

EVALUACIÓN DE REDES DE ACCESO ÓPTICO COMO SOPORTE A UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

MERY CATHERYNE RICO BARRERA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C
2017



EVALUACIÓN DE REDES DE ACCESO ÓPTICO COMO SOPORTE A UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

MERY CATHERYNE RICO BARRERA
20102005019

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Electrónica

DIRECTOR
Ing. GUSTAVO PUERTO LEGUIZAMÓN, PhD

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C
2017

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a mis padres que con esfuerzo y dedicación me acompañaron durante todo mi proceso de formación siempre dándome los mejores consejos cuando las situaciones imponían nuevos retos en mi formación académica, gracias por su paciencia y comprensión.

A mi hermana que estuvo presente desde los primeros días en que comenzaba a vivir esa nueva experiencia dándome siempre su opinión y ayuda cuando más lo necesitaba y quien fue testigo de las largas noches en que la academia así me lo exigía.

A mis amigos que me acompañaron durante todo este camino, siempre apoyándome en los momentos más difíciles, celebrando todos juntos cuando la situación lo ameritaba o intentando una y otra vez hacer esos proyectos que tanto nos costaban, gracias por tantos momentos de alegrías y tantas enseñanzas que día a día aprendí de ustedes mis 11 niños, palabras muchas veces sabias que guardare por siempre en mi corazón.

Muchas gracias a mi director que con todo su conocimiento y sabiduría me oriento de la mejor manera, por su paciencia y dedicación que me permitieron siempre tener la motivación necesaria para lograr siempre un aprendizaje constante y así culminar con éxito esta última etapa universitaria

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS ---------- *II*

INDICE DE FIGURAS ---------- *IV*

INDICE DE TABLAS ---------- *VI*

CAPÍTULO I: CONTEXTUALIZACIÓN ---------- *1*

1. INTRODUCCIÓN ---------- 2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ---------- 4
3. OBJETIVOS ---------- 5
   - *3.1* OBJETIVO GENERAL ---------- 5
   - *3.2* OBJETIVOS ESPECÍFICOS ---------- 5
4. JUSTIFICACIÓN ---------- 6
5. ALCANCES Y LIMITACIONES ---------- 7
   - 5.1 ALCANCES ---------- 7
   - 5.2 LIMITACIONES ---------- 7

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO ---------- *8*

6. MARCO TEÓRICO ---------- 9
   - 6.1 MARCO REFERENCIAL ---------- 9
     - 6.1.1 FIBRA ÓPTICA ---------- 9
       - 6.1.1.1 Tipos de Fibra óptica ---------- 10
     - 6.1.2 TRASMISORES ---------- 11
       - 6.1.2.1 Tipos de diodos ---------- 11
     - 6.1.3 RECEPTORES ÓPTICOS ---------- 12
       - 6.1.3.1 Tipos de fotodiodos ---------- 13
     - 6.1.4 MODOS DE TRANSMISION ---------- 13
     - 6.1.5 RED DE SENSORES ---------- 14
     - 6.1.6 REDES DE ACCESO ---------- 14
       - 6.1.6.1 Tipos de Redes de Acceso ---------- 14
     - 6.1.7 SISTEMAS DE RADIOFRECUENCIA ---------- 15
   - 6.2 INICIATIVAS E IMPLEMENTACIONES ---------- 15

CAPÍTULO III: CONTEXTUALIZACIÓN REDES DE ACCESO ÓPTICA Y REDES DE SENSORES ---------- *17*

7. CONTEXTUALIZACIÓN ---------- 18
   - 7.1 REDES DE ACCESO ÓPTICO ---------- 18
   - 7.2 REDES DE SENSORES ---------- 26

CAPÍTULO IV: DISEÑO ---------- *34*

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS ---------- *47*

CAPITULO VI: VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS ---------- *89*

8. CONCLUSIONES ---------- 91

9. BIBLIOGRAFÍA ---------- 93

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fibra óptica. 9
Figura 2: Tipos de fibra óptica. 10
Figura 3: Diodos láser VS diodos LED. 12
Figura 4: Elementos de una red PON. 18
Figura 5: Topología tipo anillo redes GPON. 21
Figura 6: Topología tipo bus lógico redes GPON. 22
Figura 7: Topología tipo estrella redes GPON. 22
Figura 8: Topología tipo malla redes GPON. 23
Figura 9: Topología tipo árbol redes GPON. 23
Figura 10: Configuración de una WSN con la Internet. 27
Figura 11: Topología en estrella redes WSN. 28
Figura 12: Topología tipo malla redes WSN. 28
Figura 13: Topología híbrida redes WSN. 29
Figura 14: Componentes de un módulo perteneciente a WSN. 30
Figura 15: Módulo Tmote Sky de moteiv. 32
Figura 16: Módulo Mica2dot de Crossbow. 33
Figura 17: Tipos de señales del simulador. 36
Figura 18: Parámetros globales de simulación. 38
Figura 19: Módulo PRBS. 38
Figura 20: Codificación NRZ. 39
Figura 21: Módulo NRZ. 39
Figura 22: Módulo generador de onda seno. 39
Figura 23: Módulo del láser de modulación directa. 40
Figura 24: Configuración sensor. 40
Figura 25: Trasmisor óptico. 41
Figura 26: Multiplexor WDM. 41
Figura 27: Configuración final nodo sensor. 42
Figura 28: Configuración tramo de fibra óptica. 42
Figura 29: Cobertura de fibra óptica por parte de la ETB. 43
Figura 30: Ubicación nodos sensores en la ciudad de Bogotá. 43
Figura 31: Atenuador óptico. 45
Figura 32: Demultiplexor WDM. 45
Figura 33: Módulo receptor óptico. 46
Figura 34: Configuración de la ONU para una frecuencia de operación de 850nm 48
Figura 35: OSA y Medidor de potencia óptico transmisor óptico. 49
Figura 36: OSA y Medidor de potencia óptico sensor. 49
Figura 37: OSA y Medidor de potencia óptico multiplexor. 50
Figura 38: Configuración de la ONU para una frecuencia de operación de 1310nm 50
Figura 39: OSA y Medidor de potencia óptico transmisor óptico. 51
Figura 40: OSA y Medidor de potencia óptico sensor. 51
Figura 41: OSA y Medidor de potencia óptico multiplexor. 51
Figura 42: Red GPON caso 1. 52
Figura 43: OSA y Medidor de potencia óptico del láser de la red GPON caso 1. 53
Figura 44: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 1. 53
Figura 45: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 1. 53
Figura 46: Red GPON caso 2. 54
Figura 47: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 2. 54
Figura 48: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 2. 55
Figura 49: Red GPON caso 3. 55
Figura 50: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 3. 56

Figura 51: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 3. 56
Figura 52: Configuración nodo 1 caso 1. 57
Figura 53: OSA y Medidor de potencia óptico en el receptor óptico a 1330nm en el nodo 1. 57
Figura 54: OSA y Medidor de potencia óptico en el receptor óptico a 850nm. 58
Figura 55: Diagrama de ojo de los receptores ópticos del nodo 1para el caso 1. 58
Figura 56: Configuración del nodo 16 caso 1. 58
Figura 57: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 1. 59
Figura 58: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 1. 59
Figura 59: Configuración del nodo 32 caso 1. 59
Figura 60: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 1. 60
Figura 61: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 1. 60
Figura 62: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 1. 61
Figura 63: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 1. 63
Figura 64: Medidor de potencia óptico en los receptores ópticos del nodo 1 para el caso 2 63
Figura 65: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 2. 64
Figura 66: Medidor de potencia óptico en los receptores ópticos del nodo 16 para el caso 2 64
Figura 67: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 2. 64
Figura 68: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 32 para el caso 2. 65
Figura 69: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 2. 65
Figura 70: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 2. 66
Figura 71: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 2. 68
Figura 72: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 3. 68
Figura 73: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 3. 69
Figura 74: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3 69
Figura 75: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3. 69
Figura 76: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3. 70
Figura 77: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 3. 70
Figura 78: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 3. 71
Figura 79: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 3. 73
Figura 80: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 4. 73
Figura 81: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 4. 74
Figura 82: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 4. 74
Figura 83: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 4. 74
Figura 84: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 4. 75
Figura 85: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 4. 75
Figura 86: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 4. 76
Figura 87: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 4. 78
Figura 88: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 5. 78
Figura 89: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 5. 79
Figura 90: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 5. 79
Figura 91: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 5. 79
Figura 92: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 5. 80
Figura 93: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 5. 80
Figura 94: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 5. 81
Figura 95: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 5. 83
Figura 96: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 6. 83
Figura 97: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 6. 84
Figura 98: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 6. 84
Figura 99: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 6. 84
Figura 100: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 6. 85
Figura 101: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 6. 85
Figura 102: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 6. 86
Figura 103: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 6. 88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de las redes tipo PON. *20*
Tabla 2: Distancia real entre el nodo sensor y la OLT. *44*
Tabla 3: Valores de atenuación en la fibra óptica según la cantidad de nodos *45*
Tabla 4: Parámetros del lado de la ONU con un sensor a 850nm. *50*
Tabla 5: Parámetros del lado de la ONU con un sensor a 1310nm *52*
Tabla 6: Características enlace típico GPON caso 1. ..... *54*
Tabla 7: Características enlace típico GPON caso 2. ..... *55*
Tabla 8: Características enlace típico GPON caso 3. ..... *56*
Tabla 9: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 1. ..... *60*
Tabla 10: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 1. ..... *62*
Tabla 11: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 2. ..... *65*
Tabla 12: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 2. ..... *67*
Tabla 13: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 3. ..... *70*
Tabla 14: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 3. ..... *72*
Tabla 15: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 4. ..... *75*
Tabla 16: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 4. ..... *77*
Tabla 17: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 5. ..... *80*
Tabla 18: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 5. ..... *82*
Tabla 19: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 6. ..... *85*
Tabla 20: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 6. ..... *86*

CAPÍTULO I: CONTEXTUALIZACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El rápido avance de la tecnología y la necesidad del ser humano de comunicarse entre sí, hace necesario implementar nuevos sistemas de comunicaciones que le faciliten las labores cotidianas y mejoren la calidad de vida en un territorio específico, haciendo de estos sistemas un estándar de desarrollo entre las diferentes comunidades.

Aunque el ser humano puede valerse por sí solo para cubrir sus necesidad básicas como alguna vez lo hizo, ahora es muy común el uso de elementos tecnológicos que sirven como soporte para facilitar las tareas diarias que éste desarrolla, por la tanto, no es de extrañarse que cuando se menciona el término internet de la cosas sea fácil relacionar los objetos de uso diario que interactúan en un ecosistema especifico con una red de Internet que soporte una comunicación entre ellos sobre su estado y requerimientos logrando una programación completa para que desarrollen una tarea específica y/o en un tiempo determinado.

Un territorio inteligente se define como un espacio geográfico con necesidades reales y que evolucionan de forma natural dependiendo de las necesidades de la población, en el cual se puede interactuar mediante una amplia red de sensores que se encargan de recolectar información en tiempo real de lo que sucede en el territorio interconectados con sistemas que analizan y tratan gran cantidad de datos para solucionar dificultades o limitaciones que el territorio posea, ya sea en al ámbito tecnológico, social, económico o de infraestructura [1]

Como es de esperar, el crecimiento de la población seguirá incrementando y por ende el consumo de los recursos y el gasto energético también será mayor, además, se prevé que en los próximos años sean las grandes ciudades las encargadas de recibir dichos habitantes, es por esto, que no se puede olvidar que es el ciudadano el eje principal para el desarrollo de territorios inteligentes que busquen adaptar las tecnologías presentes con modernos sistemas de comunicación y así generar un entorno sostenible y eficiente que permita mejorar la calidad de vida

Los diferentes medios de comunicación que existen actualmente le permiten al ser humano encontrarse cada vez más cerca del lugar y los objetos de los cuales desea tener conocimiento constantemente, incluso logrando controlar pequeñas variaciones en estos para lograr el cometido final, esta información que se recolecta a grandes velocidades para evitar perder detalles de la misma requiere de un medio de transmisión, así como de sus respectivos protocolos de comunicación ya que por un medio de trasmisión especifico se logra enviar o recibir grandes cantidades de datos en un pequeño instante de tiempo.

Para que los objetos se puedan comunicar entre sí es necesario que cuenten con un sistema embebido compuesto por sensores que cumple acciones activas, pequeños chips para almacenar la información recolectada por dichos sensores y una fuente de energía independiente que garantice el funcionamiento del mismo todo el tiempo, otorgando un papel importante a las redes de sensores que logran conectar los objetos con la red de Internet por medio de una dirección única o dirección IP.

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) cobran con rapidez gran importancia pues su avance tecnológico ha llevado al desarrollo de micro-sensores encargados de monitorear condiciones físicas o ambientales en un espacio determinado, aunque el avance físico ha sido bastante rápido los estándares disponibles para la implementación de las mismas no

se ha quedado atrás, pues de acuerdo a la aplicación para la cual se necesite una red de sensores se implementa un protocolo diferente basado en los componentes básicos ya desarrollados.

Como finalmente lo que se desea es recolectar las mediciones realizadas por las WSN para su posterior manipulación, se hace necesario el uso de las redes de acceso que cuenten con un medio físico de transmisión como lo puede ser el par de cobre trenzado ya comúnmente utilizado, se puede hacer uso del aire o del espacio libre y de la fibra óptica que día a día cobra más fuerza, así mismo, se requiere de equipos de telecomunicaciones como el acceso DSL (multiplexores) o incluso el acceso óptico como los conmutadores ópticos o los regeneradores, también se debe contar con dispositivos de interconexión como lo son los repetidores, las cajas de distribución y los empalmes de par de cobre trenzado o de fibra óptica.

Las redes de acceso se pueden configurar de tal forma que se optimice al máximo los recursos con los que se cuentan y a su vez los resultados que de este proceso se obtienen, hoy en día se requiere de sistemas de comunicación veloces y capaces de transmitir gran cantidad de información puesto que cada vez se desea tener conocimiento preciso de lo que ocurre en un entorno especifico desde cualquier parte del mundo. El tipo de redes de acceso más empleado actualmente que cumple dichas especificaciones son las redes GPON que cuentan con grandes ventajas y muy pocas limitaciones.

Con la información ya almacenada se puede hacer un análisis preciso de la variable monitoreada y así hacer una correcta gestión de los recursos evitando el desaprovechamiento o la sobrecarga de los mismos, logrando facilitar las actividades diarias del ser humano ya sea en una zona rural o urbana que le permita tener un acceso fácil y controlado del medio que lo rodea llegando a evitar desastres que pongan en riesgo su supervivencia.

Finalmente, con el avance de la tecnología y las facilidades que esta otorga, se esperaría que en un futuro cercano se puedan lograr territorios autosostenibles consientes de la importancia del ser humano y su relación con los demás, así como del cuidado del medio ambiente, procurando día a día su regeneración y expansión que conlleve al mejoramiento significativo de la calidad de vida del ser humano garantizando la prolongación de la vida misma.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ya que el mundo cibernético actual logra combinar las mejores características con las que cuenta la red de Internet, se hace necesario aprovechar al máximo cada uno de los recursos y el empleo de los mismos para mejorar la calidad de vida del ser humano actual, satisfaciendo las necesidades con las que este cuente.

Los sensores se logran ubicar en lugares precisos debido al tamaño con que estos cuentan sin afectar su funcionamiento, pues a su vez cuentan con elementos específicos que les permite enfocar todos sus recursos en la medición de una variable logrando gran cantidad de detalles en las muestras recolectadas según la configuración realizada previamente. Generalmente los sensores no se emplean de manera individual pues en realidad necesitan de un sistema de alimentación permanente para su funcionamiento y un sistema de almacenamiento de la información recolectada.

Para que la información recolectada por la red de sensores logre llegar de manera oportuna y confiable a una central, se requiere de una red de acceso que logre dichos requerimientos. Las redes de acceso actuales emplean elementos ópticos que cuentan con grandes ventajas como lo son el ahorro de energía, mayor intensidad en la potencia de transmisión logrando un mayor alcance y un ancho de banda dedicado que permite la transmisión de gran cantidad de información.

Se desean evaluar las diferentes redes de acceso óptico que permitan la transmisión eficiente, veloz y fiable de la información recolectada por una red de sensores inalámbricos hacia una central que finalmente permita que dicha información pueda ser interpretada y gestionada de la mejor manera para lograr cumplir el objetivo propuesto.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

* Evaluar las redes de acceso óptico como soporte a una red de sensores inalámbricos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

* Identificar la topología y caracterización de redes de acceso óptico.
* Reconocer las características de la red de sensores inalámbricos.
* Diseñar un sistema de transmisión de señales inalámbricas sobre un sistema de fibra óptica.
* Validar las prestaciones de una red óptica para el transporte de señales provenientes de una red de sensores mediante simulaciones.

4. JUSTIFICACIÓN

Se desea realizar la evaluación de las redes de acceso de mayor despliegue hasta el momento para que puedan ser empleadas como soporte a las redes de sensores y estos a su vez al internet de las cosas. Las redes de acceso óptico cuentan con grandes ventajas que permiten la disminución de los costos de su producción y posterior implementación logrando así que el transporte de datos y protocolos de diferentes tipos incluyendo los de las redes de sensores inalámbricos se facilite. Se espera que en un futuro cercano se pueda contar con redes de sensores soportadas sobre enlaces ópticos en los cuales los datos de dichas redes compartan recursos de la red óptica aportando aspectos de mejor calidad, robustez y reutilización de infraestructura óptica desplegada.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1 ALCANCES

Con el desarrollo de este trabajo se pretende lograr un aporte significativo al desarrollo de las redes de acceso hasta ahora desarrolladas basándose en la teoría previamente estudiada y las simulaciones realizadas.

5.2 LIMITACIONES

No se realizará la implementación de la propuesta a desarrollar ya que no se cuenta con los elementos necesarios para lograr tal fin

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

6. MARCO TEÓRICO

6.1 MARCO REFERENCIAL

6.1.1 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica está compuesta por un pequeño filamento de vidrio o de silicio fundido que conduce un haz de luz empleando el principio físico de la reflexión en donde se busca principalmente un índice de refracción crítico que hace que el haz de luz se refleje en su interior y no salga del medio, este filamento consta de un núcleo, un revestimiento cilíndrico concéntrico de aproximadamente 0.1mm de grosor contemplando la posibilidad de hacer de este parámetro lo más pequeño posible con el fin de minimizar el factor de reflexión y una cubierta exterior que protege dicho filamento de las perturbaciones del medio como se observa en la Figura 1. Según la aplicación en la que se desee emplear la fibra está puede lograr distancias de hasta 100km sin necesidad de emplear repetidores de señal.

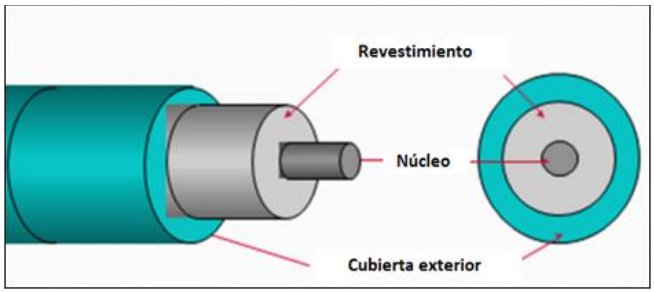


Figura 1: Fibra óptic

Tomado de: [2].

Entre las ventajas con las que cuenta la fibra óptica esta la transmisión de millones de bits de información a gran velocidad ya que se suele emplear como fuente los diodos emisores que propagan la información a través de la fibra a la velocidad de luz, posee una alta inmunidad a las interferencias magnéticas que puede ocasionar pérdida de información o la interrupción de la misma, además su peso y tamaño es menor al del cable eléctrico convencional entre otras características que hacen que este medio de trasmisión sea empleado con más frecuencia.

Sin embargo, a pesar de que la fibra óptica posee grandes beneficios para la trasmisión de información también presenta pérdidas en la misma por efecto de la atenuación y la dispersión de la señal, sin embargo, se suele emplear amplificadores o repetidores ópticos para evitar dichas perdidas.

Dispersión: la dispersión se presenta porque los pulsos de luz que viajan a diferentes velocidades se ensanchan con el tiempo a medida que la longitud de la fibra aumenta, es decir, la dispersión mide el ensanchamiento del pulso de salida por unidad de distancia empleando unidades de ps/km.nm, este fenómeno causa que los pulsos de luz se solapen unos con otros haciendo que el receptor no pueda regenerar la señal limitando la tasa de datos de transmisión. Existen varios tipos de dispersión, pero entre los más relevantes esta la dispersión modal que se genera en fibras multimodo y la dispersión por modo de

polarización (PMD) ocasionada por imperfecciones en el núcleo de fibras monomodo con enlaces superiores a 10Gbps.

Atenuación: la atenuación se presenta por la pérdida de energía que se presenta en el pulso de luz cuando viaja de un extremo al otro, por tanto, en el extremo en el que se encuentra ubicado el receptor la amplitud de la señal será menor y las pérdidas ocasionadas por este fenómeno serán una característica fundamental al tener en cuenta para el diseño que empleen este tipo de medios de transmisión. Este parámetro es especificado por el fabricante y se mide en dB/km.

6.1.1.1 Tipos de Fibra óptica

Fibra óptica monomodo: en este tipo de fibra óptica se dice que se puede guiar y transmitir un solo rayo de luz a través de su núcleo ya que el diámetro del núcleo de la fibra toma valores muy pequeños haciendo que el haz de luz que se transmite no rebote y se propague en línea recta logrando transmitir hasta tera bits de información a grandes distancias con atenuación muy baja evitando el uso de repetidores, por eso, este tipo de fibra óptica se emplea generalmente cuando se quiere que el cubrimiento sea regional, metropolitano o incluso nacional.

Fibra óptica multimodo: este tipo de fibra óptica puede guiar y transmitir varios rayos de luz por medio del fenómeno óptico de la reflexión total interna por lo que esto supone que los rayos de luz no llegarán todos al mismo tiempo generando el fenómeno de la dispersión intermodal. Si el índice de refracción es uniforme a lo largo de la fibra se dice que tiene un índice de refracción escalonado y los haces de luz rebotarán en el punto de contacto entre el núcleo y el revestimiento. Si el índice de refracción varía gradualmente siendo mayor cuando se acerca al núcleo de la fibra se dice que tiene un índice gradual, donde los haces de luz rebotan de forma suave y serán conducidos hacia el centro reduciendo considerablemente las pérdidas en la propagación. Como el índice de refracción en cualquiera de los dos casos es bajo genera una atenuación por kilómetro considerable por lo que generalmente se emplea este tipo de fibra óptica en aplicaciones de distancias cortas como lo puede ser una empresa o universidad.

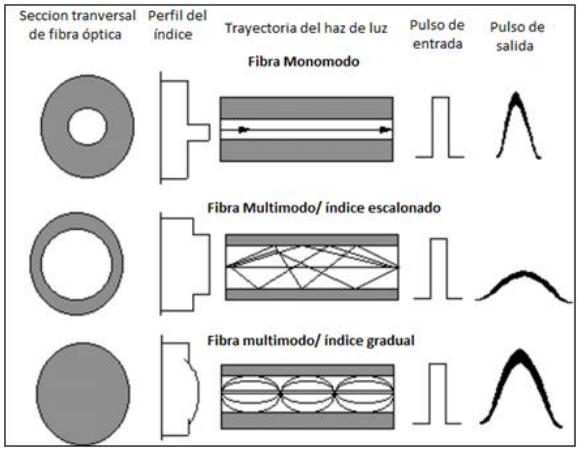


Figura 2: Tipos de fibra óptica

Tomado de: [2].

