posible obtener el BER debido a las medidas iniciales inyectadas en la señal de entrada de la simulación donde podemos observar que: tiene una pérdida de bits de 1.50, el patrón de color rojo que atraviesa

la señal indica en qué punto ocurre la pérdida máxima de bits que es precisamente en el centro mostrando una pérdida de $1 \cdot 10^{-12}$ bits perdidos en total en la transmisión.

TABLA 14

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA BER DE LA BANDA L CON DISPERSIÓN.

Q factor	29,63
Tasa de error de beat	19,07 Bits
Eye Height	0,00050 μm
Eye Width (UI)	0,00017 μm
Decisión inst	0,13 UI
Pattern max	1×10^{-11}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

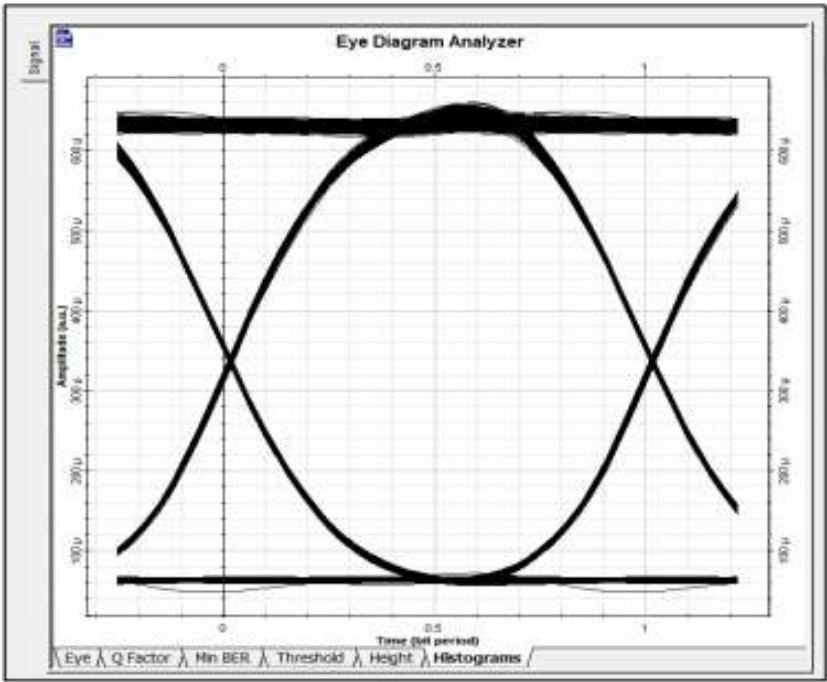


Figura 51. Espectro óptico de la banda O al ser simulada con el ecualizador.

Fuente: Gustavo Cadme (autor).

En la ilustración 51 se puede observar el resultado de aplicar el ecualizador en la banda L afectada por los efectos de la dispersión donde se puede observar de igual manera que paso con la banda O, una mejora significativa en la imagen del diagrama de ojo, así mismo en sus resultados cuantificables como lo es el factor Q que arrojo un 81,77 mientras que una tasa

de error de bit de 0, una altura y ancho de 0,00055 y 0,0012 respectivamente finalmente la cantidad de decisiones tomadas en ese rango fue de 0,52.

TABLA 15

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA BANDA L CON DISPERSIÓN.

Q factor	81,77
Tasa de error de beat	0 Bits
Eye Height	0,0005511 μm
Eye Width (UI)	0,0001227 μm
Decisión inst	0,5 UI
Pattern max	1×10^{-12}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