6.1.2 TRASMISORES

Los transmisores son aquellos elementos encargados de emitir la luz que se propaga por la fibra óptica, para el caso de las comunicaciones ópticas se suelen emplear diodos emisores, dentro de la variada gama de diodos se hace especial énfasis en los diodos laser y los diodos emisores de luz (LED), sin embargo, tradicionalmente se ha empleado el LED para transmisión con baja demanda de datos como Ethernet de 10 Mbps o 100 Mbps mientras que los laser se emplean en aplicaciones de alta transmisión de datos como lo son las redes GPON.

6.1.2.1 Tipos de diodos

Láser: este tipo de diodo es el más empleado en las comunicaciones ópticas ya que es capaz de emitir un haz de luz uniforme y localizado con una anchura espectral de emisión pequeña que utiliza modos de transmisión restringidos por lo que se pueden acoplar fácilmente con fibra óptica monomodo y posee la ventaja que los pulsos emitidos responden rápidamente a los cambios evitando que se solapen o se dispersen. Esto también logra facilitar su modulación lo cual permite una velocidad de transmisión de bits por segundo alta (> 10GHz). Los láser son empleados para trasmitir a largas distancias trabajando generalmente con una longitud de onda de 1550nm [3]

Tipos de Láseres

Algunos tipos de láser son:

> **Diodo láser Fabry-Perot:** consta de un diodo laser flip-flop y opera a una sola oscilación de modo longitudinal y un interferómetro Fabry-Perot que funciona como cavidad resonante para el láser y como filtro óptico sintonizable. Este tipo de láser se emplea en enlaces de corto o mediano alcance, es decir, entre 850nm y 1330nm.
>
> **Láser retroalimentación distribuida (DFB)** este tipo de diodos emplea rejillas distribuidas de Bragg que proporciona variaciones periódicas del índice de refracción en la estructura del láser que permite largos alcances manteniendo una potencia entre 2mW - 50mW, aunque su utilización se ve limitada por los altos costos de producción con los que cuenta.
>
> **Diodo láser con emisión superficial de cavidad vertical (VCSEL):** los VCSEL son un tipo particular de láser ya que emiten luz en un haz cilíndrico vertical perpendicular a la superficie, además de poseer las ventajas que poseen los diodos laser comunes sus costos de fabricación son bajos y su eficiencia sigue siendo buena, la corriente que necesita para su funcionamiento es baja; generalmente se emplea con una longitud de onda de 850nm y en fibras ópticas multimodo. [4]

LED: este tipo de diodos emiten un haz de luz no uniforme a la salida que llena por completo el núcleo de la fibra óptica haciendo que el acople entre el LED y la fibra sea difícil, además, los tiempos de respuesta de los pulsos generados por este emisor son muy lentos conllevando al aumento de la dispersión a medida que incrementa la distancia que recorre, la potencia emitida es baja y el ancho de banda es limitado (< 250MHz) por lo que sus

aplicaciones se ven limitadas tanto en distancia como en velocidad de trasmisión haciendo de estos diodos muy poco empleados en las comunicaciones ópticas

Tipos de LEDs

Algunos tipos de LEDs más comunes son:

LED de emisión superficial (SLED): emite haces de luz hacia varias direcciones, pero en un área pequeña sin embargo, el haz de luz que finalmente sale por la ventana superior es pequeño lo que presenta muchas pérdidas y su utilización se ve limitada por los altos costos.

LED de emisión lateral (ELED): este tipo de diodos presenta buen acoplamiento con la fibra óptica al presentar un diagrama de radiación elíptico, presenta mayores velocidades de modulación que los LEDs de emisión superficial.

LED superluminiscente (SLD): este tipo de diodo presenta características cercanas a las del láser ya que tiene una potencia mayor que los demás leds, pero requiere altas corrientes para alcanzar la emisión del haz de luz.

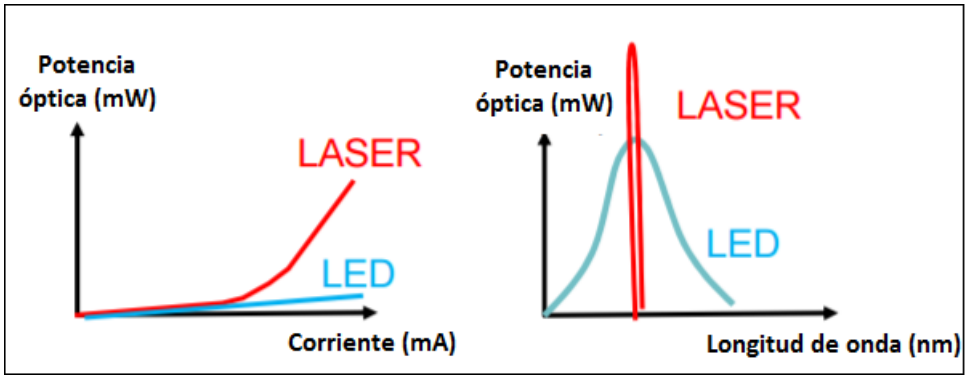


Figura 3: Diodos láser VS diodos LED

Tomado de: [Dispositivos y medios de trasmisión óptica, pag.11].

6.1.3 RECEPTORES ÓPTICOS

Los receptores ópticos están compuestos por un fotodetector que convierte en fracción de microsegundos la señal óptica en una señal eléctrica, aunque con muy poca energía por lo que también es necesario emplear amplificadores, posteriormente se debe demodular la señal para obtener la información deseada. Los fotodiodos son los elementos más importantes en los receptores ópticos ya que la sensibilidad que los caracteriza y el ruido que pueden introducir en el proceso de recepción de la información son factores determinantes al momento de elegir el receptor óptimo.

6.1.3.1 Tipos de fotodiodos

Fotodiodo PIN: son el tipo de fotodiodos más empleado por su bajo costo de producción, su bajo ruido y el gran ancho de banda que puede utilizar haciéndolo altamente fiable. Está conformado por una capa intrínseca de material semiconductor casi pura recubierta por una capa P en la parte superior y una capa N en la parte inferior que se polariza inversamente para acelerar las cargas, este proceso se hace de forma rápida y eficiente

Fotodiodo APD: estos fotodiodos son también conocidos como fotodiodos de avalancha ya que al momento de aumentar el voltaje de polarización la corriente también aumenta haciendo que los átomos del semiconductor choquen rápidamente con otros átomos. A diferencia de los fotodiodos PIN la capa intrínseca está recubierta por una capa P por ambos lados de la capa y posteriormente está cubierta por una capa tipo N en la parte superior que al ser polarizado inversamente como el fotodetector PIN se produce el fenómeno de avalancha antes mencionado.

6.1.4 MODOS DE TRANSMISION

Para transmitir señales codificadas se emplean dos técnicas:

Banda base: La trasmisión en banda base utiliza señales digitales en un único canal, es decir, se emplea todo el canal de comunicación para trasmitir una única señal de datos, la señal que se transmite de esta forma no sufre ningún tipo de modulación manteniendo una única frecuencia de transmisión desde el origen hasta el destino, como no se puede enviar una señal de sincronismo y la señal que contiene la información al mismo tiempo la señal que contiene la información se emplea también como señal de sincronismo entre el transmisor y el receptor, sin embargo, , si la señal permanece mucho tiempo en uno de sus dos estados (1 ó 0) el receptor no puede identificar el inicio o el fin de la transmisión por lo que es necesario emplear algún tipo de codificación ya sea de forma polar, unipolar o bipolar.

Este modo de transmisión se emplea en múltiples aplicaciones por su economía y sencillez, pero la señal suele perder demasiada información al llegar al destino ya que la dispersión de la señal es muy alta por lo que se hace necesario el uso de repetidores para lograr mantener su intensidad y potencia.

Banda ancha: Los sistemas de trasmisión en banda ancha utiliza señales analógicas y un rango determinado de frecuencias por lo que las señales empleadas son continuas en forma de ondas electromagnéticas u ópticas. Para poder enviar varias señales por el mismo medio de transmisión se emplea una onda portadora con una frecuencia especifica que modula la señal de datos siempre teniendo presente que las aplicaciones que se le dé a determinado rango de frecuencias no exceda el límite en banda ancha.

Como la señal es unidireccional se deben emplear dos caminos con diferentes frecuencias para recibir y enviar información o se puede emplear la unión de dos cables diferentes uno para enviar la información y otro para recibirla. En este modo de transmisión se emplean amplificadores para mantener la señal con buena intensidad. [5]

6.1.5 RED DE SENSORES

Una red de sensores es también conocida como una red de ¨pequeños computadores¨ conectados entre sí, pues consta de microchips que procesan los datos obtenidos y los almacenan y que a su vez cuenta con sensores que colaboran en una tarea en común que generalmente interactúan con el ambiente.

Son altamente tolerable a las fallas ya que si un nodo o alguno de sus protocolos son interrumpidos la información puede ser redireccionada por alguno de los otros nodos y así evitar la pérdida o los retardos de la misma.

6.1.6 REDES DE ACCESO

Se conoce como una red de acceso a un medio físico conectado en forma de red como su nombre lo indica que se encarga de transmitir la información enviada o solicitada por un usuario y la central de red. Las redes de acceso pueden emplear tecnologías de acceso guiado como lo son el par de cobre, el cable coaxial, la red eléctrica o la fibra óptica o pueden emplear tecnologías de acceso no guiado como lo es el aire empleando ondas electromagnéticas.

6.1.6.1 Tipos de Redes de Acceso

Redes xDSL: Las redes de abonado digital son conocidas como las primeras redes de acceso que existieron debido a la necesidad de poder acceder a la red de Internet manteniendo así la opción de utilizar simultáneamente la línea de voz, este tipo de red consta de todas las variantes que pueden tener las líneas de cliente digital cuya principal diferencia es la velocidad y simetría de transmisión de datos.

Redes Híbridas (HFC): las redes de acceso híbridas fibra y cable o Hybrid Fiber Optic Coaxial por sus siglas en inglés se caracterizan por ofrecer más y mejores servicios gracias a un ancho de banda mayor que las redes xDSL, sin embargo, para lograr una mayor eficiencia de este tipo de redes de acceso es necesario reemplazar la red de cable coaxial entre centrales o desde las centrales hasta los nodos ópticos por fibra óptica logrando así un mayor alcance y una mayor capacidad de información y manteniendo el cable coaxial desde los receptores ópticos hasta los abonados.

Red de fibra óptica (PTP,PON): las redes de acceso óptico pueden ser activas (PTP) o pueden ser pasivas (PON) cuya principal diferencial consta en la disponibilidad del ancho de banda que cada uno de estas redes posee, mientras que las redes de acceso óptica activa dedica el ancho de banda por fibra y por usuario, las redes de acceso óptico pasivas no tiene ancho de banda dedicado por lo que es necesario emplear splitters o divisores, acopladores y filtro ópticos para lograr que la información allí presente llegue al usuario final.

Redes de acceso móvil o inalámbricas: este tipo de redes emplean tecnologías de acceso no guiado, es decir, utilizan ondas electromagnéticas que generalmente son ondas de radio para transmitir datos, sin embargo para su implementación se emplean antenas integradas

en las tarjetas de los dispositivos que requieran este tipo de redes por ejemplo para la utilización de las redes WLAN (Wireless Local Area Network) las ondas de radiofrecuencias empleadas son de corto alcance y es necesario que el dispositivo que desea emplear este tipo de red deba contener una tarjeta para red inalámbrica ya incorporada haciendo las veces de receptor, dentro de este tipo de redes se encuentra el WiFi, el Bluetooth y los sistemas infrarrojos.

6.1.7 SISTEMAS DE RADIOFRECUENCIA

Se conoce como radiofrecuencia, en general, al conjunto de frecuencias que se encuentran entre los 3Hz y los 300GHz del espectro electromagnético, en esta gama de frecuencia se puede ionizar el aire para crear una trayectoria que permite transmitir señales de radio, televisión o de telefonía móvil entre otras, dependiendo de la frecuencia a la que sea transmitidas.

Las ondas electromagnéticas que se transmiten en ese rango de frecuencias se suelen combinar con diferentes tecnologías para ser empleadas en múltiples aplicaciones principalmente en el ámbito industrial como por ejemplo para escanear códigos de barras, como control de inventarios o para realizar controles de acceso en un lugar específico. Para que dichas aplicaciones sean efectivas es necesario implementar sistemas de comunicaciones que consten de un transmisor, un receptor y un medio de trasmisión, el medio de transmisión empleado es el aire y por eso se dice que la comunicación es no guiada, y por ende inalámbrica. Sin embargo, esas ondas electromagnéticas transmitidas requieren de una modulación dependiendo del tipo de información a transmitir.

6.2 INICIATIVAS E IMPLEMENTACIONES

Debido al avance de la tecnología y el impacto que esto ha tenido en el desarrollo de los componentes de las diferentes redes de acceso, los datos obtenidos por las redes de sensores logran llegar a la central con mayor precisión en un periodo de tiempo corto. Estas redes de sensores son localizadas en diferentes espacios geográficos para monitorear con más detalle la interacción entre los seres vivos y el medio arrojando amplia información, la interconexión de varias redes y el análisis de dichos resultados dan paso a los territorios inteligentes.

Los territorios inteligentes pueden ser también llamados nuevos modelos de gestión de recursos, pues teniendo gran cantidad de información en tiempo real y como eje central el bienestar de los ciudadanos se logra organizar y optimizar los bienes y recursos con los que cuenta un territorio especifico tomando las mejores decisiones para mejorar la calidad de vida de sus habitantes contaminando menos y haciendo así un entorno de desarrollo sostenible

España es el país que cuenta con la mayor cantidad de ciudades que apuntan a ser ciudades inteligentes en los próximos 40 años pues más del 75% de su población se concentrará en las ciudades; tres grandes ciudades de este país llevan varios años trabajando en ello desplegando redes de fibra óptica hasta el hogar, la primera de estas ciudades es Málaga quien es pionera en integrar fuentes renovables de energía en la red eléctrica empleando

baterías para almacenar la energía que no se consuma para luego ser empleada en el alumbrado público o en vehículos eléctricos. La segunda ciudad es Rivas que cuenta con una de las redes de acceso WiFi más extensa de toda España manteniendo así interconectada gran parte de la ciudad, y la tercera ciudad es el distrito 22 de Barcelona donde se han desarrollado espacios reales para hacer pruebas de gran impacto urbano. [6]

Mientras que en Colombia escuchar el término Smart Cities sigue siendo un poco extraño y hasta desconocido en muchos aspectos, el gobierno nacional cuenta con el apoyo de COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación) y el MinTIC (Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones) para lograr un gran avance tecnológico que impactaría positivamente el sector social, económico y que sin duda, el cuidado y la conservación del medio ambiente será el gran objetivo de dichos territorios.

Para empezar con este desarrollo las conexiones a Internet pasaron de 8.2 millones a más de 10.7 millones de conexiones en los últimos 3 años en todo el territorio colombiano logrando que el acceso de la comunidad al Internet sea mayor y con este un incremento en el conocimiento sobre el uso y la gestión de los recursos, dichas conexiones incluyen en sus redes nuevas tecnologías como lo son la fibra óptica y los operadores de conectividad 4G.

Algunos de estos avances se encuentran implementados en ciudades como Bogotá, Medellín, Bucaramanga y Manizales entre otras, que ya cuentan con alumbrado público y semaforización con tecnología inteligente que consigue reducir accidentes y sin lugar a dudas un menor consumo energético. Del mismo modo, se tienen plataformas de seguridad en línea apoyadas en cámaras de videovigilancia instaladas estratégicamente en zonas de alto impacto o que cuentan con problemáticas sociales relevantes para la comunidad logrando así una reacción oportuna y de mayor eficacia por parte de los entes de seguridad social. Las problemáticas ambientales no se quedan atrás pues también se logró desarrollar una mejor atención y prevención de desastres naturales contando con equipos de alta tecnología cuya información obtenida es transmitida y analizada con mayor rapidez, en el ámbito social el auge de los tramites en línea y las agendas digitales logran evitar demoras y congestiones al momento de tener que solicitar una cita ya sea médica, obligaciones tributarias e incluso laboral haciendo que los recursos sean aprovechados al máximo mejorando la calidad de vida de la población.[7]

Aunque pensar en un Colombia como un territorio inteligente se ve como una idea lejana, cada día se incorporan más emprendedores que le apuestan a utilizar tecnología en el desarrollo de todas sus actividades así como en cuidar el impacto ambiental que éstas tienen sobre el territorio, sin embargo, la principal responsabilidad recae en el estado, pues es quien se encarga de crear, gestionar y vigilar los recursos económicos para lograr implementar dichos proyectos inteligentes y autosostenibles en la adaptación de los territorios actuales de la manera más óptima evitando el desperdicio de los recursos y mala gestión de los mismos.

CAPÍTULO III: CONTEXTUALIZACIÓN REDES DE ACCESO ÓPTICA Y REDES DE SENSORES

7. CONTEXTUALIZACIÓN

7.1 REDES DE ACCESO ÓPTICO

Las redes de acceso son aquellas conexiones que se establecen directamente desde el proveedor de servicios hasta el usuario final. Estas redes pueden ser de tipo inalámbrico como son las redes de Wi-Fi, GMS, LTE, entre otras o pueden ser de tipo alámbrico empleando el cable de cobre convencional como lo es la tecnología xDSL o empleando hilos de fibra óptica, especialmente como lo son las redes de tipo PON que incluso pueden ser de tipo híbrido empleando tanto cable de cobre como fibra óptica.

Las redes de acceso ópticas se caracterizan principalmente por ofrecer varios servicios empleando la misma infraestructura y mejorando algunos de los problemas presentes en las redes de acceso común. Este tipo de redes cuentan con la ventaja de dar gran flexibilidad al ancho de banda disponible, y junto a la fibra óptica que cuenta con gran velocidad y cantidad al momento de hacer la transmisión de los datos hacen de estas redes ópticas las preferidas para transmitir información.

Las redes de acceso óptico que se desean estudiar en este caso serán las redes ópticas pasivas PON pues cuentan con grandes ventajas al no necesitar de alimentación externa tanto para su funcionamiento como para la transmisión de datos, disminuyendo así los costos de los equipos y el mantenimiento de los mismos que finalmente serán cargados al usuario, haciendo que se prefiera este tipo de redes sobre las redes ópticas activas que requieren de controladores y alimentación externos para su correcto funcionamiento.

Las redes ópticas de tipo PON cuentan con la ventaja de ser una red punto-multipunto al emplear solo un puerto OLT por cada red, disminuyendo el consumo de energía y los transmisores ópticos, además, requiere el despliegue de una sola fibra óptica como troncal desde las OLT hasta las ONT que se puede llegar a derivar incluso hasta en 128 ramificaciones empleando splitters, aunque típicamente se hace de 32 abonados.

En la Figura 4 se observan los elementos con los que cuenta una red de acceso tipo PON.

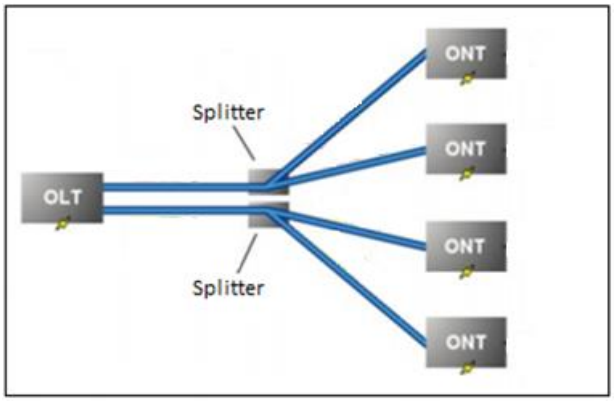


Figura 4: Elementos de una red PON

Tomado de: [8].

- **Optical Line Terminal (OLT):** son elementos ópticos activos que sirven de interface entre el nodo servidor que se encuentra en la oficina central (CO) y las ONT, este transmisor distribuye, coordina y multiplexa la información a través de un haz de luz, que generalmente es un láser, hacia los usuarios empleando técnicas de multiplexación como WDM y TDMA alcanzando a trasmitir dicha información varios kilómetros.

- **Optical Network Unit/Terminal (ONU/ONT):** son receptores ópticos que se encuentran ubicados en la parte del usuario, se encargan de recibir la señal proveniente de la OLT correspondiente y filtrar las tramas que le han sido asignadas para un determinado servicio, y a su vez transmitir la información que se envía desde el usuario hacia la OLT.

- **Splitters o divisores ópticos pasivos:** se encargan de transmitir la señal óptica proveniente de la OLT hacia los ONT o viceversa sin necesidad de alimentación externa empleando técnicas de multiplexación y demultiplexación de la señal.

Debido al gran uso y las necesidades que surgieron con el avance de la tecnología cabe resaltar algunos de los estándares de redes PON según la ITU-T y la IEEE que han surgido hasta el momento:

- **APON:** esta clase de red fue definida por recomendación de ITU-T G 983 en donde se definió la A como representación del tipo de transporte utilizado, ATM (modo de transferencia asincrónico), consta de un canal descendente con una tasa máxima de 155 Mbps que reparte entre el número de ONT presentes, lo que le impide transmitir videos o Ethernet.

- **BPON:** con el fin de dar mayor soporte a los servicios solicitados en las redes APON por medio del mismo estándar ITU-T G.983 se determinó anteponer una B a este tipo de redes que significaba servicios de banda ancha (Broadband) como lo es Ethernet y la transmisión de videos, esta red consta de tráfico asimétrico con canal descendente de 155 Mbps, 622 Mbps y 1.25Gbps y un canal ascendente de 155 Mbps y 622Mbps y de tráfico simétrico con canal descendente y ascendente de 622Mbps.
- **EPON:** esta red fue estandarizada por el documento de la IEEE 802.3ah y es conocida como Ethernet Passive Optical Network, consta de una topología de punto a multipunto basando su funcionamiento en el estándar MPCP (Multi Point Control Protocol) es decir, empleando mensajes, temporizadores o estados de máquina para controlar el acceso a la topología, consta de trafico simétrico con un canal descendente y ascendente de 1.25Gbps. Esta red tiene una gran desventaja al limitar el manejo de nuevos servicios al propietario de la red y no a los operadores de la misma afectando la calidad de transmisión debido a la sobrecarga que debe soportar.

- **GPON:** este tipo de red PON es la más reciente estandarizada por ITU-T G.984.X que cuenta con capacidad de Gigabits y permite manejar un gran ancho de banda, logrando dar soporte a redes tanto de uso comercial como residencial, recopilando los servicios ya prestados anteriormente como el ATM, Ethernet y la voz. La velocidad de transmisión de estas redes apunta a ser mayor o igual a 1.25Gbps. Sin embargo,

se han realizado algunas combinaciones en las cuales las velocidades de transmisión de forma asimétrica en canal ascendente son de 155Mbps, 622Mbps, 1.25Gbps y 2.5Gbps y en canal descendente de 1.25Gbps y 2.5Gbps con hasta 100 Mbps por abonado/ usuario y de forma simétrica de 1.25Gbps y 2.5Gbps, sin embargo, se considera que la mejor combinación de velocidades es de 1.25Gbps en el canal de subida (hacia el origen) y 2.4Gbps en el canal de bajada (desde el origen). Estas velocidades de transmisión se garantizan con una tasa de error de 1×10^{-11} cuando los extremos que se desean comunicar se encuentra en estado activo, de 4.6×10^{-6} si la central o el ONT se encuentra en estado libre o de inactividad, pero si es la OLT quien se encuentra inactivo la precisión será de $3{,}2 \times 10^{-5}$, estas precisiones no afectan significativamente el funcionamiento de la ONT o de la OLT por lo tanto la ONT deberá emitir señal mientras se encuentre en alguno de los estados de funcionamiento y deberá dejar de emitir señal si por el contrario no se encuentra en alguno de esos estados o si no cuenta con la autorización previa para hacerlo [9].

En la Tabla 1 se presentan las características principales de las redes de tipo PON en donde se observa la evolución de este tipo de redes y las grandes ventajas con las que las redes GPON cuentan.

Tabla 1: Parámetros de las redes tipo PON.

	BPON	**EPON**	**GPON**
Velocidad (Mbps)	**Desc:** 1244,622,155 **Asc:** 622, 155	**Desc:**1250 **Asc:** 1250	**Desc:** 2488, 1244 **Asc:** 2488,1244,622,155
Codificación de línea	NRZ	8B/10b	NRZ
Division mínima	32	16	64
Division máxima	64	16	128
Alcance lógico máximo soportado	20km	10-20km	60km
Documento estándar	ITU-T G.983	IEEE802.3ah	ITU-T G.984

Ya que las redes de acceso óptico con mejores cualidades son las redes GPON se hará especial énfasis en las características con las que estas cuentan, así como sus ventajas y desventajas.

Las redes GPON cuentan como las demás redes PON con conexiones entre OLT y ONT para enviar datos ya sea de forma ascendente o descendente, esto se puede realizar empleando una sola fibra por cada sentido de transmisión o por medio de multiplexación bidireccional para diferentes longitudes de onda (WDM) evitando así las colisiones. En las redes GPON que emplean una sola fibra en el sentido descendente el intervalo de longitudes de onda de trabajo será entre 1480-1500nm, y en los sistemas que utilizan dos fibras se empleará el intervalo de 1260-1360nm mientras que en el sentido ascendente se empleará el intervalo de longitudes de onda de trabajo comprendido entre 1260-1360nm en ambos casos, y es allí donde los splitters se encargan de repartir las señales que provienen de la ONT hacia las OLT.

En las redes de difusión empleadas en las redes PON se dedica un ancho de banda proporcional a cada ONT que se puede lograr perfeccionando cada transmisor en la central

para que el operador de WDM sea capaz de volver a utilizar la carga ya existente, entonces el operador puede seguir modernizando la red con un router de longitud de onda que puede administrar servicios de transmisión eficientemente por medio de la técnica de administración del espectro.

Las topologías para acceder a las redes PON pueden variar dependiendo de las necesidades de transmisión, para realizar algún tipo de expansión de estas redes se emplean los splitters necesarios para lograr el fin deseado, todas estas topologías emplean fibra monomodo debido a la cantidad de datos que puede transmitir y la gran distancia que alcanza. Las topologías empleadas en estas redes son:

- **Anillo:** las conexiones realizadas con esta configuración cuentan con enlaces dedicados y punto a punto pero solo con los dispositivos vecinos como se observa en la Figura 5, su conexión física es en forma de círculos por donde la información viaja de dispositivo en dispositivo hasta llegar a su destino final, esta red proporciona protección en caso de que algún nodo o cable falle, ya que todos los dispositivos se encuentran conectados en anillo o incluso en doble anillo permitiendo la transmisión en sentidos opuestos y logrando aislar solo el enlace afectado, la restricción de esta configuración estará dada por los medios físicos como lo es la longitud física máxima empleada en el anillo y la cantidad máxima de dispositivos conectados.

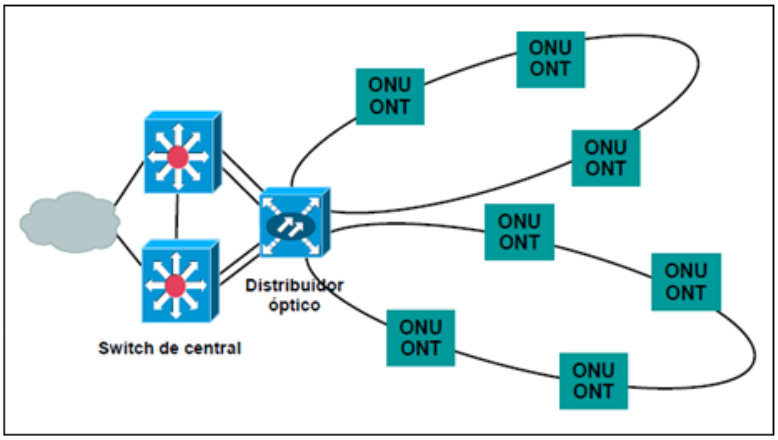


Figura 5: Topología tipo anillo redes GPON

Tomado de: [10].

- **Bus:** en esta topología como se muestra en la Figura 6 todos los dispositivos se encuentran conectados directamente a una red troncal que actúa con enlaces multipunto que logran la comunicación entre sí, pues cuando uno de estos dispositivos transmite información los demás dispositivos no pueden enviar información sino que por el contrario reciben dicha información al mismo tiempo, generalmente se emplean enlaces full-dúplex que garanticen la transmisión de información en los dos sentidos, esta topología es bastante sencilla logrando emplear menos cableado que en las tipologías tipo malla, estrella o árbol.

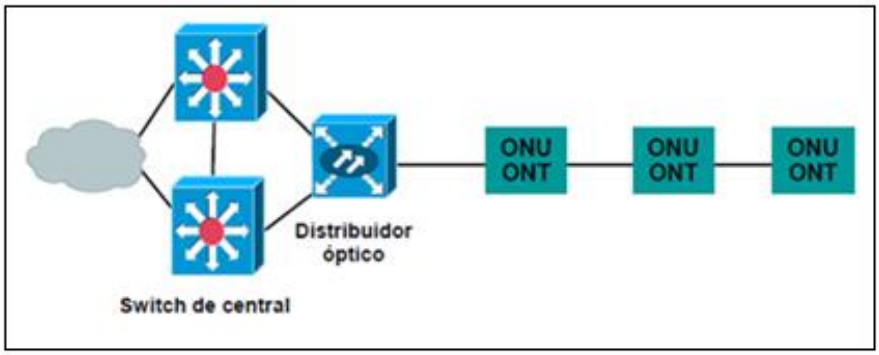


Figura 6: Topología tipo bus lógico redes GPON

Tomado de: [10].

- **Estrella:** en esta topología los nodos no intercambian información directamente ya que emplean un nodo en común que se encarga de monitorear la red y transmitir la información recibida al nodo correspondiente, como se muestra en la Figura 7 evitando los enlaces entre los dispositivos, este tipo de configuración posee una gran ventaja y es la protección contra fallas de los cables, como también lo hace la configuración en anillo, ya que si se presenta esta situación en alguno de los nodos periféricos, el nodo central podrá seguir retransmitiendo la información a los demás nodos, sin embargo, si el nodo central presenta fallas toda la red quedara incomunicada o si en alguno de los nodos se pierde la comunicación con el nodo central la información presente en este nodo se pierde.

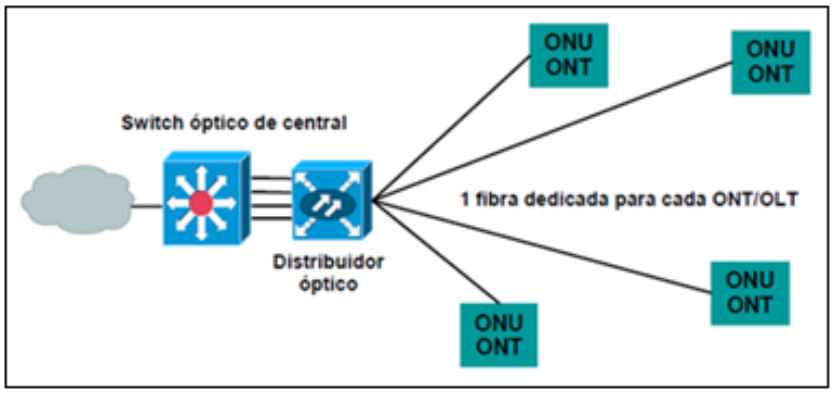


Figura 7: Topología tipo estrella redes GPON

Tomado de: [10].

- **Malla:** en una topología de este tipo cada dispositivo cuenta con un enlace punto a punto y dedicado hacia cada uno de los demás nodos manteniendo la comunicación constante dando mayor privacidad a los mensajes ya que la información transmitida solo será vista por los dispositivos activos evitando que los demás dispositivos tengan acceso al mensaje transmitido, en la Figura 8 se puede observar una gran ventaja de esta configuración pues cuando uno de los enlaces falla los otros dispositivos pueden seguir transmitiendo sin inhabilitar todo el sistema.

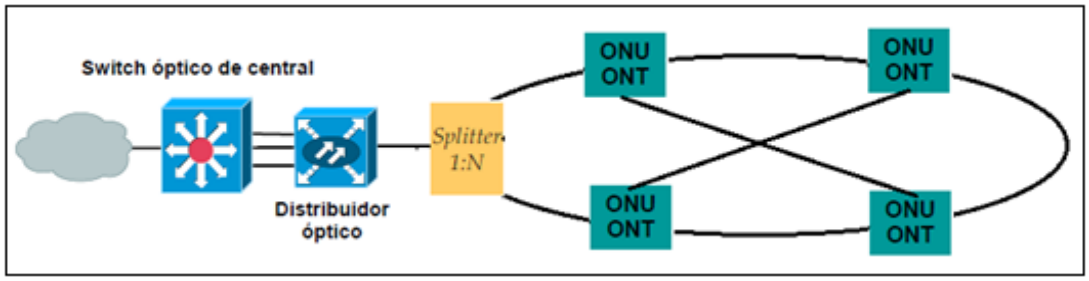


Figura 8: Topología tipo malla redes GPON

Tomado de: [10].

- **Árbol:** al igual que en la topología en estrella los dispositivos cuentan con un enlace directo a un nodo central desde donde se controla la información transmitida y no cuentan con enlaces entre dispositivos, pero a la vez cuenta con nodos secundarios como los que se observan en la Figura 9 donde se conectan la mayoría de los dispositivos, este nodo secundario será quien se conecte directamente al nodo central que cuenta con repetidores que se encargan de ampliar el área de cobertura y su potencia.

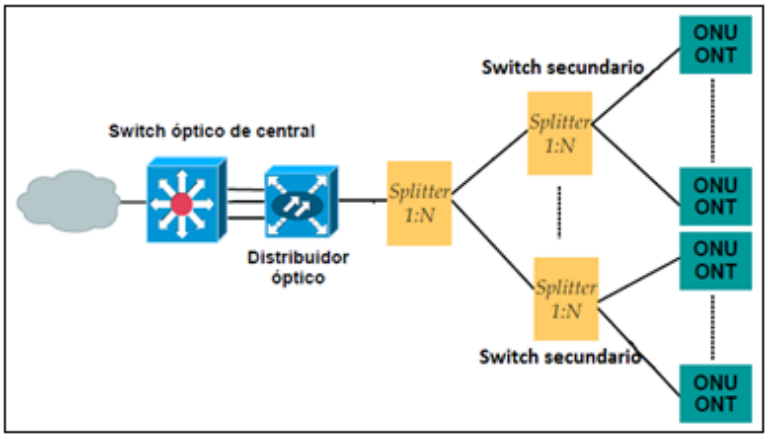


Figura 9: Topología tipo árbol redes GPON

Tomado de: [10].

Como estas redes son de tipo pasivo el alcance de la señal se ve restringido por la distancia que se desee cubrir y por la potencia mínima y máxima de los terminales. La distancia que alcanza dicha señal suele ser de aproximadamente 20km, aunque con la configuración adecuada podría llegar a ser de hasta 60km. La potencia entregada por el transmisor ubicado en la oficina central es de vital importancia, pues es quien determina el nivel de potencia con que contará la señal al llegar a su destino final, teniendo en cuenta tanto el nivel mínimo como el nivel máximo requerido.

Para medir la potencia y los niveles de las señales en las comunicaciones ópticas se suele emplear las unidades de decibelios (dB) aunque en el sistema internacional ésta se exprese en vatios (W), pues es más precia una escala logarítmica que una escala lineal al variar algunos ordenes de las magnitudes, además, se hace más fácil realizar las operaciones matemáticas cuando así se necesite. En la ecuación (1) se puede observar la forma en la

que se relacionan estas dos magnitudes, siendo P_t la potencia de transmisión y su correspondiente equivalente de dBm en mW.

$$P_t(dBW) = 10 \log P_t \ (W) \ , \tag{1}$$

También se debe recordar que la señal emitida desde el transmisor pierde potencia a medida que se propaga por la fibra óptica, es decir, la señal se atenúa mientras llega al receptor. Esta atenuación puede ser medida empleando la ecuación (2), donde P_t nuevamente es la potencia del transmisor y P_r la potencia del receptor.

$$\gamma = \frac{P_r}{P_t} \tag{2}$$

Que expresada en términos de dB será de la forma de la ecuación (3)

$$\gamma(dB) = 10 \log \gamma = \ P_r(dBm) - P_t(dBm) \tag{3}$$

En las redes GPON que emplean un canal de 2.488Gbps descendente la potencia media inyectada máxima del transmisor OLT es de +12 dBm y la potencia media inyectada mínima es de +8 dBm y el umbral de recepción de la ONT es de -23dBm, para el caso de las redes GPON que emplean un canal de 1.244Gbps ascendente su potencia media inyectada mínima del transmisor ONT es de –7 dBm y la potencia media inyectada máxima es de -2 dBm siendo el umbral del receptor OLT de -28 dBm.

Se debe tener especial atención cuando se transmite información en el sentido ascendente, es decir, desde la ONT hacia el/los OLT ya que la ONT no debería inyectar potencia en los intervalos en los que no se encuentre en funcionamiento ya sea porque no ha sido asignado a dicha ONT o porque se encuentra en tiempo de guarda durante estos intervalos, sin embargo, se permite un nivel menor que la sensibilidad mínima de -10dBm (sin entrada al transmisor) y un nivel máximo de +3dB. Un valor medio máximo de retardo de transferencia de señal de 1.5 ms.

Así como su implementación en algunos países europeos como lo es España quien logra ser pionera en redes inalámbricas con grandes velocidades de procesamiento de datos, y en otros países como China y Hong Kong que encabezan la lista de países pioneros en este tipo de redes según el informe global sobre tecnologías de la información, Colombia no se quiere quedar atrás y por eso los grandes operadores le apuestan a las velocidades de gigabit por segundos para acceder a la red y aprovechar al máximo los beneficios en línea que esta ofrece. Esta tecnología logra dinamizar la competencia, mejora los servicios para los usuarios y abre las puertas a nuevos e importantes avances tecnológicos que logran ser transversales en todos los sectores de la sociedad como en la educación, el agro colombiano o la productividad de la industria.

La empresa de telecomunicaciones de Bogotá (ETB) junto con UNE y Azteca Comunicaciones son los encargados de dar este gran salto que con apoyo de algunos planes del gobierno busca llegar a todo el país con esta tecnología. Estos operadores emplean redes GPON debido a sus grandes ventajas y los alcances que se pueden lograr con la misma. ETB se considera pionera en las comunicaciones de la ciudad y justamente por esto es la encargada de gestionar una red óptica pasiva con capacidad de gigabit (GPON) en la

capital colombiana mejorando significativamente la localización de los fallos de la red y a su vez la solución en tiempo real de los mismos, esto hace que la operación y el mantenimiento (O&M) del sistema sea muy eficiente.

Para el año 2012 la empresa de telecomunicaciones de Bogotá empezaba a formar la idea de contar con una ciudad que empleará las primeras redes de tipo GPON y comenzaba a crear una red FFTH cambiando las redes de cobre convencional por fibra óptica, pero conservando los caminos ya existentes, en 2013 esta idea tomo fuerza y para lograrlo contaría con la ayuda de la empresa de soluciones tecnológicas ZTE y la empresa Alcatel-Lucent sin embargo, se quedaba corto a momento de dar soporte técnico de extremo a extremo en la redes de FFTH y GPON. Tres años después de esta gran inversión se sabe que la ETB cuenta con al menos dos millones de suscriptores de telefonía fija, de los cuales tan solo en el primer semestre del presente año los suscriptores pasaron de 545 mil clientes en el 2015 a 640 mil clientes en banda ancha, es decir, el 34% del mercado de banda ancha de la ciudad y en cuanto a fibra óptica la ETB ganó más de 45 mil usuarios en este mismo periodo de tiempo proyectando una gran demanda en el uso de estos servicios de alrededor de 200 mil clientes.[11]

Alcatel-Lucent es una empresa francesa con más de cincuenta años de presencia ininterrumpida en el país logrando traer al país grandes avances tecnológicos como las transmisiones satelitales, la red de microondas y la fibra óptica. Esta empresa se encarga de crear redes IP, de acceso de banda ultra ancha y de tecnología en la nube, su velocidad, flexibilidad y seguridad en las redes hace que sea líder tecnológico en todas partes del mundo, crea la ilusión de tener un ancho de banda aparentemente infinito que hace que las redes se expandan rápidamente sin ninguna aparente limitación.

El proveedor global de equipamiento de telecomunicaciones y redes ZTE y la ETB lograron obtener el premio a la innovación en infraestructura de red fija entregado por Global Telecoms Business (GTB) en los premios de la innovación 2016 con el proyecto “EasyOptical + medidor óptico (OTDR)” que consta de siete módulos: el diagnostico de fallas, monitoreo en tiempo real, procesamiento de alarma, predicción de rendimiento, estadística y análisis, evaluación en línea y optimización en línea, con esta propuesta, se buscó una solución rápida y eficiente para el monitoreo en tiempo real de todo el equipo en un sistema de FTTH independientemente de su proveedor convirtiendo este sistema en visible, manejable y controlable. Algunas pruebas realizadas en el lado de las OLT lograron mostrar con gran sorpresa la rápida detección de los fallos y la precisa respuesta que tuvo para su solución. Este proyecto permite una rápida gestión de los fallos en las redes FTTx, mejora la eficiencia O&M y optimiza la calidad del servicio dando como resultado una muy buena acogida por parte del usuario y a su vez minimizando las quejas del cliente frente a los servicios prestados, haciendo que la preferencia de los usuarios frente a las demás empresas del mercado aumente. [12]

Algunos de los servicios que ofrece ETB con este importante avance tecnológico es el servicio de N-Play que cuenta con una plataforma virtual que permite convertir el contenido allí presente en señales luminosas que viajan por las redes de fibra óptica sin ningún reparo, también permite el manejo de la voz, el video y los datos a grandes velocidades. Este nuevo servicio permite que la ETB innove en el mercado colombiano disponible sobre fibra óptica, sin embargo, algunas empresas que cuentan con presencia en la capital Colombia también

ofrecen servicios similares que hacen que la competencia entre operadores sea cada vez más fuerte obligándolos así a mejorar cada vez más tanto sus servicios, como la atención al usuario y sobre todo la respuesta oportuna y eficaz a los fallos que se puedan presentar.

7.2 REDES DE SENSORES

En la caracterización de redes de sensores inalámbricas se tendrán en cuenta la documentación previa que contenga conceptos como las diferentes topologías, el radio de acción y la potencia de transmisión entre otros.

Debido a las nuevas tecnologías que rápidamente ofrecen soluciones a la necesidad de querer controlar y monitorear a diario todo lo que rodea al ser humano, surge ahora una nueva inquietud en la que se pueda dar identidad a cada uno de los dispositivos que conforman dicho medio.

Es allí donde surge el término internet de las cosas, pues esta nueva identidad que se le ha asignado a cada dispositivo debe mantener una conexión real desde donde se pueda mantener una visión constante de su estado sin importar su ubicación u hora; para el año 2015 ya habían alrededor de 4.9 mil millones de dispositivos inteligentes activos y se espera que para 2020 sean cerca de 25 mil millones de dispositivos interconectados con sistemas domésticos y todos los medios de transporte que esto conlleva para trabajar de forma conjunta y alcanzar sociedades más eficientes y prosperas, sin embargo, la seguridad de la información que es almacenada en la red puede quedar expuesta a piratas informáticos que logran obtener datos tan importantes como para lograr que toda una ciudad colapse.

Esta reciente innovación en el ámbito tecnológico ha llevado al surgimiento de las redes de sensores, que cobran especial atención gracias a la gran versatilidad que estas ofrecen, otorgando direcciones IP a cada dispositivo, logrando que estos pertenezcan a la Internet y logren aprovechar al máximo las ventajas que esta red ofrece conectando los objetos físicos con los dispositivos digitales. Estas redes de sensores se encuentran a su vez conectadas en algunas ocasiones con una red LAN que se encarga de transmitir la información recolectada a la Internet como se observa en la Figura 10.

Las redes de sensores inalámbricos logran dar solución al cableado que generalmente eleva los costos en cuanto a su instalación e incluso pueden llegar a poner en riesgo la salud e integridad de quienes tengan interacción con éstas. Las redes de sensores inalámbricos o WSN logran monitorear algunas condiciones físicas como lo pueden ser la temperatura, el movimiento o la presión, entre otras, recolectando gran cantidad de datos, para cumplir con esta importante función generalmente se emplean micro sensores que logran comunicarse entre sí consumiendo muy poca energía, pero teniendo larga duración.

Estas redes de sensores inalámbricos cuentan con pequeños rangos de cobertura, además pueden desplegarse en cualquier lugar siendo totalmente autónomas tanto en gastos energéticos como en su configuración, ya que logran funcionar con baterías pequeñas o que incluso pueden ser cargadas con paneles solares. La energía que consumen dichas WSN es mínima porque logran pasar de un estado de inactividad que consume muy pocos recursos a un estado de recepción o transmisión volviendo a su estado de inactividad

evitando el desgaste de energía y aun así transmitir la información hasta un nodo central desde donde se controla y/o administra dicha información.

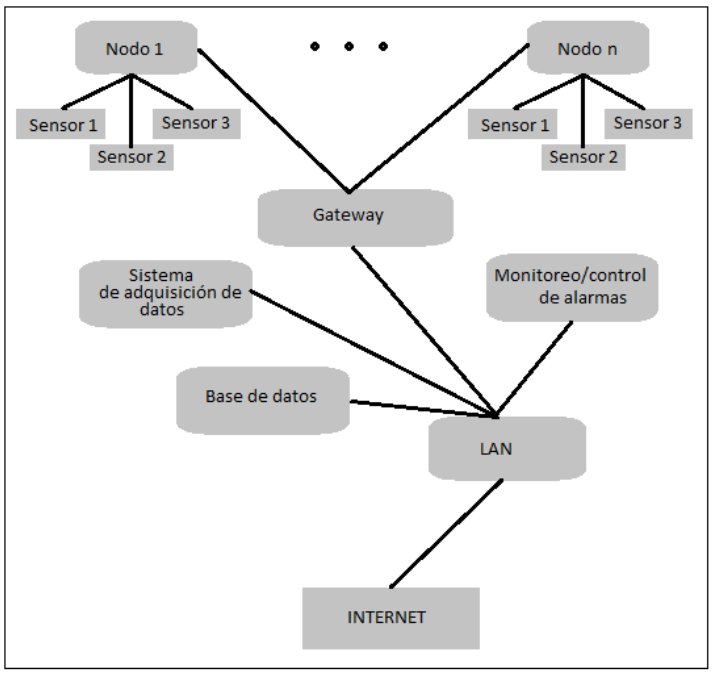


Figura 10: Configuración de una WSN con la Internet

Tomado de: [Elaboración propia].