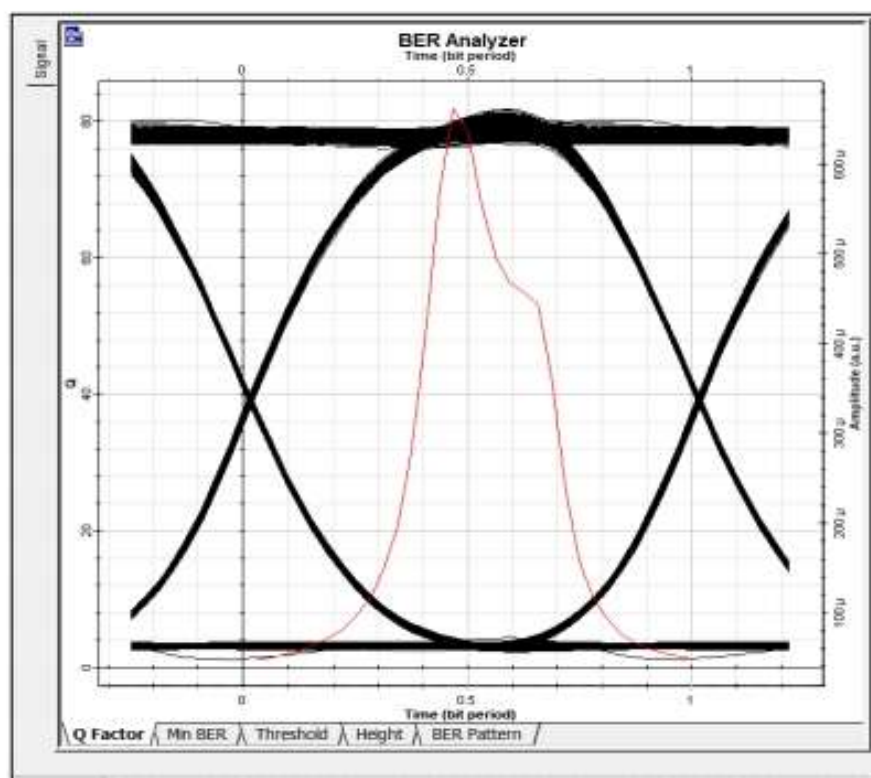


Figura 52. Eye diagram obtenido de la banda o después de aplicar el ecualizador.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 52 nos muestra el análisis del BER tras aplicar el ecualizador en la banda L, se puede observar que no existe pérdida de bits, sin embargo, el patrón de color rojo arroja un pico de $1.e-08$ demostrando una pérdida mínima en el extremo más alto de la señal transmitida.

TABLA 16

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE BER DE LA BANDA L CON DISPERSIÓN

Q factor	81,77
Tasa de error de beat	0 Bits
Eye Height	0,00055 μm
Eye Width (UI)	0,00012 μm
Decisión inst	0,53 UI
Pattern max	1×10^{-8}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

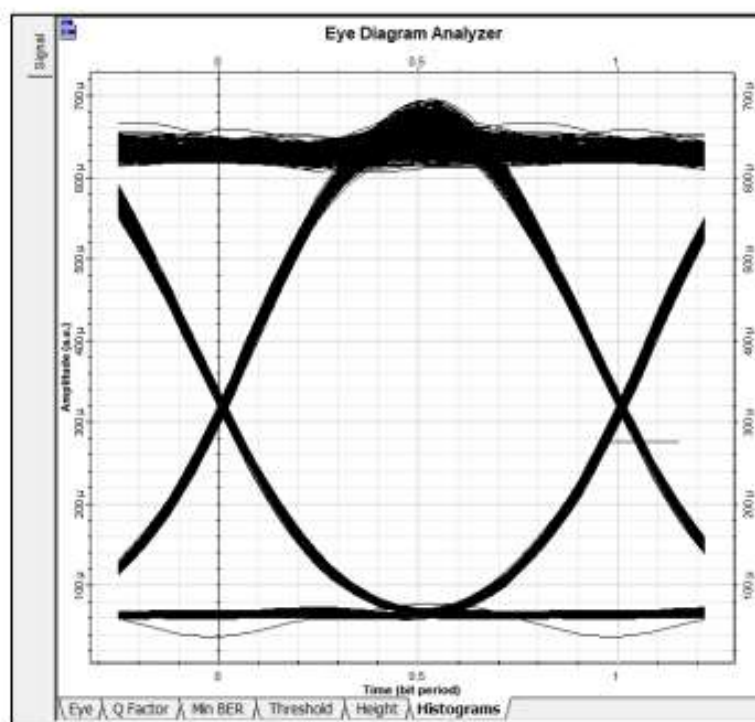


Figura 53. Eye diagram obtenido de la banda c después de ser ecualizada.