Al lograr coordinar varias de estas WSN se puede obtener una red que lleve a cabo una tarea específica con alta precisión si se logran distribuir en los lugares adecuados, ya que si alguno de los nodos que conforman esta red se ve expuesto a una falla éste redirecciona la información hacia otro de los nodos haciendo necesario los ajustes de potencia y tasas de bits transmitida para volver a transmitir dicha información hacia el nodo destino para no perder nunca la comunicación.

Entre las características principales de las WSN se encuentra su gran precisión al dedicar todos sus recursos a una aplicación específica interactuando directamente con el medio ambiente logrando gran cantidad de datos recolectados, como se nombraba anteriormente el bajo consumo de energía también logra ser una muy buena ventaja ya que en algunas ocasiones pueden utilizar energía limpia o que capta directamente del ambiente, otra ventaja de este tipo de redes es su alta tolerancia a las fallas porque cuenta con una estructura capaz de trabajar con un número grande de sensores haciendo que sea un sistema escalable a pesar de que cambie el tamaño de la red, la densidad de los datos o la topología de la misma contando con protocolos de ruteo específicos para tal fin.

Las WSN se encuentran conformadas por sensores, que se encargan de tomar las mediciones en el medio físico necesarias para obtener la información que se desea analizar; nodos de sensores que transmiten la información recolectada por los sensores hacia la estación base convirtiendo dichos datos en señales eléctricas si fuese una red tradicional empleando el cableado común, o en señales de radiofrecuencia en el caso de las redes inalámbricas; los Gateway o puertas de enlace que se encargan de conectar los nodos de sensores a la estación base permitiendo el redireccionamiento y gestión de la información;

la estación base que finalmente almacenará los datos recolectados y por último la aplicación cliente/servidor que permitirá al usuario tener interacción con la información obtenida.

En la implementación de estas redes de sensores inalámbricas se encuentran algunas topologías básicas para lograr que los datos medidos y los resultados esperados sean lo más precisos posible optimizando los recursos. Las principales topologías empleadas son:

- **Estrella:** en este tipo de topología la información es enviada a un Gateway que transmite la información a los nodos de sensores destino, los sensores no intercambian información directamente, sino que lo hacen por medio del Gateway, así como se ve en la Figura 11. Esta topología logra un consumo mínimo de energía porque el sensor solo se encontrará activo al momento de transmitir o recibir información manteniéndose inactivo el resto del tiempo, sin embargo, esta topología cuenta con una gran debilidad al momento de presentarse una falla en alguno de los nodos ya que no cuenta con rutas alternas lo que facilita la perdida de información.

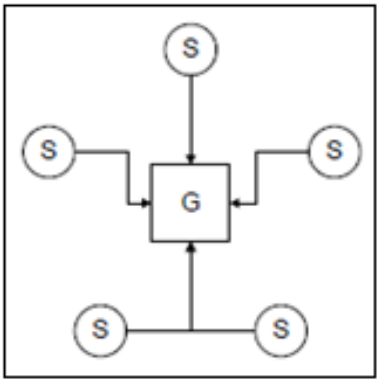


Figura 11: Topología en estrella redes WSN

Tomado de: [13].

- **Malla:** en esta topología todos los sensores y nodos de sensores son idénticos, cada nodo puede recibir y enviar información directamente al otro nodo y hacia el Gateway como se observa en la Figura 12. Este tipo de topología cuenta con una alta tolerancia a las fallas ya que cada nodo cuenta con varias rutas de comunicación hacia el Gateway, sin embargo, el periodo de espera para enviar o recibir información puede ser largo ya que depende directamente del número de nodos con el que cuente la red.

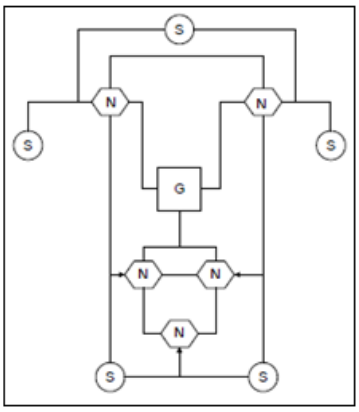


Figura 12: Topología tipo malla redes WSN

Tomado de: [13].

- **Híbrida:** este tipo de topología cuenta con características de la topología estrella y de la topología malla logrando combinar el bajo consumo de energía y el cubrimiento de una gran extensión con exitosa reacción ante los fallos como se muestra en la Figura 13 pero manteniendo los largos tiempos de espera para enviar o recibir información si la malla estuviese conformada por varios nodos de sensores.

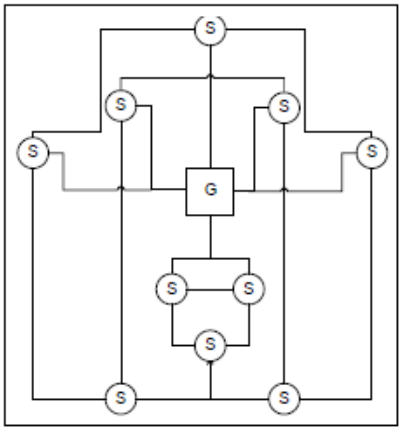


Figura 13: Topología híbrida redes WSN

Tomado de: [13].

Las WSN se encuentran conformadas por capas a nivel hardware que se encargan de cumplir funciones específicas, estas capas se comunican entre sí por un bus común así no se vayan a emplear todas; estas capas son:

- **Capa de sensores:** es la encarga de obtener la información captada del exterior, así como de reaccionar a los estimulo del mismo dependiendo de la aplicación para la que haya sido configurada.

- **Capa de procesamiento:** en esta capa se procesan y organizan los datos obtenidos en la capa de sensores.

- **Capa de alimentación:** esta capa suministra la tensión correspondiente para el funcionamiento de cada una de las etapas que componen las WSN.

- **Capa de comunicación:** se encarga de recibir y transmitir la información obtenida de la capa de sensores.

Ya que las WSN se encuentran compuestas principalmente por sensores y pequeños microcontroladores, así como la unidad de transmisión y recepción de datos y la fuente de energía como se muestra en la Figura 14 que monitorizan y se adaptan al ambiente donde se instalan, también se emplean estos embebidos para el manejo y control de los datos recolectados como se expuso anteriormente.

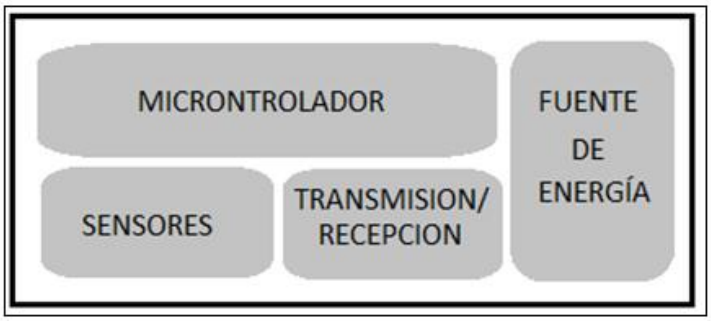


Figura 14: Componentes de un módulo perteneciente a WSN

Tomado de: [14].

Algunas aplicaciones que se le suelen dar a las WSN pueden ser en el ámbito militar como la vigilancia y monitorización de terrenos específicos o la detección de ataques biológicos o químicos; en el campo médico se suelen emplear como diagnóstico temprano en algunas enfermedades, control del suministro de medicamentos o como supervisión de los signos vitales de los pacientes; en el ámbito industrial pueden ser utilizadas como control de inventarios de ciertos elementos, la automatización de los hogares y su constante interacción con los electrodomésticos y como aplicaciones turísticas o de actividades interactivas entre usuarios.

Sin embargo, las aplicaciones más comunes se encuentran en el sector medio ambiental ya que se emplean como monitorización de cultivos o riego de los mismos, la detección y prevención de desastres naturales e incluso la facilitación de los estudios sísmicos. En el caso que se desee tener mayor control sobre un terreno específico que posteriormente se desea emplear para cultivar se hace necesario monitorear constantemente múltiples variables como la humedad, la luz o la temperatura en un periodo de tiempo específico que puede ser desde segundos hasta meses completos de forma segura y poco invasiva para que no se afecte el terreno permitiendo trazar ciertos procedimientos a seguir y así lograr productos en óptimas condiciones para el consumo humano. Incluso se ha podido desarrollar módulos completamente dedicados a la agricultura como es el caso de la última versión de Crossbow ekoPro con sensores de alta tecnología que permite determinar la microvariación en la temperatura del cultivo, las infecciones que puede tener e incluso la eficiencia del riego en tiempo real y permitiendo tener acceso a dichas información por medio de una plataforma virtual.

Como este tipo de módulos está en auge se hace necesario el uso de estándares y protocolos que determinen la mejor forma de emplear los recursos con los que se cuentan; algunos de estos estándares y protocolos son IEEE 802.11 g (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE 802.15.4 (ZigBee) entre otros.

En el estándar IEEE 802.15.4 se hace especial énfasis en los parámetros que se deben seguir si se desean emplear dispositivos de baja transmisión de redes inalámbricas, este estándar cuenta con una velocidad de transmisión de 250 kbps (la más baja entre los estándares anteriormente mencionados) pero que puede llegar a soportar hasta 64.000 nodos por master (más de mil veces superior a los demás estándares anteriormente mencionados) lo que hace que la operatividad entre sensores que manejen este tipo de estándar sea mucho más eficiente al necesitar menos Gateway’s por área, además cuenta con una cobertura desde 10 hasta 75 metros y emplea las bandas comprendidas entre 2.4

GHz y 2.4823 GHz para la transmisión de datos. En este protocolo se suele transmitir pequeños paquetes de datos que no contiene video ni audio por lo que lo hace acorde a este tipo de aplicaciones.

Principalmente se suele emplear este estándar en dispositivos con un alcance máximo de 20 metros y soportando un rango de temperatura comprendido entre -40ºC y 85ºC. sin embargo, su principal característica son las bandas de frecuencia que emplea para transmitir dichos datos, ya que estas se encuentran limitadas por la capa física que dispone de dos opciones, permitiendo así un amplio rango de aplicaciones en red.

Cada una de las capas físicas poseen un rango de transmisión especifico, la primera capa física opera en la banda de 868 MHz permite un rango de 20kbps para Europa y la banda de 915 MHz con un rango de transmisión de 40kbps para Estados unidos, siendo su principal aplicación la solución a la creciente industria de la automatización de los hogares con mayor área de cobertura reduciendo el número de nodos y con una sensibilidad de -92dBm; la segunda capa física emplea la banda de 2.4GHz a una velocidad de 250kbps, esta capa se emplea principalmente en aplicaciones industriales, médicas y científicas ya que cuenta con un mayor rango de transmisión debido al orden en la modulación de los datos y cuenta con una sensibilidad de -85dBm teniendo así un amplio rango de tolerancias a los fallos [15].

Debido que la banda de 2.4GHz se suele emplear en múltiples servicios es común que se produzca interferencia con alguna otra aplicación, sin embargo, esta situación se suele considerar aceptable ya que las aplicaciones que emplean este estándar son de baja calidad de servicio, realizan varios intentos para completar la transmisión de paquetes y no requieren comunicación asíncrona, pero si es de vital importancia el bajo consumo de energía y con baterías de larga duración, que se logra mediante el funcionamiento típico de este tipo de dispositivos, pues como se especificó anteriormente estos dispositivos se encuentran en modo “suspendido” mientras no se encuentre recibiendo o transmitiendo datos.

Los principales actuadores en las redes de sensores son los mismos sensores que se ubican en lugares precisos o de forma pseudoaleatoria según la aplicación que se desea realizar. Una de las plataformas más empleadas es la Tmote Sky de la empresa Moteiv Corporation que fue una de las primeras empresas en incursionar en este mercado, esta plataforma consta de varios sensores como de humedad, luz y temperatura, también ofrece una estabilidad relativamente buena al momento de trasmitir los datos recolectados ya sea de forma inalámbrica o alámbrica y la presencia de un sistema operativo embebido que cuenta con un tamaño dedicado al almacenamiento de datos y cuya velocidad de recolección es buena.

En la Figura 15 se observa un módulo Tmote Sky con algunos de sus principales componentes, este módulo es inalámbrico y de potencia ultra baja que se apoya en estándares como IEEE 802.15.4 para operar sin problemas con los periféricos con los que cuenta o incluso con otros módulos cercanos, lo que lo hace compatible con gran variedad de aplicaciones de monitoreo y recolección de datos en una red de sensores especifica.

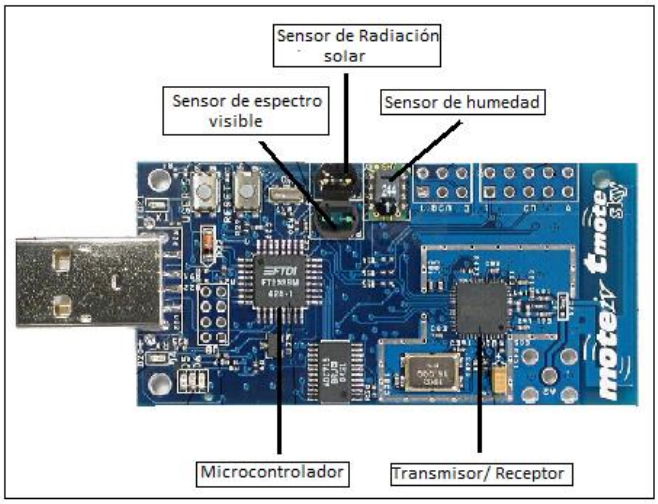


Figura 15: Módulo Tmote Sky de moteiv

Tomado de: [16].

Este módulo transmite la información recolectada con una frecuencia de 2.4 GHz y una velocidad de 250 Kbps como se especifica en el estándar IEEE 802.15 y que lo hace compatible con una red de acceso GPON, cuenta con un microcontrolador integrado del fabricante Texas Instruments que posee 10 kilo byte de memoria RAM, 48 kilo byte de memoria flash y 1024 kilo byte de almacenamiento, además trabaja a una frecuencia de 8 MHz. Este tipo de módulos cuenta con un sistema de alimentación que se encuentra entre 2.1 V y 3.6 V lo que indica que el consumo de energía por parte de todos sus componentes es muy bajo y que incluso puede ser mucho menor al momento de encontrarse en inactividad que puede ocurrir en un tiempo menor de 6µs.

Los sensores de humedad y temperatura con los que cuenta este módulo son fabricados por Sensirion AG y se colocan directamente en el módulo Tmote, estos sensores se calibran previamente para que su salida -que es de forma digital- sea precisa, sin embargo, el sensor de humidad es un poco más inestables que el sensor de temperatura pese a contar con características similares y proceder del mismo fabricante. El modulo cuenta con espacio para dos fotodiodos que por defecto cuenta con un sensor de radiación fotosintéticamente activa y un sensor que detecta todo el espectro visible inclusive las frecuencias del infrarrojo, estos sensores son fabricados por la empresa Hamamatsu Corporation aunque pueden ser reemplazados en cualquier momento por otros que cumplan con las características físicas similares.

El sensor de humedad cuenta con una resolución de 0.03 - 0.5 %HR (Humedad Relativa) y trabaja en un rango desde 0 hasta 100 %HR, el sensor de temperatura cuenta con una resolución de 0.01-0.04 ºC y trabaja en un rango de -40 hasta 123.8 ºC. [16]

Otro de los grandes pioneros en las tarjetas de sensores es Crossbow Technology quien ha desarrollado gran variedad de estos módulos contando con algunas características específicas dependiendo de su aplicación. Uno de sus últimos desarrollos es el Mica2dot que es empleado principalmente en la supervisión de la temperatura del medio ambiente, este módulo trae una gran ventaja consigo y es el tamaño y la forma en que se ha desarrollado, pues como se observa en la Figura 16 es de tan solo 25mm (similar a una moneda de un centavo) y al igual que la mayoría de módulos su consumo de potencia es bajo y su interacción con los demás sensores se realiza de forma inalámbrica.

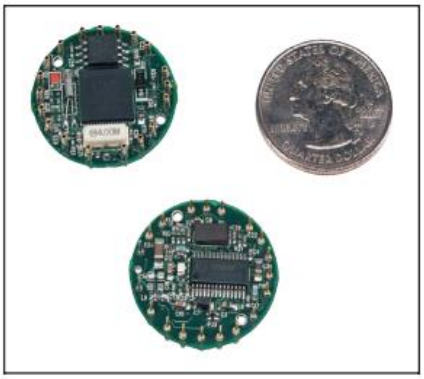


Figura 16: Módulo Mica2dot de Crossbow

Tomado de: [17].

Su gran desventaja se basa en la frecuencia empleada para la transmisión de los datos ya que emplea los canales de 868/916 MHz, 433 MHz o 315 MHz que lo hace incompatible con otros módulos incluso de el mismo fabricante.
El procesador con el que cuenta es de tipo ATmega con 128 KB de memoria flash y 4 KB de memoria EEPROM. Cuenta con sensores de luz, temperatura, humedad y otros que se pueden conectar de forma externa por medio de los 18 pines que lo rodean.

Otro modulo utilizado como red de sensores es el Sun SPOT que principalmente se creó bajo los parámetros del estándar IEEE 802.15.4 sin embargo, empleó una extensión de Java para hacer que su interfaz gráfica fuese mucho más amigable hacia el usuario ya que este módulo se implementó en dispositivos pequeños que se encargan de medir las manchas solares.

Esta tarjeta cuenta con una CPU de 32 bits que funciona a 180 MHz, cuenta con una memoria RAM de 512 KB y 4MB para la memoria flash que a su vez transmite información a 2.4 GHz, también cuenta con un acelerómetro en tres ejes desde 2G hasta 6G un sensor de temperatura y un sensor de luz entre otras características adicionales. [17]

CAPÍTULO IV: DISEÑO

Al momento de realizar el diseño del sistema de transmisión de señales inalámbricas sobre un sistema de fibra óptica se tuvo en cuenta los conceptos estudiados anteriormente, así como los requerimientos de la propuesta.

Con base en las características principales con las que cuentan los sistemas de fibra óptica como lo es la tasa de transmisión de datos que se desea, la velocidad a la que será transmitida la información y la longitud con la que contará la fibra óptica pues como se estudió anteriormente la pérdida de la información que se generan mediante la transmisión de datos por este medio son proporcionales a la longitud de la fibra deseada se realizó la evaluación de las redes de acceso óptico logrando comparar tanto la distancia máxima que se logra con cada una de ellas, la potencia que se necesita para su funcionamiento, los protocolos de acceso con los que cuenta una red de acceso y principalmente los costos que conllevaría la implementación de la propuesta presentada.

Para comenzar con el diseño del sistema de transmisión sobre un sistema de fibra óptica se tomó como referencia la cobertura de fibra óptica que ha implementado la ETB como principal proveedor de este medio de transmisión en la ciudad de Bogotá D.C, así como las condiciones necesarias para definir la red de sensores y la red de acceso óptico que se diseñaron para satisfacer los requerimientos de la propuesta.

El diseño de la propuesta se simuló con el software OptiSystem [7], el cual hace especial énfasis en los sistemas de comunicaciones ópticas ofreciendo gran variedad de elementos para el diseño de las mismas, así como de diferentes elementos para la visualización de los resultados de la simulación, ofrece la posibilidad de ajustar los parámetros de los componentes de forma individual o empleando parámetros globales que permiten la variación de forma simultánea en caso de contar con varios elementos del mismo tipo. Dentro del diseño de los sistemas deseados se pueden emplear cualquier tipo de señales dependiendo de la necesidad del proyecto, los tipos de señales con las que cuenta el simulador son:

- **Binaria:** Son las señales generadas por componentes generadores de secuencias de bits, generadores de impulsos en los transmisores o por interruptores digitales, estas señales están compuestas por secuencias de unos y ceros, la propiedad principal es la tasa de bits y se representa con enlaces de color rojo.

- **M-Ary:** Son señales multinivel que se emplean especialmente en los diferentes elementos de modulación presente como el PAM, QAM, DPSK, entre otros. Estas señales son parecidas a las señales binarias sin embargo las señales M-ary puede tomar cualquier valor en lugar de solo tomar valores de unos y ceros, se representa con enlaces de color rojo oscuro.

- **Eléctrica**: Las señales eléctricas son generadas por componentes como los generadores de impulsos o por foto receptores y están compuestas por la forma de onda de la señal muestreada en el dominio del tiempo. Sus principales propiedades son la variación de ruido de la señal en el dominio del tiempo y la densidad espectral de la potencia de ruido en el dominio de la frecuencia. Las señales generadas por el generador de pulsos es una señal pura por tanto no contiene ruido de información, sin embargo, las señales generadas por los fotodetectores pueden ser configuradas para que contengan a la salida el ruido de la información, se representa con enlaces de color azul.

- **Óptica:** Las señales ópticas son generadas por componentes como transmisores láser y se pueden representar por señales simples, señales parametrizadas y señales de ruido; las señales simples son aquellas que solo cuentan con una banda de frecuencia continua como son los portadores ópticos modulados, un ejemplo de estos módulos son los láser CW, las señales parametrizadas se encuentran presentes en casi todos los fenómenos físicos y se tiene como principal característica la relación señal/ruido como los sistemas WDM o la estimación de rendimiento de los EDFA o las señales de ruido ASE, las señales de ruido representan el ruido promedio por densidad espectral modificando la resolución para mantener una simulación precisa como por ejemplo en los amplificadores ópticos donde se define la resolución inicial y el ancho de banda de ruido, cualquiera de los tres tipos de señales ópticas se representa por enlaces de color verde.

- **Otro tipo:** si se emplean otro tipo de señales diferentes a las antes mencionadas serán representadas por enlaces de color verde oscuro como por ejemplo los enlaces generados por splitters o combinadores [18]

En la Figura 17 se representan los tipos de señales que emplea el simulador, así como su correspondiente color que la representa.

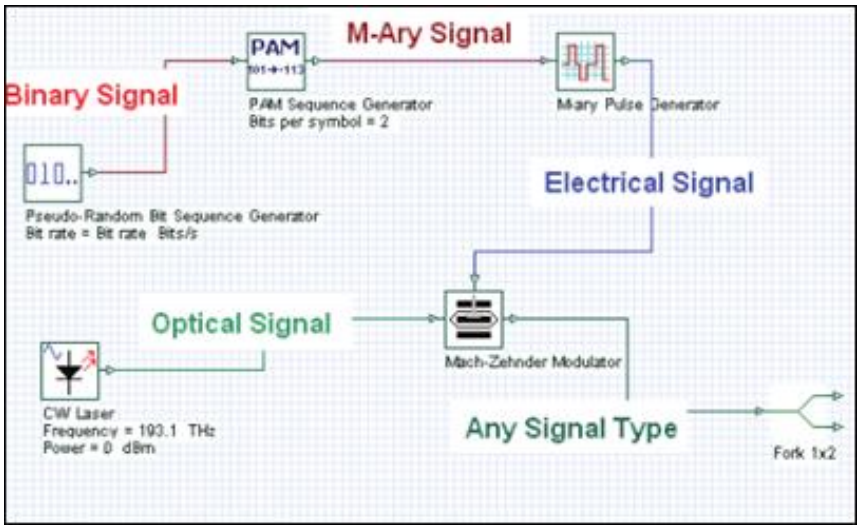


Figura 17: Tipos de señales del simulador

Tomado de: [18].