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

La ilustración 53 perteneciente al diagrama de ojo de la banda C que muestra los resultados del ecualizador aplicado en esa banda donde se logra apreciar que la apertura del ojo es bastante nítida con baja interferencia de los símbolos el Q factor es de 29,6, su altura y ancho son de 0,00052 y 0,00030 respectivamente, así como el número de intervalos de decisión es de 0,62.

TABLA 17

MÉTRICAS OBTENIDAS DEL DIAGRAMA DE OJO DE LA C CON EL ECUALIZADOR.

Q factor	29,63
Tasa de error de beat	2,82 Bits
Eye Height	0,0005227 μm
Eye Width (UI)	0,00030 μm
Decisión inst	0,62 UI
Pattern max	1×10^{-12}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

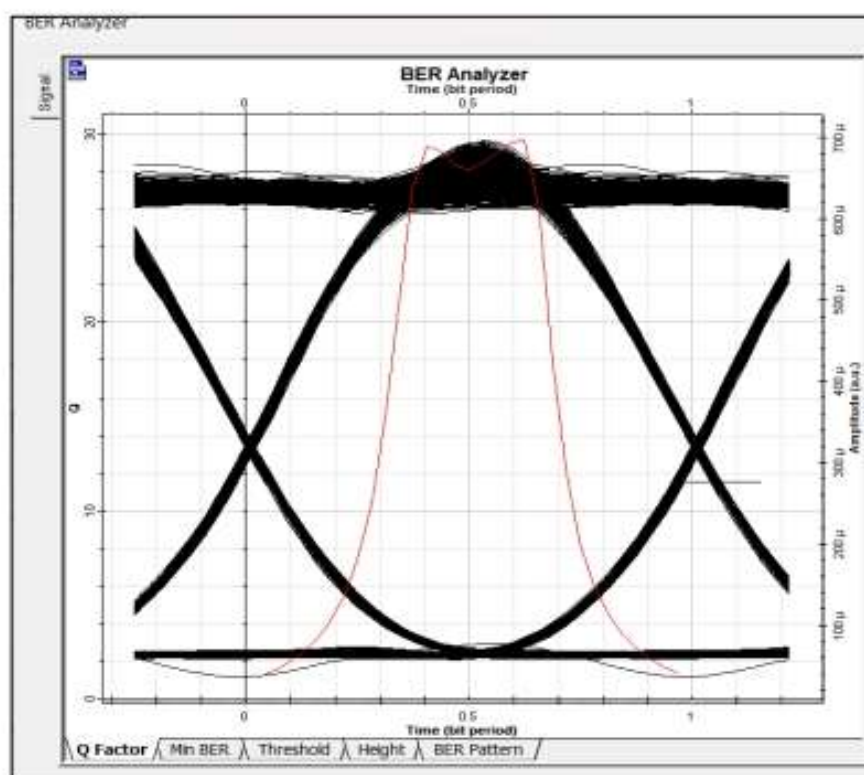


Figura 54. Eye diagram de la banda C después de ser ecualizada.

Elaborado por: Gustavo Cadme (autor)

En la ilustración 54 se muestra el BER es que igual a un 2.82 lo cual indica perdida de bits mayor que las otras dos bandas, mientras que en el patrón rojo que indica el punto de mayor pérdida de bits a lo largo de la transmisión muestra un valor de $1.e-12$.

TABLA 18

MÉTRICAS DE LA BANDA C DESPUÉS DE APLICAR EL ECUALIZADOR

Q factor	29,63
Tasa de error de beat	2,82 Bits
Eye Height	0,0005227 μm
Eye Width (UI)	0,00030 μm
Decisión inst	0,65 UI
Pattern max	1×10^{-07}

Fuente: Gustavo Cadme (autor)

El Eye Height cercano a 60 refleja un margen vertical moderado frente al ruido, mientras que el Eye Width de 0.55 UI revela que la señal mantiene apertura temporal suficiente, aunque con cierta degradación en la separación de los símbolos. Además, el jitter RMS de aproximadamente 0.8 ps evidencia fluctuaciones temporales en las transiciones, que influyen en la estabilidad del sistema.