Algunas de las herramientas de visualización más importantes con las que cuenta el simulador son:

- **Analizador de espectro óptico (OSA):** El analizador de espectro muestra la señal modulada en el dominio de la frecuencia, es necesario configurar la resolución del ancho de banda por medio de los diferentes tipos de filtros rectangular, Butterworth o Gaussiano para que los resultados sean de forma precisa.

- **Visualizador óptico en el dominio del tiempo:** muestra la señal óptica modulada en el dominio del tiempo.

- **Osciloscopio:** muestra la señal eléctrica en el dominio del tiempo.

- **Analizador de BER:** mide el rendimiento del sistema en base a la señal antes y después de la propagación por medio de un diagrama de ojo y de indicadores como el factor de calidad (Q), la tasa de error de bits (BER) mínimo o la amplitud del diagrama de ojo entre otros. Por medio del BER se puede saber la calidad del sistema de transmisión ya que si este es cero o cercano a cero el factor de calidad Q será alto porque son inversamente proporcionales como lo muestra la ecuación (4) y se dice que el sistema no cumple los requerimientos de calidad. Para que un sistema de transmisión se considere bueno el BER deberá ser del orden de 10^{-6} y el sistema será muy bueno si el BER se encuentra dentro del rango de 10^{-9} y 10^{-12}

$$BER = \frac{1}{2}\, erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{4}$$

  Donde erfc es definida como una función de error complementaría, el factor de calidad está dado por la ecuación (5) y representa una relación señal a ruido en unidades de tensión o de corriente. [19]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \tag{5}$$

- **Medidor de potencia:** Muestra la potencia entregada por determinado componente ya sea de una señal óptica o de una señal eléctrica, emplea unidades de vatios (W) y de decibelios (dB).

Al iniciar la simulación es necesario configurar los parámetros globales que se tendrán en cuenta todo el tiempo y servirá de referencia tanto para los componentes que se empleen como para las herramientas de visualización. Para el cálculo de los parámetros globales se debe tener en cuenta la longitud de la secuencia, el Bit rate y las muestras por bit, para la simulación correspondiente al desarrollo de la propuesta se empleó una longitud de secuencia de 256 bits, un bit rate de 1.25Gbit/s para el canal de subida y 128 muestras por bit, empleando las ecuaciones (6), (7) y (8) se puede observar los valores del número de muestras y de la tasa de muestreo que se configuraron como parámetros globales de la simulación.

$$\begin{aligned} \textbf{Número de muestras} &= Longitud\ de\ secuencia * Muestras\ por\ bit \\ &= 256\ Bits * 128 \\ &= 32768\ muestras \end{aligned} \tag{6}$$

$$\textbf{Tiempo de ventana} = \frac{Longitud\ de\ secuencia}{Bit\ rate} = \frac{256\ Bits}{1.25\ GBit/s} = 2.048 \times 10^{-7} s \tag{7}$$

$$\textbf{Tasas de muestreo} = \frac{Numero\ de\ muestras}{Tiempo\ de\ ventana} = \frac{32768\ muestras}{2.048 \times 10^{-7} s} = 160 GHz \tag{8}$$

En la Figura 18 se observa la configuración final de los parámetros globales empleados en la simulación del diseño y se selecciona como parámetro de referencia el Bit rate.

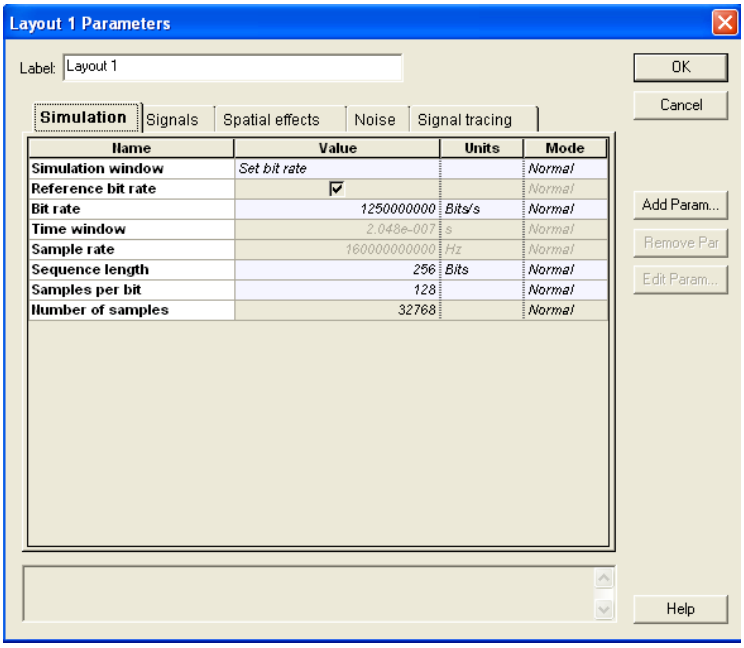


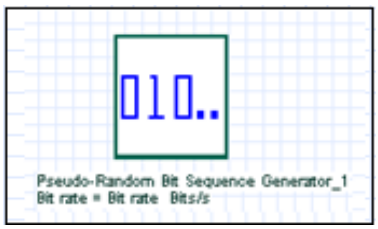
Figura 18: Parámetros globales de simulación

Tomado de: [Simulador].

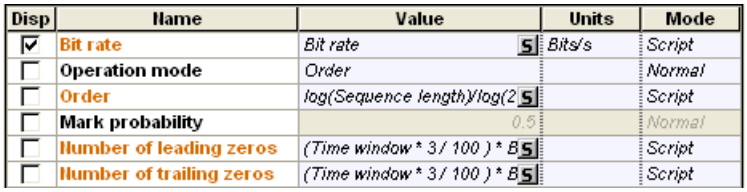
La red de sensores que se empleó para el diseño constará de 32 nodos simétricos donde cada nodo está compuesto por un sensor, un trasmisor óptico configurado con las características típicas de la transmisión de datos en el canal de subida de una red GPON y un multiplexor que permite obtener una señal óptica con la información recolectada por los sensores pero lista para ser trasmitida sobre una red GPON, a continuación, se describen los componentes empleados en cada uno de los nodos que componen la red:

Módulo generador de secuencia binaria pseudo-aleatoria (PRBS)

Este módulo representará los datos recolectados por el sensor y toma como referencia para definir el ciclo de trabajo el Bit rate definido en el proyecto principal y así generar la secuencia de unos y ceros correspondiente, sin embargo, puede también configurarse para que genere una cadenas de unos y ceros específica definiendo el número de ceros principales y el número de ceros finales por medio de los parámetros number of leading zeros y number of trailing zeros respectivamente como se muestra en la Figura 19b aunque en este caso no se definió una secuencia específica por lo que se dejó la configuración inicial y la señal de salida de este módulo por lo tanto será de tipo binaria.



a) Módulo PRBS



b) Parámetros del módulo PRBS

Figura 19: Módulo PRBS

Tomado de: [Simulador].

Módulo codificador NRZ

Este módulo codificador non return zero (NRZ) utiliza un muestreo para asignar un nivel alto cuando el bit que recibe corresponde a un uno “1” y un nivel bajo cuando el bit recibido es un cero “0” arrojando una señal eléctrica a partir de la señal binaria procedente del módulo PRBS. En la Figura 21b se observa los parámetros con los que cuenta este módulo entre los que se encuentra la forma del pulso que se desea (exponencial, lineal, gaussiano o sinusoidal), la amplitud de la señal y los tiempos tanto de subida como de bajada de cada pulso, sin embargo, para el caso de estas simulaciones su configuración se dejó por defecto.

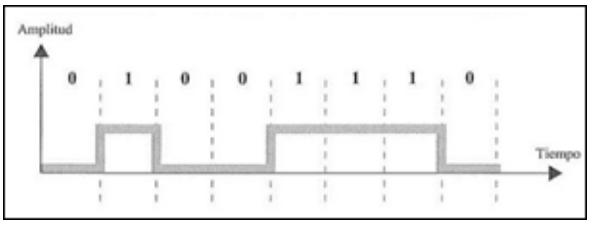
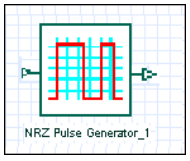


Figura 20: Codificación NRZ

Tomado de: [Sistemas de multiplexado: codificación y decodificación, pág. 1].



Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Rectangle shape	Exponential		Normal
☐	Amplitude	1	a.u.	Normal
☐	Bias	0	a.u.	Normal
☐	Position	0	bit	Normal
☐	Rise time	0.05	bit	Normal
☐	Fall time	0.05	bit	Normal

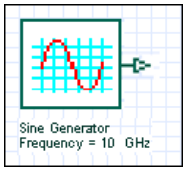
a) Módulo NRZ. *b) Parámetros del módulo NRZ.*

Figura 21: Módulo NRZ

Tomado de: [Simulador].

Generador de onda seno

La modulación de la señal eléctrica que contiene la información ya codificada es multiplicada con una señal representada por un generador de onda seno pues la tasa de transmisión en la fibra óptica para el canal de subida en una red GPON es de 2.4Gbps mientras que la tasa de transmisión de los sensores será de 48Mbps, este módulo se le puede configurar tanto la frecuencia de operación, como la amplitud de la señal y el desfase de la misma que para este caso particular solo se configuró con una frecuencia de operación de 2.4GHz. En la Figura 22 se observa el módulo generado de onda seno, así como los parámetros que lo componen.



Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Frequency	2.4	GHz	Normal
☐	Amplitude	1	a.u.	Normal
☐	Bias	0	a.u.	Normal
☑	Phase	90	deg	Normal

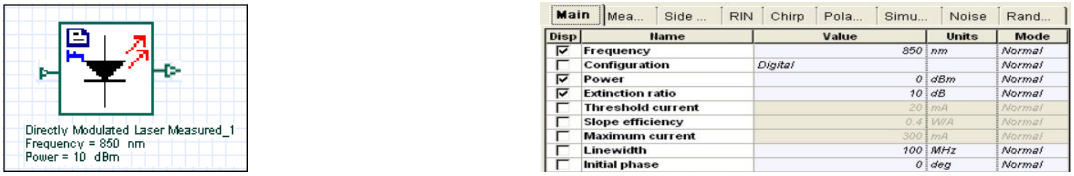
a) Módulo Generado de Onda seno *b) Parámetro del módulo generador de onda seno.*

Figura 22: Módulo generador de onda seno

Tomado de: [Simulador].

Láser de modulación directa

Como ya se expuso anteriormente los láseres son los emisores indicados para las redes PON, el simulador cuenta con una amplia gama de láseres ya sea con modulación externa o con modulación directa, para este caso se ha elegido un láser de modulación directa que produce una señal óptica de onda continua, el módulo permite ajustar entre otros parámetros la frecuencia de operación, la potencia de entrada que será de 0dB que es lo mismo que 1mW y el ancho de línea del láser se ajustó a 100MHz con el fin de que fuese un poco más cercano a la realidad. En la Figura 23 se observa los parámetros principales que componen el módulo, sin embargo, entre las opciones permite ajustar el ruido que compone un emisor real. Los láseres de modulación directa cuentan con la ventaja de mitigar costos de implementación ya que no requiere de moduladores externos que a su vez conllevaría el despliegue de más fibra óptica y la pérdida de información que con esto surge.



a) *Módulo del láser de Modulación directa*

b) *Parámetros del módulo de láser de modulación directa*

Figura 23: Módulo del láser de modulación directa

Tomado de: [Simulador].

En la Figura 24 se observa la configuración del sensor que será la misma para los 32 nodos que componen la red de sensores.

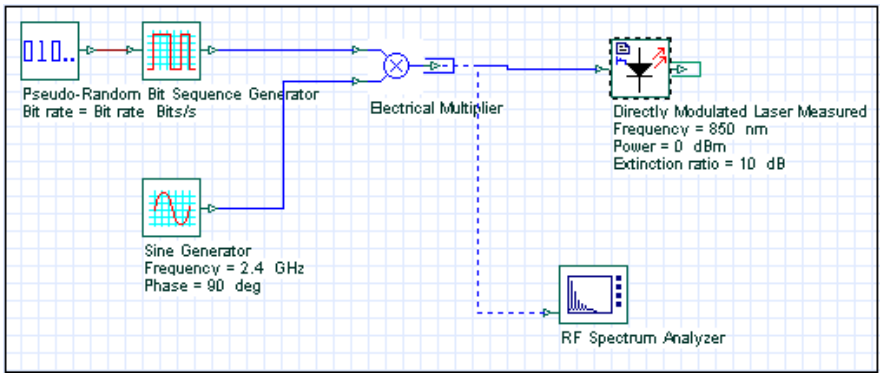


Figura 24: Configuración sensor

Tomado de: [Simulador].

Transmisor óptico

El módulo transmisor óptico está compuesto por un submódulo PRBS como se explicó anteriormente, un submódulo que permite configurar el tipo de modulación que para este caso también será de forma NRZ y de un láser que permite ser configurado por su longitud de onda, la potencia de salida de la señal y el ancho de banda entre otros datos, para este caso la longitud de onda típica para el canal de subida de las redes GPON es de 1330nm, por lo que esta será la frecuencia a la que operar el láser, también se configuró la tasa de

transmisión del láser empleando un factor de división de 50 y como se mencionó anteriormente se toma el bit rate de referencia para que finalmente el láser transmita a un tasa de 25Mb/s como se observa en la Figura 25a.

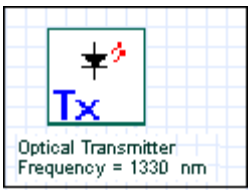
Main | ... | Co... | En... | Sid... | RIN | Chirp | Pol... | Sim... | N... | Ra...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Frequency	1330	nm	Normal
☐	Power	0	dBm	Normal
☐	Extinction ratio	10	dB	Normal
☐	Linewidth	10	MHz	Normal
☐	Initial phase	0	deg	Normal

Main | ... | Co... | En... | Sid... | RIN | Chirp | Pol... | Sim... | N... | Ra...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Bit rate	Bit rate/50 S	Bits/s	Script
☐	Order	log(Sequence length)/log(2 S		Script
☐	Number of leading zeros	1		Normal
☐	Number of trailing zeros	1		Normal

a) Parámetros del módulo trasmisor óptico.



b) Trasmisor óptico

Figura 25: Trasmisor óptico

Tomado de: [Simulador].

Multiplexor WDM

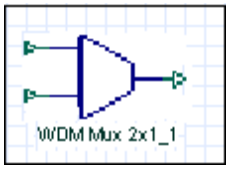
Los multiplexores que ha su vez emplean multiplexacion por longitud de onda se encarga de unir varias señales sobre una sola señal óptica mediante portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, para este caso particular se emplea un multiplexor 2X1 que unirá la señal proveniente del sensor con la longitud de onda de 850nm o de 1310nm y la señal proveniente de la red GPON con una longitud de onda de 1330nm en el canal de subida. En la Figura 26a se presenta la configuración del multiplexor que se empleó, es necesario configurar las longitudes de onda que va a multiplexar, así como el ancho de banda que será de 10GHz y las pérdidas por inserción que serán de 2dB para el peor de los casos.

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Bandwidth	10	GHz	Normal
☐	Insertion loss	2	dB	Normal
☐	Depth	100	dB	Normal
☐	Filter type	Bessel		Normal
☐	Filter order	2		Normal

Main | Channels | Ripple | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Frequency[0]	1330	nm	Normal
☐	Frequency[1]	850	nm	Normal

a) Configuracion parámetros del multiplexor WDM.



b) Multiplexor WDM

Figura 26: Multiplexor WDM

Tomado de: [Simulador].

En la Figura 27 se observa la configuración final de un nodo de la red de sensores, esta configuración se debe replicar para los 32 nodos de la red de sensores.

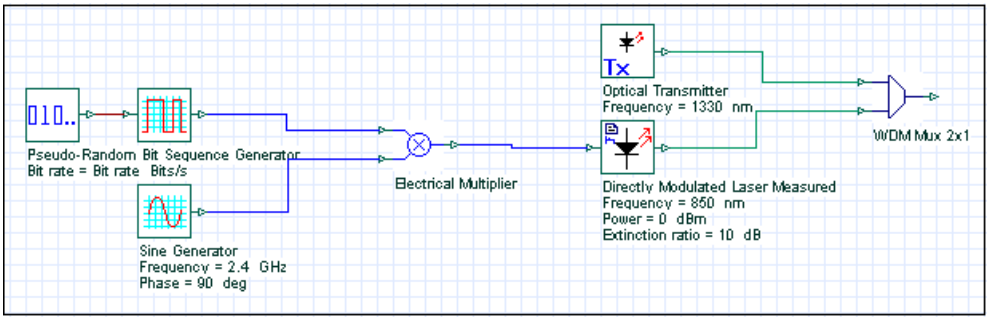
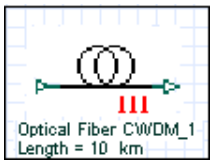


Figura 27: Configuración final nodo sensor

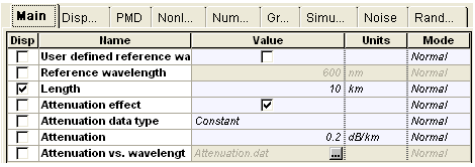
Tomado de: [Simulador].

Tramo de fibra óptica

Para conectar cada nodo sensor con la OLT es necesario emplear tramos de fibra óptica que en este caso será fibra óptica CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) ya que este tipo de fibra es más económica porque emplea multiplexacion por division de onda para unas pocas longitudes de onda activas por fibra aunque su alcance se ve limitado (máximo 50km), mientras que la fibra óptica común puede llegar a soportar más de 256 fibras aunque no todas se utilizan, para el caso de la propuesta aquí presentada es necesario solo dos longitudes de onda (1330nm típica de GPON y 850nm o 1310nm de los sensores) y la longitud máxima que tendrá la fibra será de 20km. En la Figura 28 se observa la representacion simbólica de este tipo de fibra asi como los principlaes parámetros con los que cuenta, dentro de las características que puede tener la fibra permite ajustar la longitud y las pérdidas con las que cuenta , entre estas últimas se encuentra la atenuación típica de 0,2dB/km y la PMD (Polarization mode dispersion) que es de 0,2ps/km entre otros.



a) Fibra óptica.



b) Parámetros de la fibra óptica.

Figura 28: Configuración tramo de fibra óptica

Tomado de: [Simulador].

Para calcular la longitud de la fibra óptica necesaria para comunicar cada nodo sensor hasta la OLT se seleccionó la zona de Bogotá que consta con el mayor despliegue de fibra óptica por parte de la ETB como se observa en la Figura 29 donde se señaliza con color rosado las zonas que cuentan con cobertura de fibra y con puntos azules la ubicación de los abonados, la zona seleccionada será la que recorre la carrera séptima desde la oficina central de la ETB (calle 20) hasta la calle 192A donde se tomará como último nodo, tomando como base el mapa satelital de Bogotá se logró calcular la distancia real a la que se debería ubicar cada uno de los nodos, como la carrera séptima es una línea principal de fibra óptica se deberá elegir el punto más cercano a dicha carrera para evitar desplegar más líneas de fibra óptica y por consiguiente los costos de implementación también aumenten.

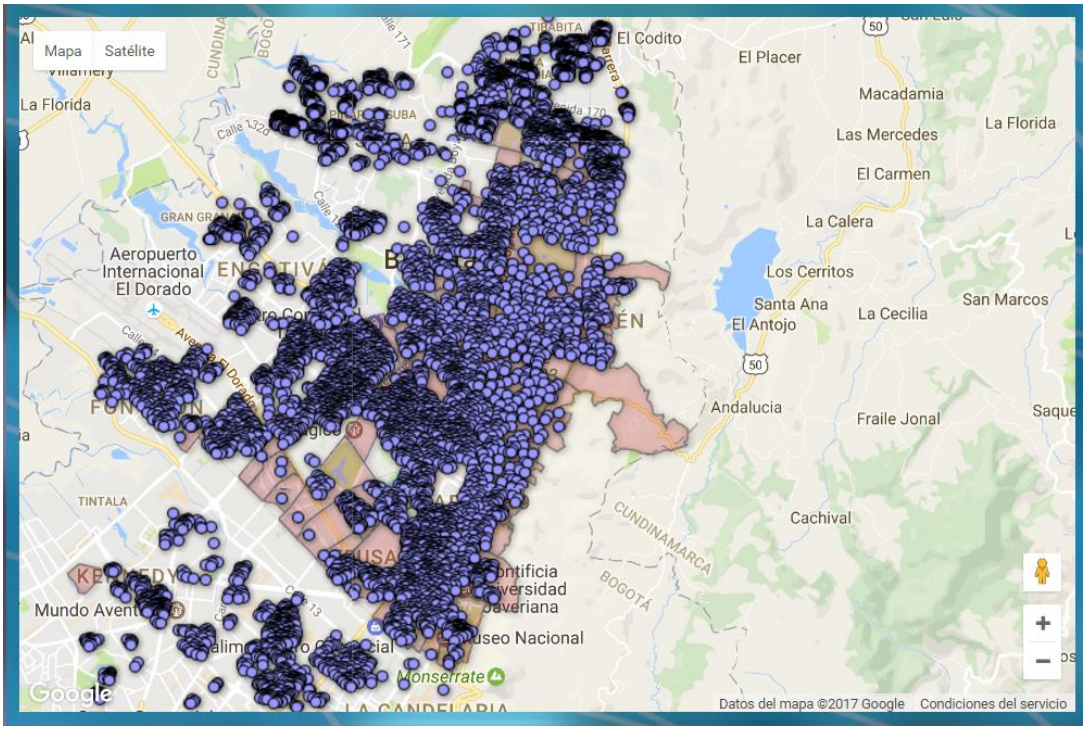


Figura 29: Cobertura de fibra óptica por parte de la ETB

Tomado de: [Empresa de telecomunicaciones de Bogotá ETB].

En la Figura 30 se muestra la ruta que recorre cada nodo que compone la red de sensores y que en el mapa satelital de Bogotá están representados por círculos negros desde su ubicación como usuario final haciendo las veces de ONT pues es allí donde se dispondrán los recursos necesarios para medir una variable específica hasta la oficina central de la ETB que para este caso cumpliría las funciones de una OLT y que en el mapa se verá representado por una flecha roja.

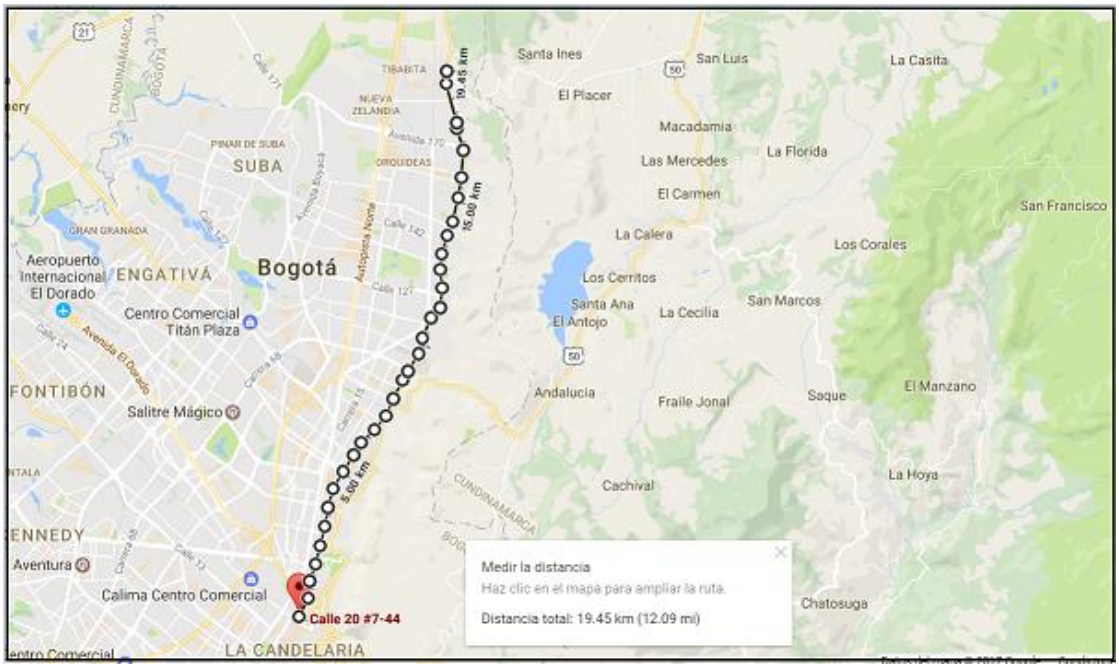


Figura 30: Ubicación nodos sensores en la ciudad de Bogotá

Tomado de: [Google Maps].

Las distancias que se relacionan en la Tabla 2 fueron las que se configuraron en el simulador para la conexión por medio de fibra óptica entre cada nodo sensor y la oficina central de la ETB, la red de sensores tiene una topología en árbol teniendo en cuenta las ventajas con que esta configuración cuenta, los nodos sensores no tendrán comunicación entre ellos pero sí tendrán comunicación directa con la OLT, entonces si un nodo presenta fallas este nodo dejará de emitir o recibir información pero no afectará el resto de la red, además, permite ampliar la red en cualquier momento empleando nodos secundarios sin necesidad de modificar sustancialmente la red ya implementada, los costos de operación se reducen al requerir menos energía para su funcionamiento pues el nodo estará en estado activo solo cuando va a enviar o recibir información y los tramos de fibra óptica que requiere entre la OLT y el nodo principal generalmente son de corta distancia.

Tabla 2: Distancia real entre el nodo sensor y la OLT.

NÚMERO DE NODO SENSOR	UBICACIÓN	DISTANCIA NODO-CENTRAL (km)
Referencia	Calle 20 Nº 7 – 44	
1	Calle 26B Nº 5 – 93	0,66
2	Diagonal 31A Nº 6 – 90	1,28
3	Carrera 7 Nº 35 – 20	1,87
4	Carrera 7 Nº 40B – 67	2,50
5	Carrera 7 Nº 47 – 12	3,15
6	Carrera 7 Nº 52 – 98	3,78
7	Carrera 7 Nº 59A – 04	4,42
8	Carrera 7 Nº 66 – 10	5,07
9	Calle 72BIS Nº 6 – 76	5,73
10	Carrera 7 Nº 75 – 98	6,21
11	Carrera 7 Nº 81 – 57	6,84
12	Carrera 6 Nº 86 – 57	7,41
13	Carrera 7 Nº 92A – 28	8,02
14	Carrera 7A Nº 96 – 03	8,67
15	Calle 100 Nº 8 – 75	9,12
16	Calle 106 Nº 7 – 26	9,75
17	Carrera 7 Nº 111 – 75	10,33
18	Calle 119 Nº 7 – 14	10,94
19	Carrera 7 Nº 124 – 11	11,57
20	Carrera 7A Nº 127B – 64	12,18
21	Carrera 7 Nº 132 – 45	12,77
22	Carrera 7 Nº 138 – 33	13,30
23	Carrera 7 Nº 145 – 57	13,96
24	Carrera 7 Nº 150 – 93	14,62
25	Carrera 7 Nº 156 – 29	15,24
26	Calle 160A Nº 7 - 16	15,63
27	Carrera 7 Nº 163 – 27	15,97
28	Carrera 7 Nº 168 – 80	16,89
29	Carrera 7 Nº 173A – 32	17,58
30	Calle 175 Nº 6 – 60	17,83
31	Calle 189 Nº 7 – 26	19,12
32	Carrera 7 Nº 192A – 31	19,57

Atenuador óptico

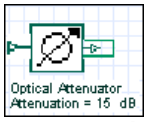
Este módulo atenúa la señal óptica que le ingresa proveniente de la fibra óptica, en este módulo solo se debe configurar la atenuación en 15dB para simular las pérdidas que se presentan en la instalación propia de la fibra óptica. Las pérdidas calculadas estarán dadas por la ecuación (9).

$$P = 10\log\left(\frac{1}{N}\right) \tag{9}$$

Donde N es el número de nodos presentes en la red que para este caso será de 32, 64 y 128 nodos, reemplazando N en (9) se obtendrán los siguientes valores de atenuación:

Tabla 3: Valores de atenuación en la fibra óptica según la cantidad de nodos

Número de nodos	Atenuación (dB)
32	-15.051
64	-18.062
128	-21.072



a) Atenuador óptico

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Attenuation	15	dB	Normal

b) configuración del atenuador óptico

Figura 31: Atenuador óptico

Tomado de: [Simulador].

Demultiplexor WDM

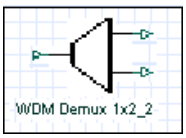
Para poder recuperar la señal que se desea trasmitir es necesario utilizar un demultiplexor de longitud de onda que divida la señal recibida en las longitudes de ondas a las que sea configurado, para este caso se configuró el demultiplexor 1X2 con longitud de onda de 1330nm del canal de subida de la red GPON y la longitud de onda de 850nm o de 1310nm del sensor. En la Figura 32a se observa la configuración del demultiplexor empleado configurando las longitudes de onda que se van a demultiplexar, así como el ancho de banda que será de 10GHz y las pérdidas por inserción que serán de 2dB para el peor de los casos.

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Bandwidth	10	GHz	Normal
☐	Insertion loss	2	dB	Normal
☐	Depth	100	dB	Normal
☐	Filter type	Bessel		Normal
☐	Filter order	2		Normal

Main | Channels | Ripple | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Frequency[0]	1330	nm	Normal
☐	Frequency[1]	850	nm	Normal

a) Parámetros de configuración del demultiplexor WDM.



b) Demultiplexor WDM

Figura 32: Demultiplexor WDM

Tomado de: [Simulador]

Receptor óptico

Este módulo está compuesto por fotodetectores que pueden ser de tipo PIN o APD. Para este caso se urará uno tipo PIN acompañado de un filtro pasabajos al que se le puede configurar la frecuencia de corte teniendo como referencia el bit rate y un factor multiplicativo de 0.75*bit rate que determina el ancho de banda. El orden del filtro será de 4º orden. El modulo también incorpora el factor de ruido ASE y el ruido térmico entre otros. El modulo receptor cuenta con un regenerador de señal 3R que une la señal binaria, la señal eléctrica que representa la codificación y la señal eléctrica proveniente del filtro pasabajos para posteriormente ser visualizado en un analizador de BER. Es necesario emplear un módulo receptor por cada salida del demultiplexor.

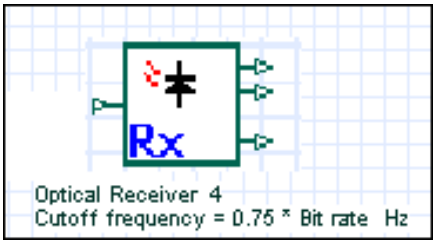
Main | Low Pass ... | 3R Regen... | Downsam... | Noise | Random n...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Photodetector	PIN		Normal
☐	Gain	3		Normal
☐	Ionization ratio	0.9		Normal
☐	Responsivity	1	A/W	Normal
☐	Dark current	10	nA	Normal

Main | Low Pass ... | 3R Regen... | Downsam... | Noise | Random n...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☑	Cutoff frequency	0.75 * Bit rate	Hz	Script
☐	Insertion loss	0	dB	Normal
☐	Depth	100	dB	Normal
☐	Order	4		Normal

a) Parámetros de configuración módulo receptor



b) Módulo receptor óptico

Figura 33: Módulo receptor óptico

Tomado de: [Simulador].

También se evaluó la posibilidad de emplear combinadores y splitters para reemplazar los multiplexores y demultiplexores respectivamente, ya que los costos disminuyen al solo necesitar unos tramos más de fibra óptica, sin embargo, al reemplazar dichos componentes como se explicó anteriormente se debe emplear filtros ópticos de tipo Butterworth para lograr obtener las señales que se desean requiriendo elementos activos que aumentarían los costos de implementación ya que los multiplexores y demultiplexores no necesitan de filtros por traer integrado en su funcionamiento la división de la señal de la forma más óptima

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para validar el diseño de las prestaciones de una red óptica para el transporte de señales provenientes de una red de sensores se empleó el software OptiSystem del desarrollador Optiwave en su última versión 2008 configurado de la forma anteriormente descrita, sin embargo, se debe hacer énfasis que las simulaciones se debieron hacer por separado para cada nodo con el fin de obtener resultados precisos teniendo en cuenta que de esta forma se podrá reutilizar los recursos con lo que se cuenta evitando subutilizar los mismos. Como el software se ve limitado para la transmisión de datos bidireccional ya que no permite configurar sobre el mismo Layout las tasas de transmisión requeridas para la transmisión en sentido ascendente y en sentido descendente solo se simulará el caso correspondiente al canal de subida para una red GPON.

Se evaluaron dos casos para el lado de la ONU variando la frecuencia de operación del transmisor óptico del sensor. El primer caso es cuando el sensor opera a una frecuencia de 850nm que se encuentra ubicada en la primera ventana de operación en donde la atenuación en la fibra óptica es de 2.5dB/km y se mantienen constantes y el segundo caso es cuando el sensor opera a una frecuencia de 1310nm que se encuentra ubicada en la segunda ventana de operación en donde la atenuación en la fibra óptica es de 0.4dB/km, esto con el fin de determinar cuál de las dos frecuencias de operación es la más apropiada para el diseño propuesto.

La ONU propuesta para el primer caso, es decir, cuando el transmisor óptico del sensor opera a una frecuencia de 850nm se observa en la Figura 34.

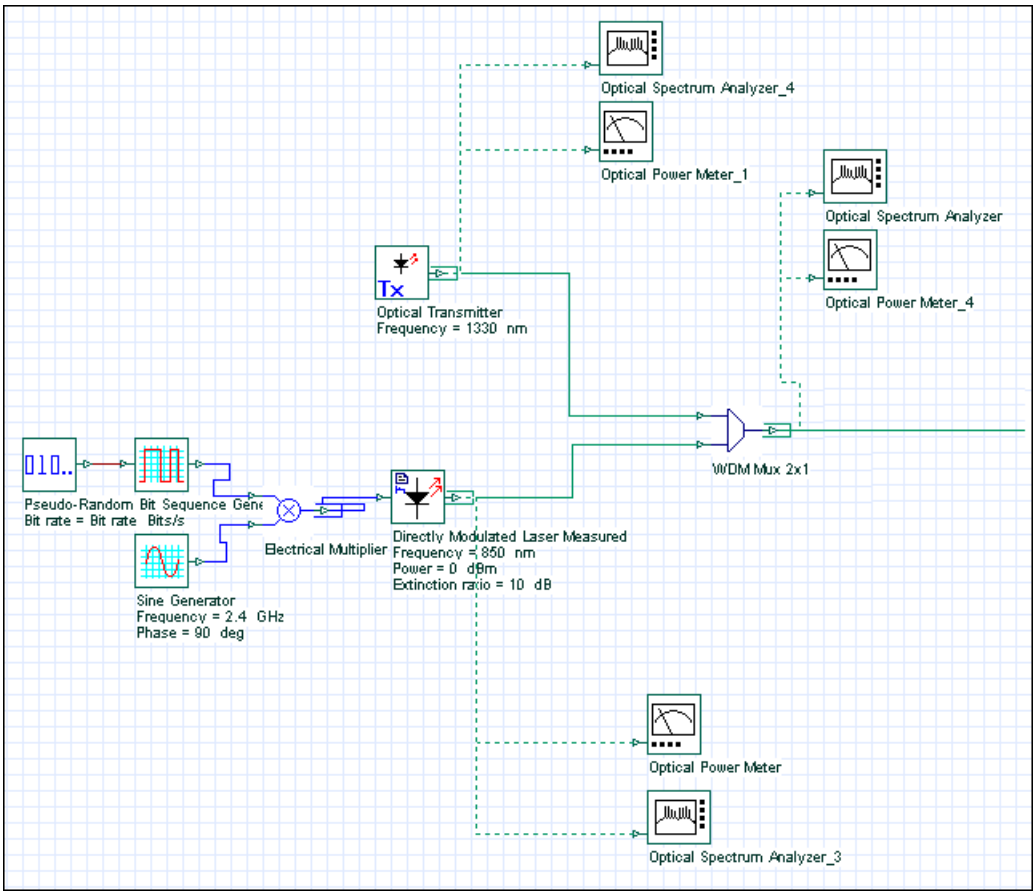


Figura 34: Configuración de la ONU para una frecuencia de operación de 850nm

En la Figura 35 se presenta la gráfica obtenida en el OSA del transmisor óptico donde se observa la longitud de onda de operación del láser que es de 1330nm y la potencia de la señal de salida, dato que se puede corroborar con la medición realizada por el medidor de potencia óptico ubicado en el mismo punto.

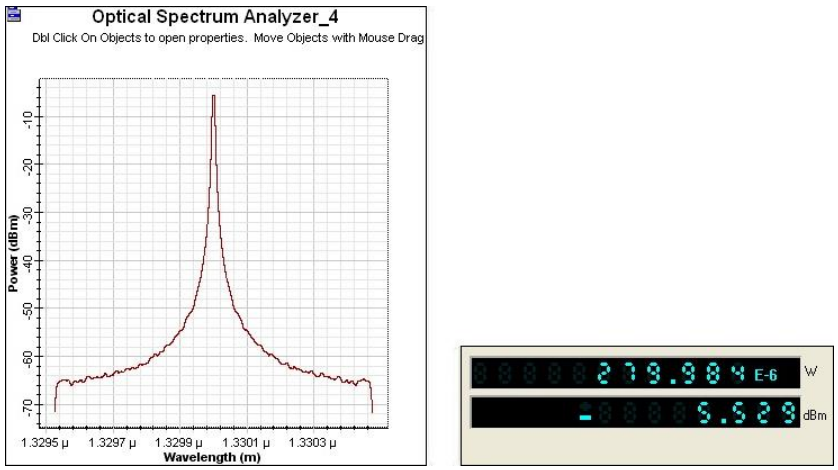


Figura 35: OSA y Medidor de potencia óptico transmisor óptico.

Para el caso del sensor también se observó por medio del OSA la longitud de onda de operación del láser que es de 850nm y la potencia de emisión del mismo como se observa en la Figura 36, por medio del medidor de potencia óptico se observa con precisión el valor de la potencia de emisión del láser del sensor.

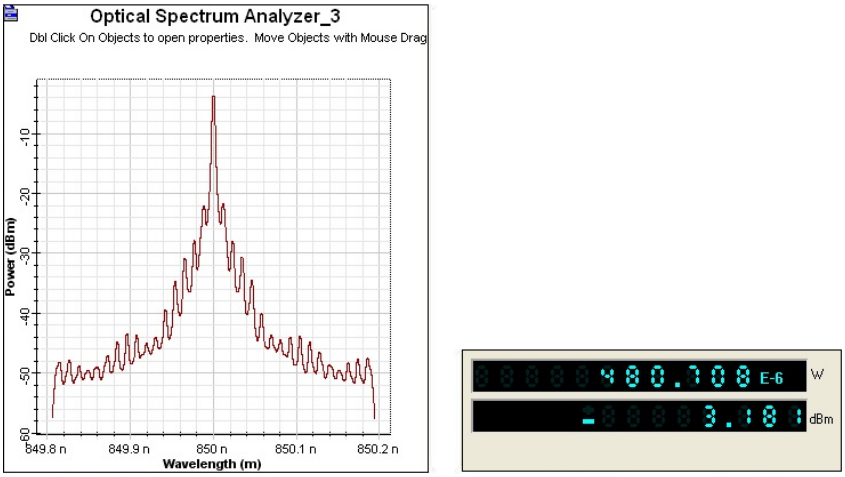


Figura 36: OSA y Medidor de potencia óptico sensor.

Después de que la señal del transmisor óptico y la señal del sensor son multiplexadas se observa en la Figura 37 la gráfica obtenida por el OSA donde se observa las portadoras ubicadas en 1330nm y 850nm respectivamente y la potencia de la señal que finalmente deberá recorrer la distancia necesaria en cada enlace.

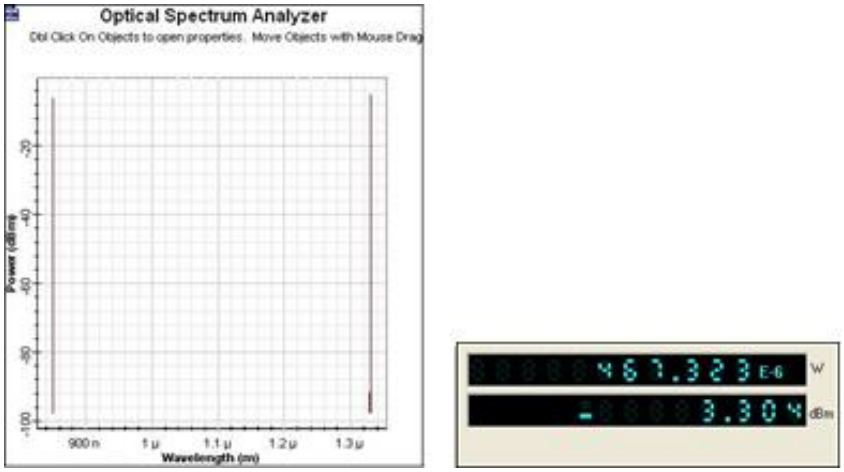


Figura 37: OSA y Medidor de potencia óptico multiplexor.

En la Tabla 4 se muestra el consolidado de los parámetros del lado de la ONU que compone el sistema de comunicación cuando el transmisor óptico se encuentra operando a una frecuencia de 850nm

Tabla 4: Parámetros del lado de la ONU con un sensor a 850nm.

P. Transmisor óptico	P. sensor	P. Señal de salida
-5.529 dBm	-3.181 dBm	-3.304 dBm

La ONU propuesta para el segundo caso, es decir, cuando el transmisor óptico del sensor opera a una frecuencia de 1310nm se observa en la Figura 38.

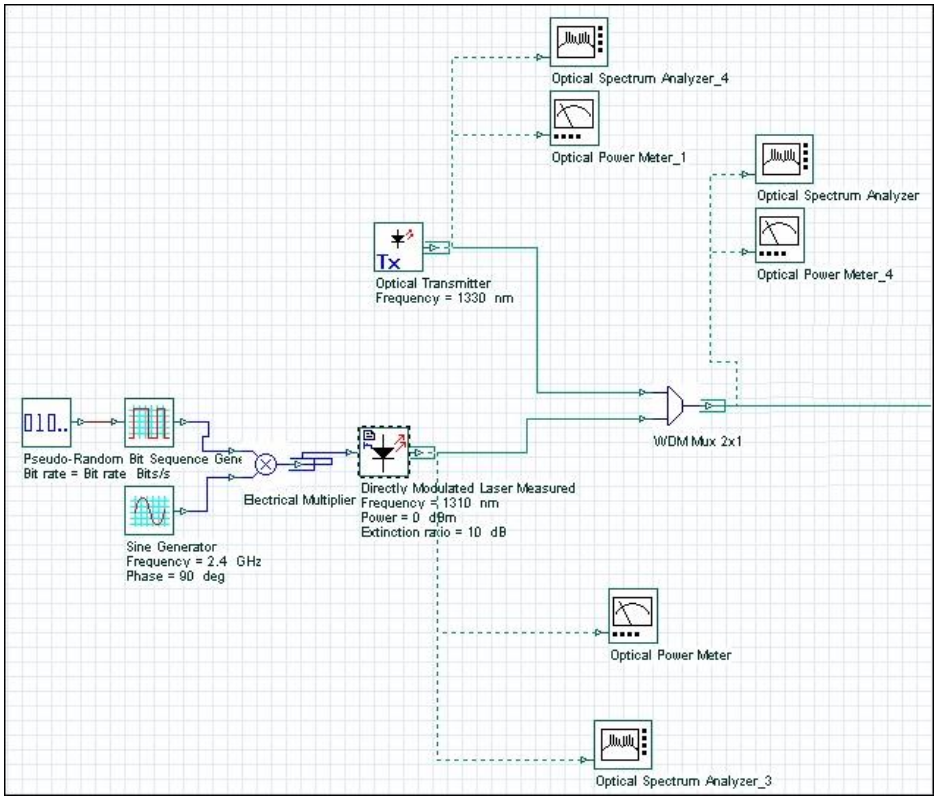


Figura 38: Configuración de la ONU para una frecuencia de operación de 1310nm

En la Figura 39 se presenta la gráfica obtenida en el OSA del transmisor óptico donde se observa la longitud de onda de operación del láser que es de 1330nm y la potencia de la señal de salida, dato que se puede corroborar con la medición realizada por el medidor de potencia óptico ubicado en el mismo punto.

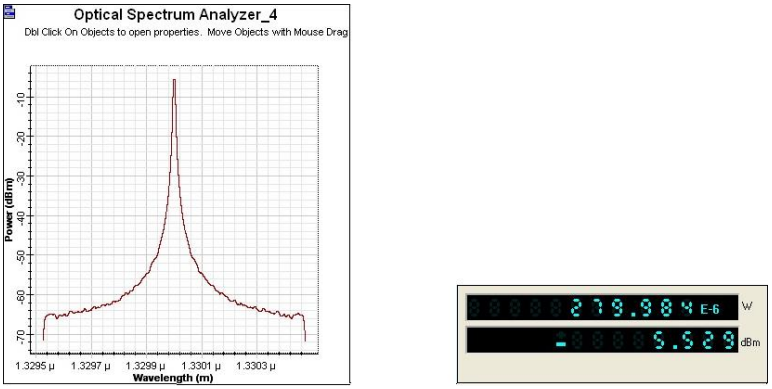


Figura 39: OSA y Medidor de potencia óptico transmisor óptico.

Para el caso del sensor también se observó por medio del OSA la longitud de onda de operación del láser que es de 1310nm y la potencia de emisión del mismo como se observa en la Figura 40, por medio del medidor de potencia óptico se observa con precisión el valor de la potencia de emisión del láser del sensor.