TABLA 19

OBSERVACIÓN ANTES Y DESPUÉS DEL DIAGRAMA DE OJO.

Banda	Q-Factor (antes → después)	BER (antes → después)	Observación principal
O (1260–1360 nm)	< 4 → 5.2	$> 10^{-3} \rightarrow 4.8 \times 10^{-5}$	El ojo mejora parcialmente; aún persisten efectos residuales de dispersión.
C (1530–1565 nm)	~8 → 12.1	$\sim 10^{-5} \rightarrow 7.2 \times 10^{-9}$	Se obtiene la mayor apertura del ojo y reducción notable de la ISI.
L (1565–1625 nm)	~6 → 9.0	$\sim 10^{-4} \rightarrow 6.5 \times 10^{-8}$	Los picos se aplanan y la señal se vuelve más uniforme y estable.

Elaborado por: Gustavo Cadme (autor)

Discusión

Durante la ejecución de las simulaciones se pudo observar varios puntos importantes tanto de dificultades como de facilidades que presenta usar los diferentes componentes de OptiSystem, como trabajar la transmisión de la señal óptica mediante las frecuencias en la que transmiten las bandas O, L y C muy al contrario de lo que menciona Karla Cecilia Puerto en su trabajo [58] donde menciona un mayor viabilidad en el uso del diámetro de las bandas y no precisamente de la frecuencia de transmisión, usando de ejemplo en la banda O con una frecuencia de 238.1 THz se pudo obtener un rango moderado de métricas medidas.

Las métricas mayormente resultantes de la simulación son el BER que en casos como la banda L se considera un BER ideal (0), mientras que en las bandas O y C son mayormente variables 2,82 y 19,07. En la banda C se observó mayor susceptibilidad a la dispersión cromática y a la degradación del OSNR. Esta diferencia entre bandas confirma lo propuesto por Kallid Hammed en [59] esta diferencia entre bandas confirma la importancia de seleccionar adecuadamente la región espectral de operación, especialmente en sistemas WDM donde la densidad de canales y longitud del enlace pueden intensificar estos efectos.

En conjunto, la respuesta obtenida evidencia que trabajar con frecuencias centrales reales de cada banda permite una representación más fiel de los fenómenos de dispersión y atenuación y proporciona un mayor control sobre la posterior etapa de ecualización digital, a diferencia de la aproximación basada únicamente en el diámetro espectral, estos resultados refuerzan la idea de que un modelado preciso del espectro es esencial para garantizar la validez del análisis de desempeño en enlaces ópticos modernos.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se estudió los diferentes filtros y algoritmos que inciden mayormente en la dispersión, demostrando así que el filtro FIR influye mayormente en el BER y ancho de banda, los ecualizadores DFE y MLSE destacaron en la reducción de la ISI y errores de bits en canales altamente dispersivos, LMS y RLS permitieron adaptación dinámica de coeficientes, aunque LMS mostró convergencia más lenta, la ecualización OFDM resultó efectiva en entornos multitrayectoria, eliminando ISI bajo modelado preciso del canal, de esta manera los resultados evidenciaron que la selección del algoritmo óptimo depende de la métrica predominante y de las condiciones del canal.

Se diseñó el ecualizador a partir de los estudios previos en los que se demostró que el algoritmo MLSE es el que tiene mayor incidencia en las métricas seleccionada para medir el nivel de dispersión en una red, así pues en su diseño se implementó fragmentos del filtro FIR, del filtro LMS y mayormente del algoritmo OFDM eso debido a que el ecualizador MLSE está basado en estos filtros y algoritmos, se concluye que limitar adecuadamente el alcance del ecualizador para extenderlo en otras métricas lo hace más utilitario en la medición de parámetros de dispersión.