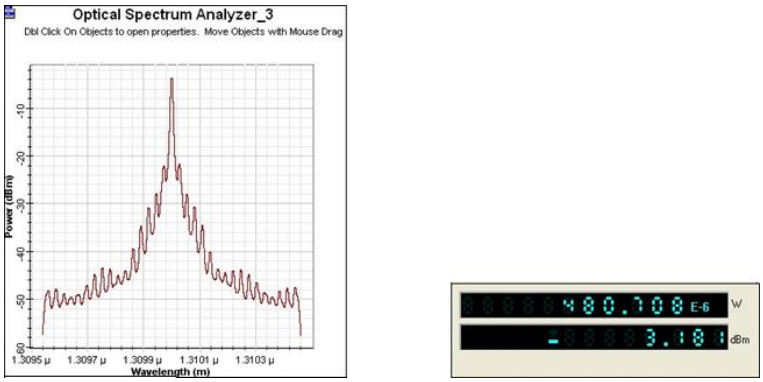


Figura 40: OSA y Medidor de potencia óptico sensor.

Después de que la señal del transmisor óptico y la señal del sensor son multiplexadas se observa en la Figura 41 la gráfica obtenida por el OSA donde se observa las portadoras ubicadas en 1330nm y 1310nm respectivamente y la potencia de la señal que finalmente deberá recorrer la distancia necesaria en cada enlace.

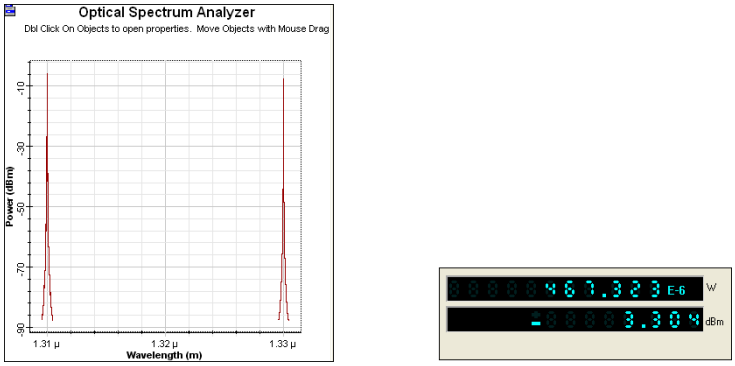


Figura 41: OSA y Medidor de potencia óptico multiplexor.

En la Tabla 5 se muestra el consolidado de los parámetros del lado de la ONU que compone el sistema de comunicación cuando el transmisor óptico se encuentra operando a una frecuencia de 1310nm

Tabla 5: Parámetros del lado de la ONU con un sensor a 1310nm

P. Transmisor óptico	P. sensor	P. Señal de salida
-5.529 dBm	-3.181 dBm	-3.304 dBm

Se puede observar según la Tabla 4 y la Tabla 5 que los valores de potencia son los mismos para los dos casos del lado de la ONU, es decir, la frecuencia de operación del sensor no influye en la potencia de la señal.

También se realizó variaciones en cuanto al rango de distribución de la red para dimensionar hasta que rango de distribución se puede desplegar nodos sensores, para esto se ajustaron los valores del atenuador óptico según la Tabla 3. El rango de distribución puede ser de 32 nodos, 64 nodos y 128 nodos por lo que las variaciones se verán representadas en el lado de la OLT afectando directamente la calidad de la señal.

Se tomó como señal de referencia tanto para el caso en que el sensor opera a una frecuencia de 850nm como para el caso en que el sensor opera a una frecuencia de 1310nm la señal propia de una red GPON, es decir, evitando los multiplexores y demultiplexores que para el caso de la red de sensores se hizo necesario emplear. Se presentan a continuación los tres casos de red GPON variando el valor de atenuación de la señal según la distribución de la red.

En la Figura 42 se observa la configuración de la red GPON empleada para el primer caso (cuando la red de distribución es de 32 nodos), esta red cuenta con un transmisor óptico operando a una frecuencia de 1330nm, longitud de fibra óptica de 20km y atenuación de -15.052dB.

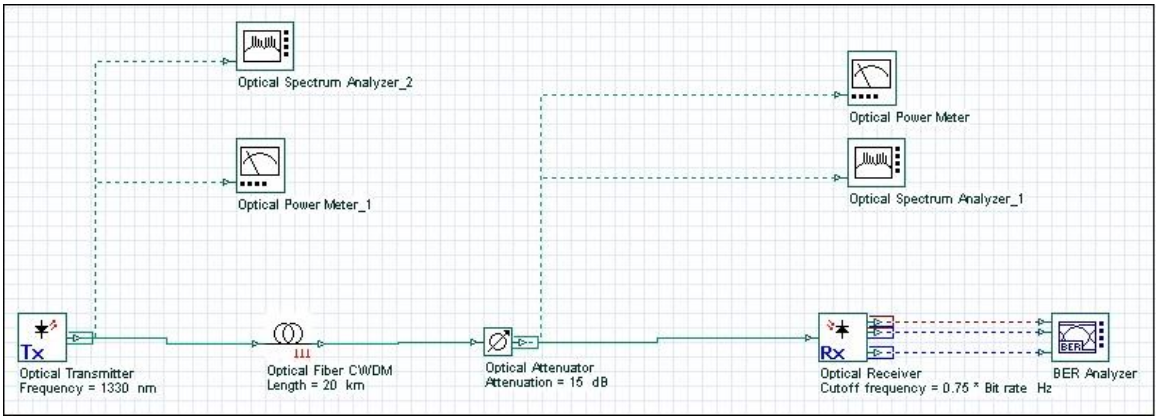


Figura 42: Red GPON caso 1.

Como el lado de la ONU no cambia sus parámetros en ninguna de las tres distribuciones, basta con mostrar solo una vez los resultados del transmisor óptico. En la Figura 43 se observa la gráfica presentada por el analizador de espectros óptico (OSA) donde se corrobora que el láser opera en una longitud de onda de 1330nm, en la medición realizada por el medidor de potencia del transmisor óptico se observa con precisión que la potencia emitida es de -5.529dBm.

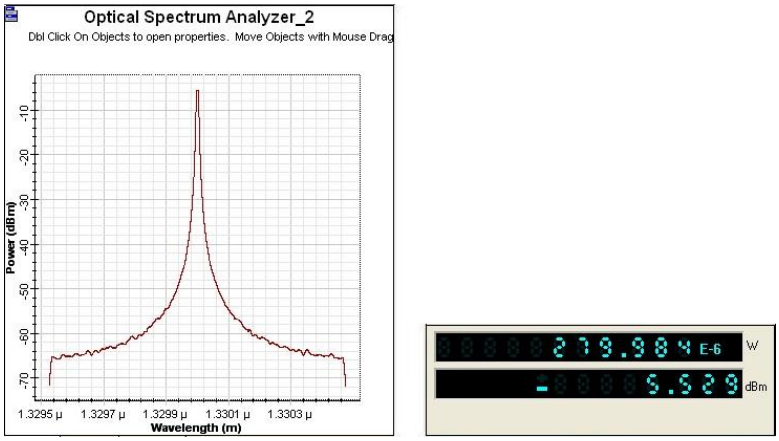


Figura 43: OSA y Medidor de potencia óptico del láser de la red GPON caso 1.

Para el lado de la OLT se observa en la Figura 44 la gráfica presentada por el analizador de espectros óptico (OSA) en el receptor óptico donde se observa que la potencia con la que la señal llega después de recorrer 20km es de -24.529dBm medición que se observa con precisión en la medición tomada por el medidor de potencia óptico.

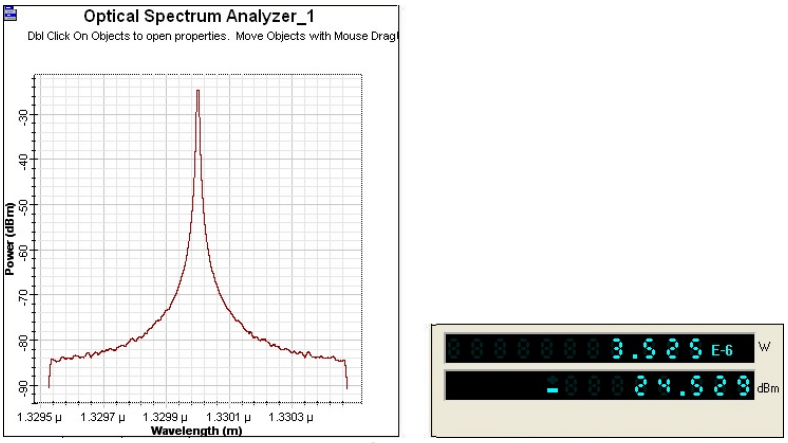


Figura 44: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 1.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para un sistema de transmisión en una red GPON se observan en la Figura 45 por medio de un diagrama de ojo. El factor Q de la señal es de 14 y el BER es de 5.789×10^{-45}

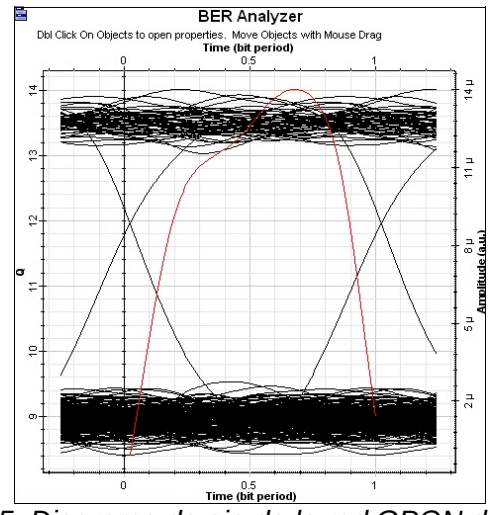


Figura 45: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 1.

En la Tabla 6 se presentan las principales características de una red GPON con una distancia de 20km y atenuación de -15.052dB.

Tabla 6: Características enlace típico GPON caso 1.

Distancia	P. emisión	P. recepción	Factor Q	BER
20km	-5.529dBm	-24.529dBm	14	5.789×10^{-45}

En la Figura 46 se observa la configuración de la red GPON empleada para el segundo caso (cuando la red de distribución es de 64 nodos), esta red cuenta con un transmisor óptico operando a una frecuencia de 1330nm, longitud de fibra óptica de 20km y atenuación de -18.062dB

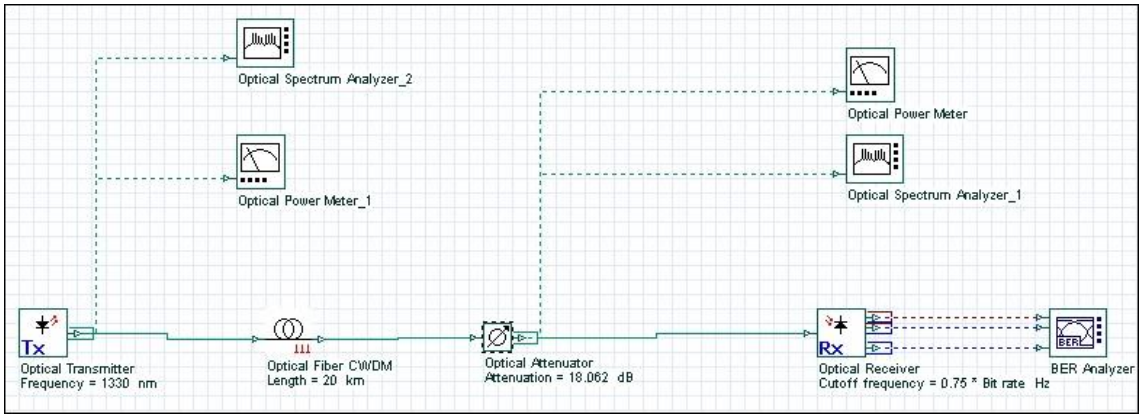


Figura 46: Red GPON caso 2.

Para el lado de la OLT se observa en la Figura 47 la gráfica presentada por el analizador de espectros óptico (OSA) en el receptor óptico donde se observa que la potencia con la que la señal llega después de recorrer 20km es de -27.591dBm medición que se observa con precisión en la medición tomada por el medidor de potencia óptico.

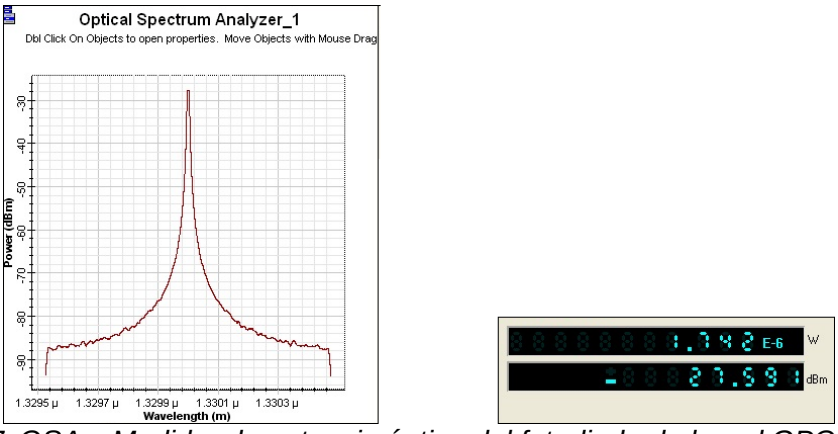


Figura 47: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 2.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para un sistema de transmisión en una red GPON se observan en la Figura 48 por medio de un diagrama de ojo. El factor Q de la señal es de 7.03 y el BER es de 8.877×10^{-13}

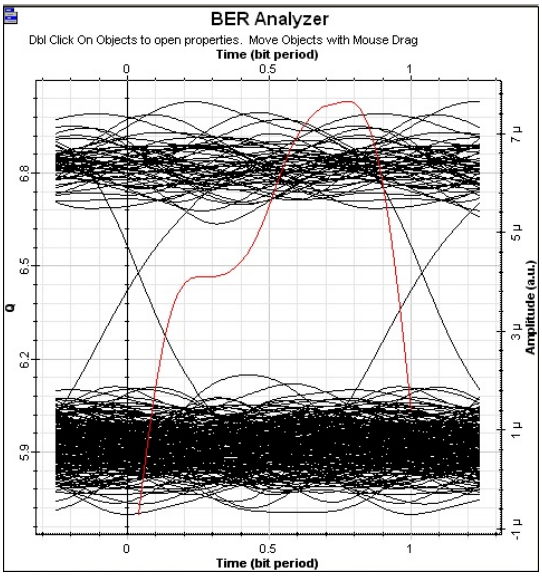


Figura 48: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 2.

En la Tabla 7 se presentan las principales características de una red GPON con una distancia de 20km y atenuación de -18.062dB.

Tabla 7: Características enlace típico GPON caso 2.

Distancia	P. emisión	P. recepción	Factor Q	BER
20km	-5.529dBm	-27.591dBm	7.03	8.877×10^{-13}

En la Figura 49 se observa la configuración de la red GPON empleada para el tercer caso (cuando la red de distribución es de 128 nodos), esta red cuenta con un transmisor óptico operando a una frecuencia de 1330nm, longitud de fibra óptica de 20km y atenuación de -21.072dB

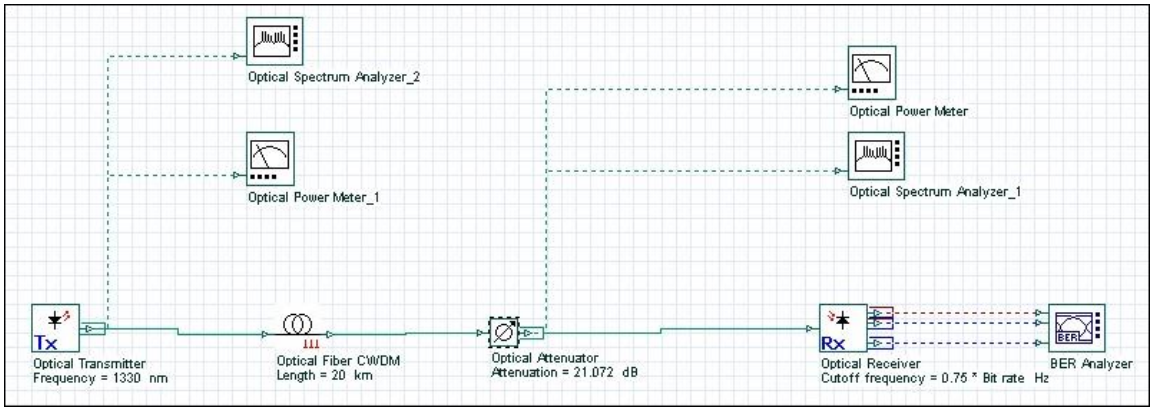


Figura 49: Red GPON caso 3.

Para el lado de la OLT se observa en la Figura 50 la gráfica presentada por el analizador de espectros óptico (OSA) en el receptor óptico donde se observa que la potencia con la que la señal llega después de recorrer 20km es de -30.601dBm medición que se observa con precisión en la medición tomada por el medidor de potencia óptico.

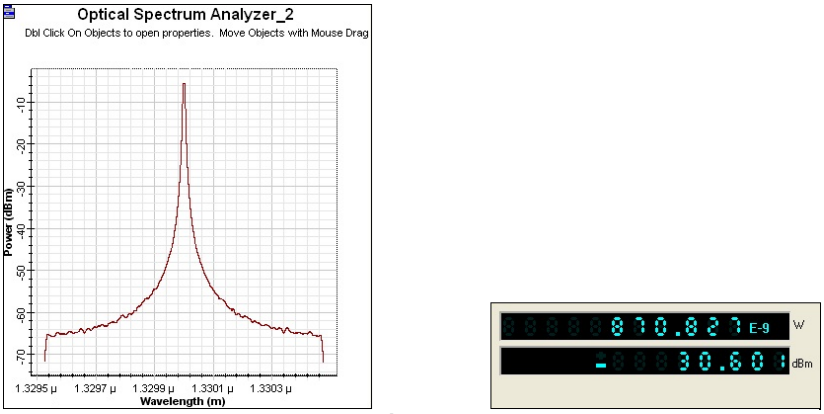


Figura 50: OSA y Medidor de potencia óptico del fotodiodo de la red GPON caso 3.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para un sistema de transmisión en una red GPON se observan en la Figura 51 por medio de un diagrama de ojo. El factor Q de la señal es de 3.5908 y el BER es de 1.410×10^{-4}

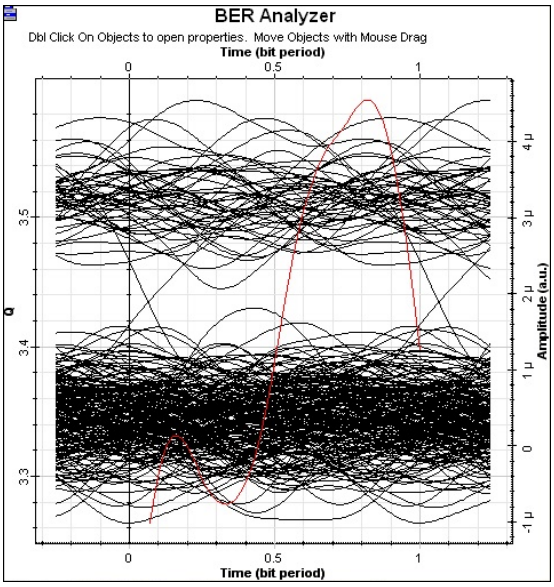


Figura 51: Diagrama de ojo de la red GPON del caso 3.

En la Tabla 8 se presentan las principales características de una red GPON con una distancia de 20km y atenuación de -21.072dB.

Tabla 8: Características enlace típico GPON caso 3.

Distancia	P. emisión	P. recepción	Factor Q	BER
20km	-5.529dBm	-30.601dBm	3.5908	1.410×10^{-4}

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el lado de la OLT del primer nodo (nodo 1), del nodo intermedio (nodo 16) y del nodo final (nodo 32) para cada uno de los casos de distribución de la red por medio de un analizador de espectros óptico (OSA), un medidor de potencia y un analizador de BER en cada uno de los receptores ópticos con el fin de poder analizar tanto la potencia con la que se recibe la señal como la calidad de la misma.

RED DE DISTRIBUCIÓN DE 32 NODOS

Caso1: transmisor óptico del sensor a 850nm y red de distribución de 32 nodos.

En la Figura 52 se observa la configuración del nodo 1 con las especificaciones antes mencionadas: un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -15.052dB/km.

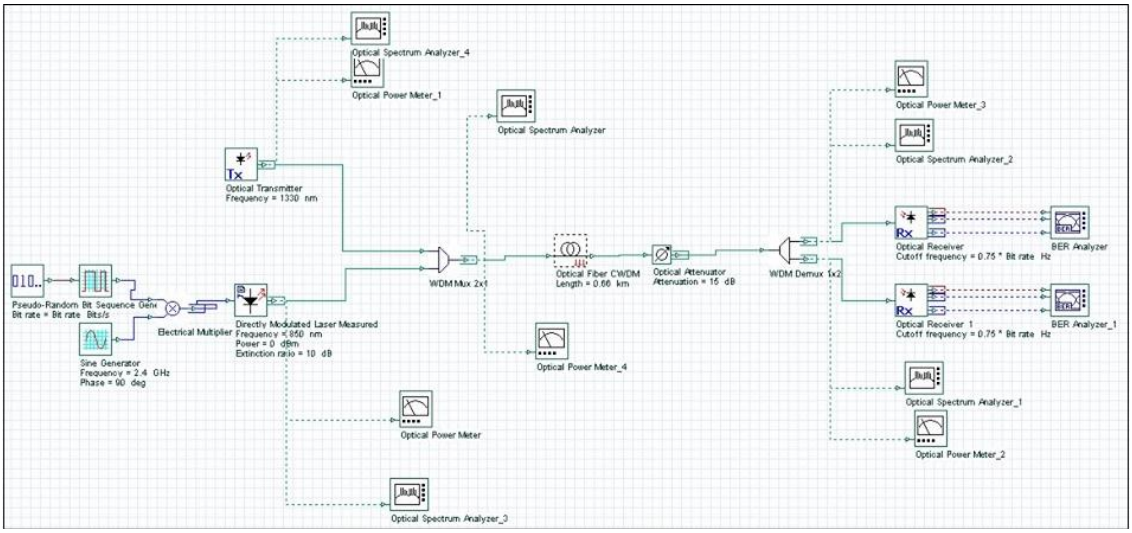


Figura 52: Configuración nodo 1 caso 1.

En la Figura 53 se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm.

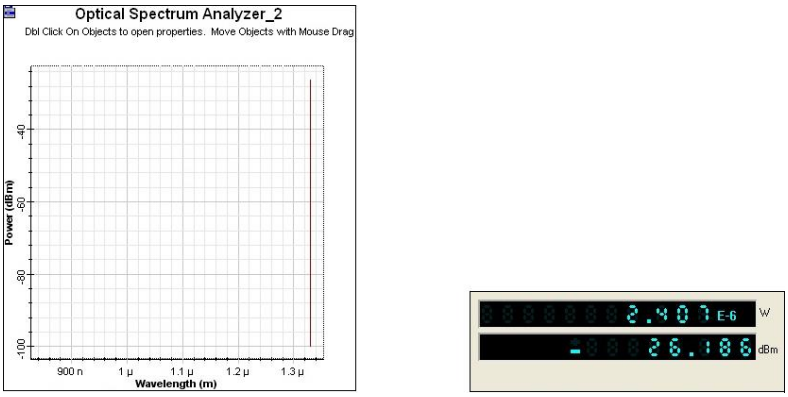


Figura 53: OSA y Medidor de potencia óptico en el receptor óptico a 1330nm en el nodo 1.