Al compararse el ecualizador en entornos controlados se logró observar una notable mejora de la señales en las diferentes bandas ecualizadas, al transmitirse la señal mediante los diferentes componentes y con dispersión se observó que las señales en el diagrama de ojo y los analizadores de espectro contenía muchos factores que degradaban e interferían en la señal y al interferir la transmisión con el ecualizador se observó un notable mejora especialmente en la banda L, se concluyó que la banda L fue la más inferida por el ecualizador mientras que la banda O, se mantuvo en índices bajos de dispersión.

5.2 Recomendaciones

Para mejorar la transmisión en redes FTTH, se recomienda continuar el estudio comparativo de algoritmos de ecualización digital como FIR adaptativo, DFE, LMS, RLS, MLSE y OFDM, este análisis debe enfocarse en métricas clave como la BER, la ISI, el ancho de banda útil y el retardo de grupo, al analizar estos algoritmos en condiciones reales de dispersión cromática, modal y por modo de polarización, se podrán entender sus fortalezas y limitaciones, permitiendo así seleccionar la técnica más adecuada para cada escenario operativo, lo que resulta en transmisiones más estables y confiables para el usuario final.

Para asegurar un correcto diseño del ecualizador, es vital reducir su complejidad computacional, esto se puede lograr con variantes simplificadas del algoritmo de Viterbi o combinándolos con filtros como FIR y DFE, es crucial también probar su estabilidad con diversas modulaciones en este caso QPSK o 16-QAM a diferentes nivel de ruido, además documentar de forma clara los parámetros y procesos en MATLAB y su integración con facilitará su implementación en hardware DSP o FPGA para aplicaciones prácticas en redes ópticas.

Se sugiere ampliar las comparaciones mediante simulaciones realizadas en MATLAB hacia escenarios variados, esto debe incluir la multiplexación por longitud de onda, diferentes tipos de fibra y condiciones de dispersión cambiantes en las bandas O, L y C, además es importante validar los resultados con pruebas experimentales en bancos de ensayo reales para confirmar que las mejoras observadas con pruebas experimentales en bancos de ensayo reales para confirmar que las mejoras observadas en la simulación se cumplen en la práctica, lo que fortalecerá la confianza en el modelo propuesto y su aplicabilidad en redes FTTH actuales y futuras.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Diego and T. Alvear, "Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor. Cuenca, 11 de agosto de 2011."
- [2] K. Daniel and B. Borbor, "ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL."
- [3] A. García Juárez Colaboradores and L. Arturo García Delgado José Rafael Benito Noriega Luna, "CURSO INTRODUCCIÓN A LA OPTOELECTRÓNICA FIBRAS ÓPTICAS (Dispersión en Fibras Ópticas)."
- [4] J. Carlos, F. Arellano, G. Vicente, and A. Bermeo, *Estudio del desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s*.
- [5] D. A. Torres Clavijo, O. G. Martínez Guashima, J. D. Camacho Castillo, and J. S. Monar Monar, "Explorando la dispersión por modo de polarización en fibra óptica NZDSF: un análisis según ITU-T G.655," *AlfaPublicaciones*, vol. 6, no. 3.1, pp. 34–48, Aug. 2024, doi: 10.33262/ap.v6i3.1.515.
- [6] D. A. Torres Clavijo, O. G. Martínez Guashima, J. D. Camacho Castillo, and J. S. Monar Monar, "Explorando la dispersión por modo de polarización en fibra óptica NZDSF: un análisis según ITU-T G.655," *AlfaPublicaciones*, vol. 6, no. 3.1, pp. 34–48, Aug. 2024, doi: 10.33262/ap.v6i3.1.515.
- [7] D. Título De Magister, I. D. Fabián, A. Salinas, I. V. Fabián, and H. Sandoval, "Diseño de una Red FTTH para la Utilización de Servicios de los Operadores de Telecomunicaciones en la Ciudad de Cuenca," 2016.
- [8] D. A. Torres Clavijo, O. G. Martínez Guashima, J. D. Camacho Castillo, and J. S. Monar Monar, "Explorando la dispersión por modo de polarización en fibra óptica NZDSF: un análisis según ITU-T G.655," *AlfaPublicaciones*, vol. 6, no. 3.1, pp. 34–48, Aug. 2024, doi: 10.33262/ap.v6i3.1.515.
- [9] Roobert Davis Gellego Ruiz, "COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS DE LA FIBRA ÓPTICA EN UN SISTEMA IM-DD USANDO ECUALIZACIÓN LMS Y MLSE," 2023.

- [10] D. Título De Magister, I. D. Fabián, A. Salinas, I. V. Fabián, and H. Sandoval, "Diseño de una Red FTTH para la Utilización de Servicios de los Operadores de Telecomunicaciones en la Ciudad de Cuenca," 2022.
- [11] T. Cnt, P. Por, L. S. Fernando, and I. G. Brito, "Que el trabajo de investigación: "MIGRACIÓN DE LA RED DE COBRE A FIBRA ÓPTICA PARA LA INCLUSIÓN DE NUEVOS SERVICIOS EN LA CENTRAL DE IZAMBA PARA LA CORPORACIÓN NACIONAL DE," 2020.
- [12] J. Carlos, F. Arellano, G. Vicente, and A. Bermeo, "Estudio del desempeño de la transmisión de datos en una red 100 gb/s," 2021.
- [13] M. Yadira and M. Parra, "UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES Diseño de una red de fibra óptica (FTTH) para evaluar la migración de red de cobre a fibra con el estándar 10G-EPON de los usuarios de CNT EP de la parroquia de Cajabamba cantón Colta," 2024.
- [14] C. Salazar and C. Andrés, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL EFECTO NO LINEAL AUTOMODULACIÓN DE FASE PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES," 2023.
- [15] T. Cnt, P. Por, L. S. Fernando, and I. G. Brito, "Que el trabajo de investigación: "MIGRACIÓN DE LA RED DE COBRE A FIBRA ÓPTICA PARA LA INCLUSIÓN DE NUEVOS SERVICIOS EN LA CENTRAL DE IZAMBA PARA LA CORPORACIÓN NACIONAL DE," 2020.
- [16] E. Y. Telecomunicaciones Geovanna Stephanye Hidalgo Moreta, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DISEÑO, SIMULACIÓN Y PRUEBAS DE UN LABORATORIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS USANDO MATLAB COMMUNICATIONS SYSTEM TOOLBOX, SIMULINK Y PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN."

- [17] J. Cadena, ; Jiménez, and M. Soledad, "Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en Fibras Ópticas ITU-T G.655 Analysis and Simulation of the Polarization Mode Dispersion Phenomenon using ITU-T G.655 Optical Fibers," 2019.
- [18] PAULO ALEJANDRO CASTAÑEDA ROMERO, "ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN CROMÁTICA EN LAS FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO ITU-T G.652 E ITU-T G.655," 2019.
- [19] Arturo García Pérez, "Compensación Electrónica de la Dispersión en Fibras Ópticas Usando el Conjugado de Fase Óptica," 2019.
- [20] Ing. Andrés González García, "Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s," 2017.
- [21] Carlos Andrés Sánchez Potosí, "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DESARROLLO DE LA RED FTTH CON TECNOLOGÍA GPON PARA LA COMUNIDAD DE PALUGO DE LA PARROQUIA PIFO," 2025.
- [22] X. Chen, J. E. Hurley, J. S. Stone, and M. J. Li, "Chromatic Dispersion Measurements of Single-Mode Fibers, Polarization-Maintaining Fibers, and Few-Mode Fibers Using a Frequency Domain Method," *Photonics*, vol. 10, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/photonics10020215.
- [23] T. Cnt, P. Por, L. S. Fernando, and I. G. Brito, "Que el trabajo de investigación: "MIGRACIÓN DE LA RED DE COBRE A FIBRA ÓPTICA PARA LA INCLUSIÓN DE NUEVOS SERVICIOS EN LA CENTRAL DE IZAMBA PARA LA CORPORACIÓN NACIONAL DE."
- [24] S. K. Dacha and T. E. Murphy, "Title of Dissertation: SPATIOTEMPORAL NONLINEAR OPTICAL EFFECTS IN MULTIMODE FIBERS."
- [25] A. Leiva, M. Tarifeño, and R. Olivares, "EFFECTS OF POLARIZATION MODE DISPERSION (PMD) ON PROPAGATION OF OPTICAL PULSES IN OPTICAL FIBERS," 2017.

- [26] C. De Ingenieria, E. N. Electrónica, and T. Y. Redes, "ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA 'FILTRADO DE UNA SEÑAL DISCRETA DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO DE LA BANDA DE FRECUENCIA DE 76 MHZ A 2686 MHZ DURANTE UN DÍA EN LA ESPOCH UTILIZANDO LA MEDIA MÓVIL,'" 2021.
- [27] E. Lazo, "GENERATION OF ALLOWED FREQUENCY BANDS IN DUAL TRANSMISSION LINE WITH CORRELATION OF LONG-RANGE IN THE DISORDER," 2018.
- [28] A. Contreras and M. Urdaneta, "Ultra wideband antennas for communications systems on microwave frequency bands: A review."
- [29] J. Beas Bujanos *et al.*, "CONVERTIDOR DE LONGITUD DE ONDA UTILIZANDO LA MODULACIÓN CRUZADA DE LA POLARIZACIÓN DENTRO DE UN AMPLIFICADOR ÓPTICO DE SEMICONDUCTOR," 2013.
- [30] D. Título De Magister, I. D. Fabián, A. Salinas, I. V. Fabián, and H. Sandoval, "Diseño de una Red FTTH para la Utilización de Servicios de los Operadores de Telecomunicaciones en la Ciudad de Cuenca," 2016.
- [31] Z. Wu, S. Li, Z. Huang, F. Shen, and Y. Zhao, "Chromatic dispersion equalization fir digital filter for coherent receiver," *Photonics*, vol. 8, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/photonics8110478.
- [32] Keiser, "Optica communications essentials," 2013.
- [33] I. G. N. Arya Tri Andhika, G. Sukadarmika, and N. Indra ER, "Perancangan Jaringan Fiber To The Home Berbasis Gigabit Passive Optical Network Dengan Dual Stage Passive Splitter," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 1, p. 103, Jun. 2023, doi: 10.24843/mite.2023.v22i01.p13.
- [34] Roberto David Gellego Ruiz, "COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS DE LA FIBRA ÓPTICA EN UN SISTEMA IM-DD USANDO ECUALIZACIÓN LMS-MLSE".
- [35] G. Keiser, "FTTX Concepts and Applications," 2010.

- [36] D. Legislativo, "CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR," 2008. [Online]. Available: www.lexis.com.ec
- [37] "2-Tercer Suplemento-Registro Oficial N° 439-Miércoles 18 de febrero de 2015."
- [38] "REGLAMENTO GENERAL A LA LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES." [Online]. Available: www.lexis.com.ec
- [39] "Codigo-Organico-de-la-Economia-Social-de-los-Conocimientos-Creatividad-e-Innovacion".
- [40] "RESOLUCIÓN No. 14 459 MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD SUBSECRETARÍA DE LA CALIDAD CONSIDERANDO." [Online]. Available: www.normalizacion.gob.ec
- [41] "Política-Pública-del-Sector-de-las-Telecomunicaciones-y-de-la-Sociedad-de-la-Información-Registro-Oficial".
- [42] C. De, I. Electrónica, H. Nelson, A. Castillo, A. Esteban, and C. Medina, "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA 'MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DE UN FILTRO DIGITAL HIBRIDO FIR ADAPTATIVO LINEAL ÓPTIMO' AUTORES."
- [43] G. Mathew, B. Farhang-Boroujeny, and R. W. Wood, "Design of Multilevel Decision Feedback Equalizers," 2017.
- [44] Md. M. Hossain, Md. M. Rahman, and Md. M. Rana, "Least Mean Square (LMS) for Smart Antenna," *Universal Journal of Communications and Network*, vol. 1, no. 1, pp. 16–21, Jul. 2013, doi: 10.13189/ujcn.2013.010103.
- [45] K. Skretting and K. Engan, "Recursive least squares dictionary learning algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 4, pp. 2121–2130, Apr. 2010, doi: 10.1109/TSP.2010.2040671.
- [46] M. E. Meybodi, H. Gomez, Y. C. Lu, H. Shakiba, and A. Sheikholeslami, "Design and Implementation of an On-Demand Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE)," *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 97–108, 2022, doi: 10.1109/OJCAS.2022.3173686.

- [47] A. : Daniel, G. Blanco, and J. E. González Garcia, "PROYECTO FIN DE CARRERA Ecualización y Optimización de la Codificación para la Simulación de Sistemas OFDM."
- [48] Z. Xi, "Analysis of Adaptive Equalization Algorithms," 2023.
- [49] M. Yadira and M. Parra, "UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES Diseño de una red de fibra óptica (FTTH) para evaluar la migración de red de cobre a fibra con el estándar 10G-EPON de los usuarios de CNT EP de la parroquia de Cajabamba cantón Colta."
- [50] A. ELASYRI, "PERFORMANCE STUDY OF FOUR EQUALIZATION TECHNIQUES OVER A WIRELESS COMMUNICATION CHANNEL," *European Journal of Technic*, pp. 1–12, Jun. 2020, doi: 10.36222/ejt.573483.
- [51] R. Fernando and C. Pacheco, "ESCUELA DE INGENIERÍA PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES."
- [52] F. Rey, M. Javier, and V. Piera, "Ecualización de canal."
- [53] J. Manuel *et al.*, "ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN," 2020.
- [54] MERCEDES ALICIA TILLERIA CARRERA, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES APLICADAS A LA MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA MATLAB/SIMULINK PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES MERCEDES ALICIA TILLERIA CABRERA," 2018.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Código del Ecualizador MLSE

https://github.com/Walter-Cadme/codigo_MATLAB_tesis.git

Anexo 2. Capturas de las configuraciones utilizadas en el diseño de las frecuencias de la simulación.

Optical Transmitter Properties

Label: Optical Transmitter

Main | PRBS | Coding | Enhanced | Side Mode | RIN | Chirp | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
☒	Frequency	238	THz	Normal
☒	Power	0	dBm	Normal
☐	Extinction ratio	10	dB	Normal
☐	Linewidth	10	MHz	Normal
☐	Initial phase	0	deg	Normal

Optical Fiber Properties

Label: Optical Fiber

Main | Dispersion | PMD | Nonlinearities | Numerical | Graphs | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Group velocity dispersion			Normal
☐	Third-order dispersion			Normal
☐	Dispersion data type	Constant		Normal
☐	Frequency domain parameters	☐		Normal
☐	Dispersion	19	ps/nm/km	Normal
☐	Dispersion slope	0.075	ps/nm ² /km	Normal
☐	Beta 2	-20	ps ² /km	Normal
☐	Beta 3	0	ps ³ /km	Normal
☐	Dispersion file format	Dispersions vs. wavelength		Normal
☐	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

Optical Fiber Properties

Label: Optical Fiber

Main | Dispersion | PMD | Nonlinearities | Numerical | Graphs | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Birefringence type	Deterministic		Normal
☐	Differential group delay	0.1	ps/km	Normal
☐	PMD coefficient	0.05	ps/sqrt(km)	Normal
☐	Mean scattering section length	500	m	Normal
☐	Scattering section dispersion	100	m	Normal

Optical Transmitter Properties

Label: Optical Transmitter

Main | PRBS | Coding | Enhanced | Side Mode | RIN | Chirp | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
☒	Frequency	191	THz	Normal
☒	Power	0	dBm	Normal
☐	Extinction ratio	10	dB	Normal
☐	Linewidth	10	MHz	Normal
☐	Initial phase	0	deg	Normal