En la Figura 54 se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.

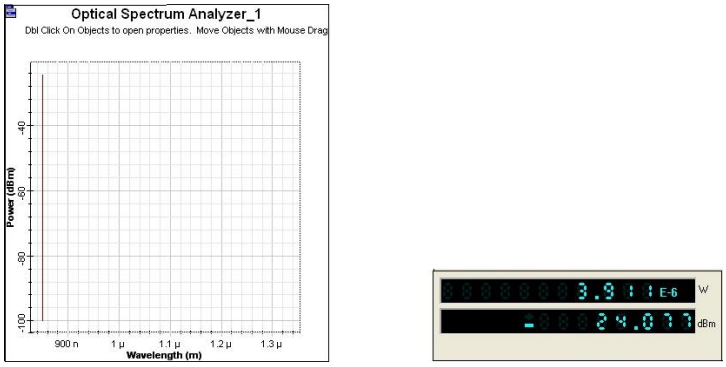
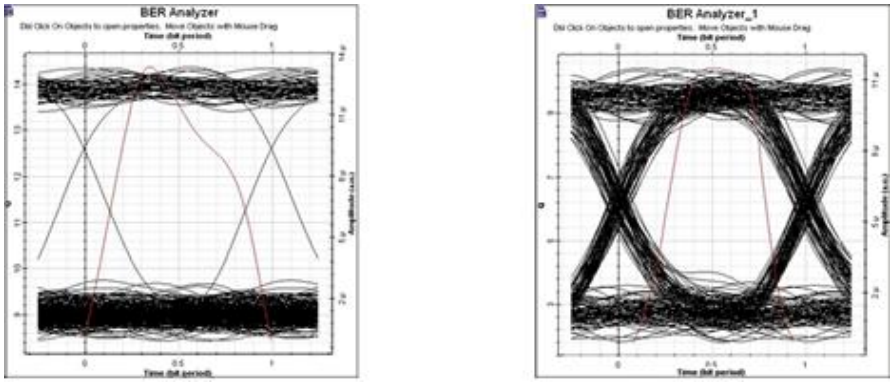


Figura 54: OSA y Medidor de potencia óptico en el receptor óptico a 850nm.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 55a, la señal tiene un factor de Q= 10.2616 y un BER= 4.589 $\times 10^{-25}$, para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 850nm se observa en la Figura 55b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 7.401 y un BER= 6.737 $\times 10^{-14}$.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 55: Diagrama de ojo de los receptores ópticos del nodo 1para el caso 1.

En la Figura 56 se observa la configuración final del nodo 16 con las especificaciones antes mencionadas: un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -15.052dB/km.

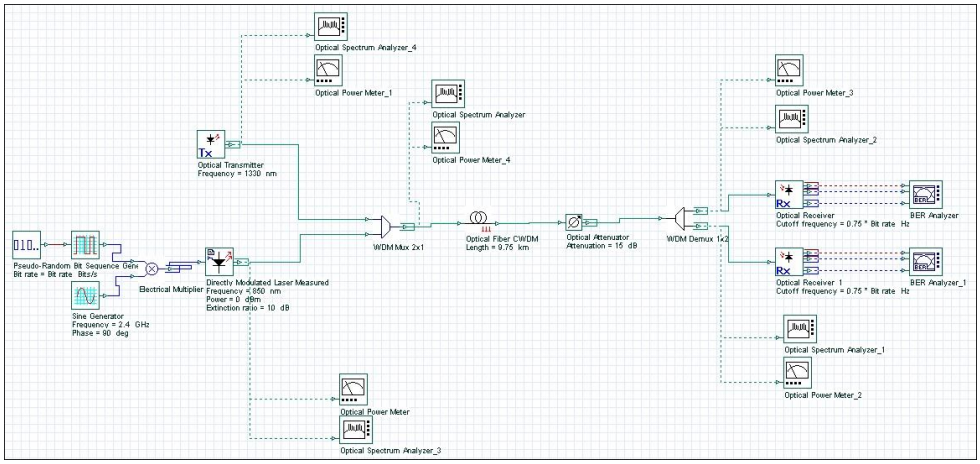
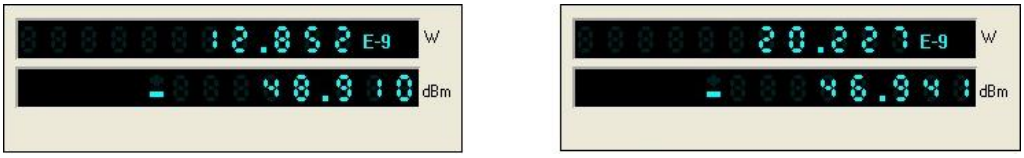


Figura 56: Configuración del nodo 16 caso 1.

En la Figura 57a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura57b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. *b) Receptor óptico a 850nm.*

Figura 57: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 1.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 16 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 58 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

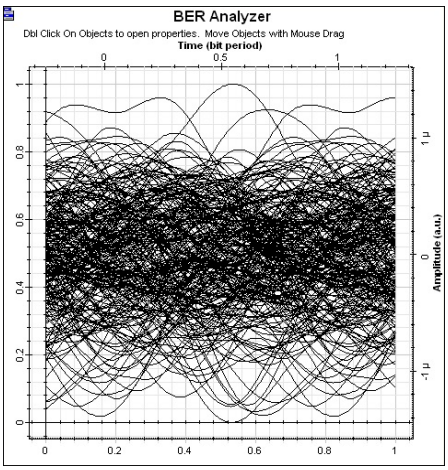


Figura 58: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 1.

En la Figura 59 se observa la configuración final del nodo 32 con las especificaciones antes mencionadas: un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -15.052dB/km.

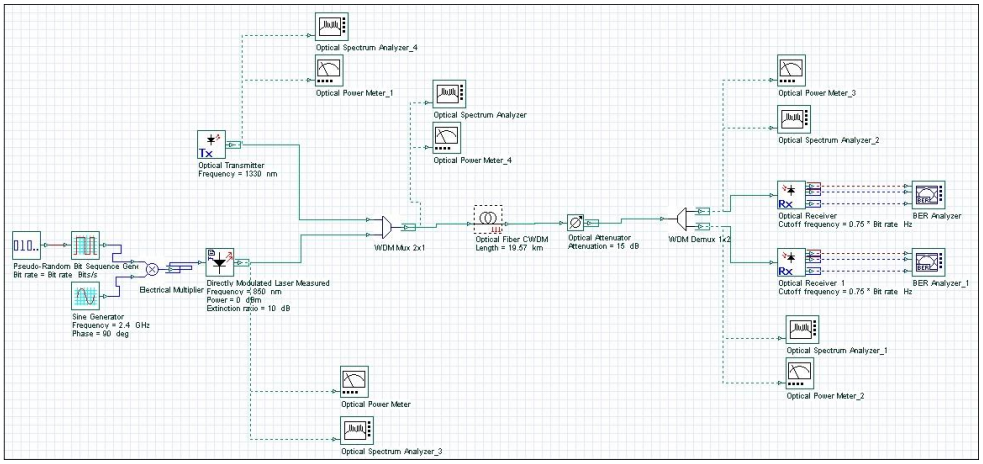
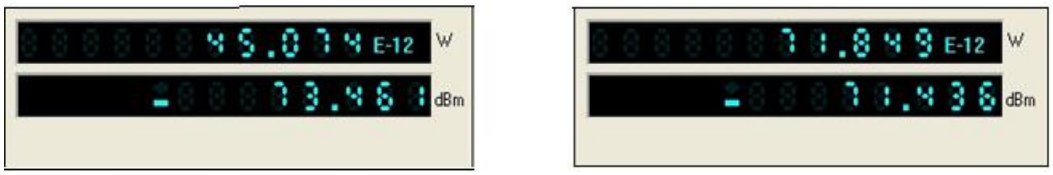


Figura 59: Configuración del nodo 32 caso 1.

En la Figura 60a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura 60b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 60: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 1.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 61 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

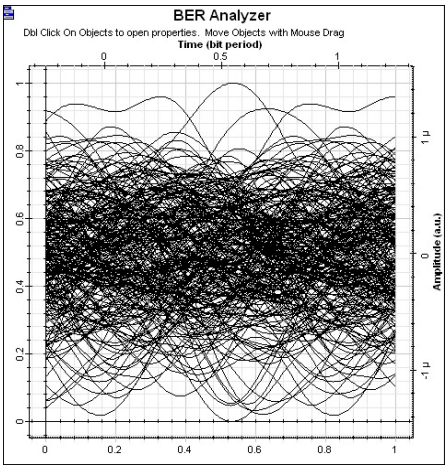


Figura 61: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 1.

En la Tabla 9 se presenta el consolidado final de cada uno de los 32 receptores ópticos que recibe la señal proveniente del demultiplexor a una longitud de onda de 1330nm cuando el sensor opera a una frecuencia de 850nm y la distribución de la red es de 32 nodos.

Tabla 9: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 1.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-26.186	10.2616	4.5897×10^{-25}
2	1.28	-27.736	6.43276	5.044×10^{-11}
3	1.87	-29.211	4.8630	4.7081×10^{-7}
4	2.50	-30.786	3.0268	9.814×10^{-4}
5	3.15	-32.409	2.68443	3.0623×10^{-3}
6	3.78	-33.985	0	1
7	4.42	-35.586	0	1

8	5.07	-37.211	0	1
9	5.73	-38.860	0	1
10	6.21	-40.061	0	1
11	6.84	-41.636	0	1
12	7.41	-43.061	0	1
13	8.02	-44.585	0	1
14	8.67	-46.211	0	1
15	9.12	-47.335	0	1
16	9.75	-48.910	0	1
17	10.33	-50.360	0	1
18	10.94	-51.885	0	1
19	11.57	-53.461	0	1
20	12.18	-54.986	0	1
21	12.77	-56.461	0	1
22	13.30	-57.786	0	1
23	13.96	-59.436	0	1
24	14.62	-61.086	0	1
25	15.24	-62.635	0	1
26	15.63	-63.611	0	1
27	15.97	-64.461	0	1
28	16.89	-66.760	0	1
29	17.58	-68.486	0	1
30	17.83	-69.111	0	1
31	19.12	-72.334	0	1
32	19.57	-73.461	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 9 se representan en la gráfica mostrada en la Figura62.

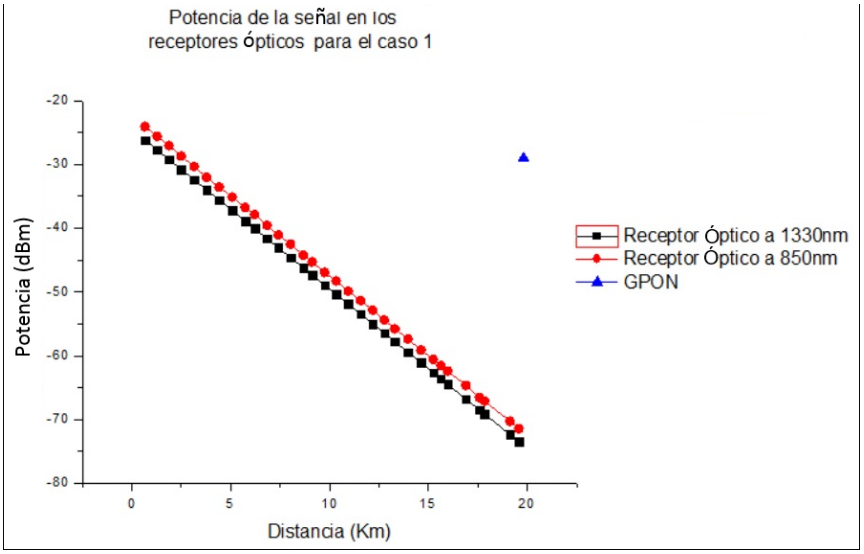


Figura 62: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 1.

En la Tabla 10 se presenta el consolidado final de cada uno de los 32 receptores ópticos que recibe la señal proveniente del demultiplexor a una longitud de onda de 850nm cuando el sensor opera a una frecuencia de 850nm y la distribución de la red es de 32 nodos

Tabla 10: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 1.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-24.077	7.40112	6.7375×10^{-14}
2	1.28	-25.597	4.9403	3.8991×10^{-7}
3	1.87	-27.040	3.26767	5.4162×10^{-4}
4	2.50	-28.704	2.4268	7.612×10^{-3}
5	3.15	-30.332	0	1
6	3.78	-32.013	0	1
7	4.42	-33.555	0	1
8	5.07	-35.121	0	1
9	5.73	-36.742	0	1
10	6.21	-37.889	0	1
11	6.84	-39.550	0	1
12	7.41	-41.065	0	1
13	8.02	-42.502	0	1
14	8.67	-44.213	0	1
15	9.12	-45.305	0	1
16	9.75	-46.941	0	1
17	10.33	-48.276	0	1
18	10.94	-49.862	0	1
19	11.57	-51.344	0	1
20	12.18	-52.845	0	1
21	12.77	-54.380	0	1
22	13.30	-55.787	0	1
23	13.96	-57.352	0	1
24	14.62	-59.114	0	1
25	15.24	-60.571	0	1
26	15.63	-61.531	0	1
27	15.97	-62.376	0	1
28	16.89	-64.622	0	1
29	17.58	-66.539	0	1
30	17.83	-67.079	0	1
31	19.12	-70.256	0	1
32	19.57	-71.436	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 10 se representan en la gráfica mostrada en la Figura63.

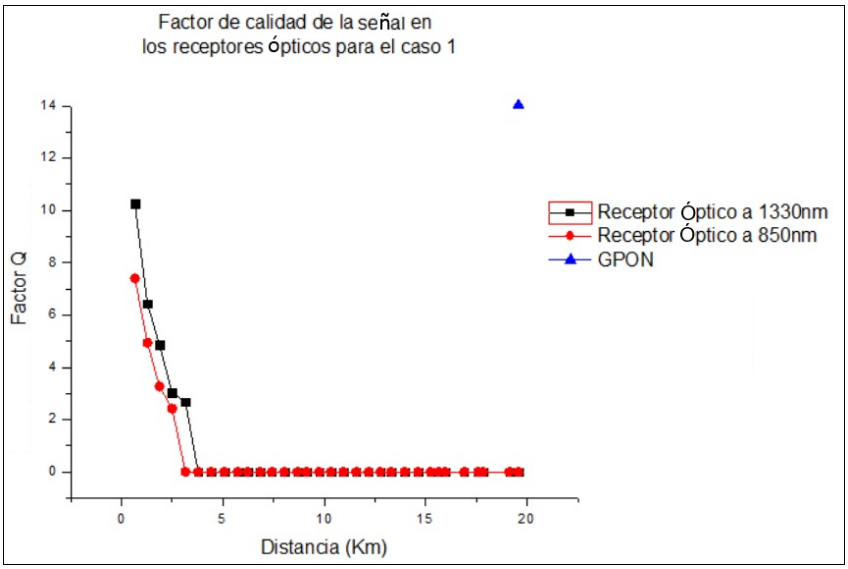
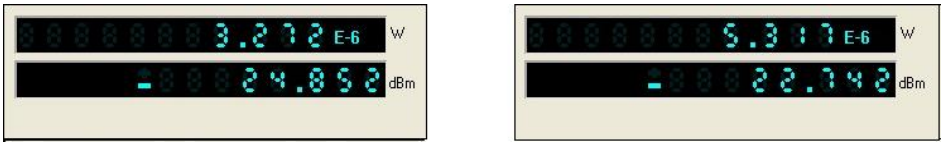


Figura 63: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 1.

Caso2: Transmisor óptico del sensor a 1330nm y red de distribución de 32 nodos.

El nodo 1 para el caso 2 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -15.052dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

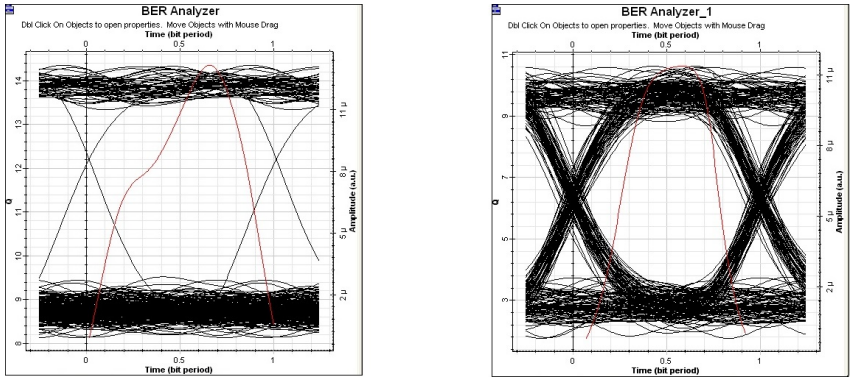
En la Figura 64a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura64b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 64: Medidor de potencia óptico en los receptores ópticos del nodo 1 para el caso 2

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 65a, la señal tiene un factor de Q= 13.939 y un BER= 1.761×10^{-44} , para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1310nm se observa en la Figura 65b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 10.318 y un BER= 2.916×10^{-25}.

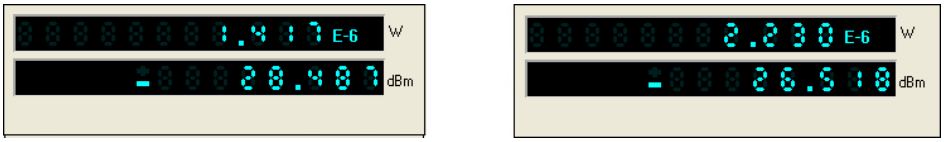


a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 65: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 2.

El nodo 16 para el caso 2 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -15.052dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 16 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

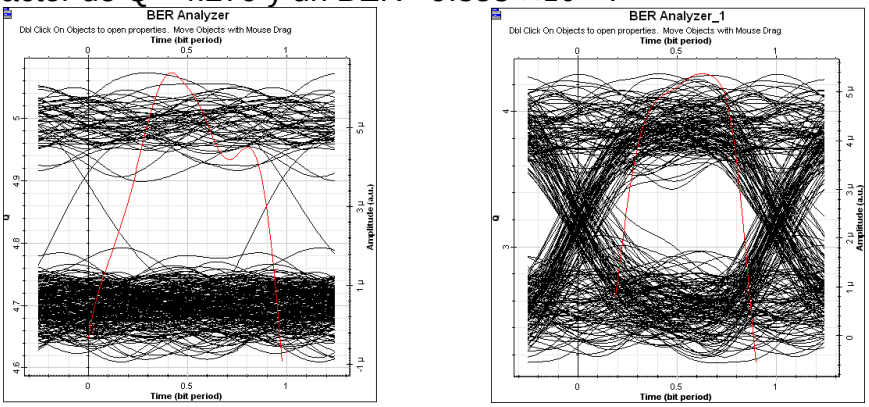
En la Figura 66a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura66b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 66: Medidor de potencia óptico en los receptores ópticos del nodo 16 para el caso 2

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 16 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 67a, la señal tiene un factor de Q= 5.072 y un BER= 1.557 $\times 10^{-7}$, para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1310nm se observa en la Figura 67b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 4.279 y un BER= 9.358 $\times 10^{-6}$.

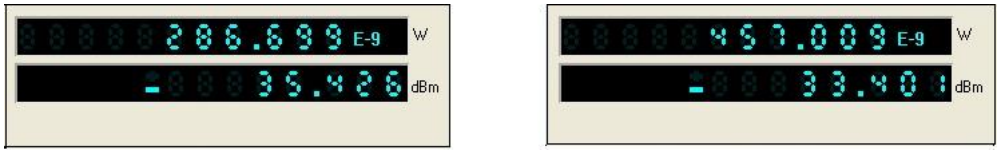


a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 67: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 2.

El nodo 32 para el caso 2 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -15.052dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 32 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 68a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura68b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 68: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 32 para el caso 2.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 69 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

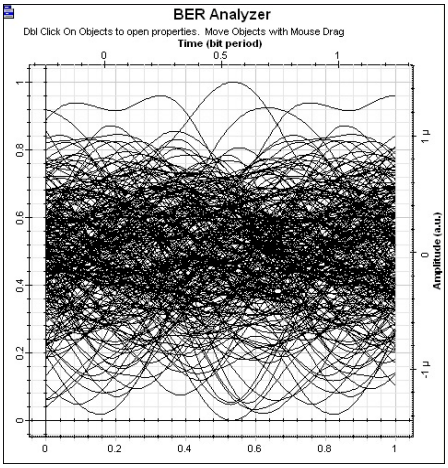


Figura 69: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 2.

En la Tabla 11 se presenta el consolidado final de cada uno de los 32 receptores ópticos a 1330nm de la señal proveniente cuando el sensor opera a una frecuencia de 850nm y la distribución de la red es de 32 nodos

Tabla 11: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 2.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-24.852	13.9319	1.7609×10^{-44}
2	1.28	-25.100	12.1865	1.510×10^{-34}
3	1.87	-25.335	11.7781	2.182×10^{-32}

4	2.50	-25.587	10.449	6.2805×10^{-26}
5	3.15	-25.847	9.3804	4.491×10^{-23}
6	3.78	-26.100	9.1615	2.144×10^{-20}
7	4.42	-26.356	9.082	4.519×10^{-20}
8	5.07	-26.615	8.8420	3.893×10^{-19}
9	5.73	-26.879	8.8329	4.544×10^{-19}
10	6.21	-27.071	7.2248	1.945×10^{-13}
11	6.84	-27.324	7.0768	6.0262×10^{-13}
12	7.41	-27.552	6.5679	2.103×10^{-11}
13	8.02	-27.796	6.3855	6.8505×10^{-11}
14	8.67	-28.068	0	1
15	9.12	--28.236	5.1524	9.6551×10^{-8}
16	9.75	-28.487	5.0723	1.557×10^{-7}
17	10.33	-28.719	5.2880	5.095×10^{-8}
18	10.94	-28.963	4.8020	6.1579×10^{-7}
19	11.57	-29.216	4.6524	1.4515×10^{-6}
20	12.18	-29.458	4.2993	7.1333×10^{-6}
21	12.77	-29.696	4.2684	8.1583×10^{-6}
22	13.30	-29.908	4.0297	2.150×10^{-5}
23	13.96	-30.171	3.5526	1.538×10^{-4}
24	14.62	-30.434	3.5873	1.3535×10^{-4}
25	15.24	-30.682	3.6364	1.1782×10^{-4}
26	15.63	-30.840	3.2029	5.227×10^{-4}
27	15.97	-30.963	2.8264	1.770×10^{-3}
28	16.89	-31.343	2.6194	3.111×10^{-3}
29	17.58	-31.619	2.8849	1.6610×10^{-3}
30	17.83	-31.719	2.5407	4.529×10^{-3}
31	19.12	-32.235	0	1
32	19.57	-35.426	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 11 se representan en la gráfica mostrada en la Figura70.

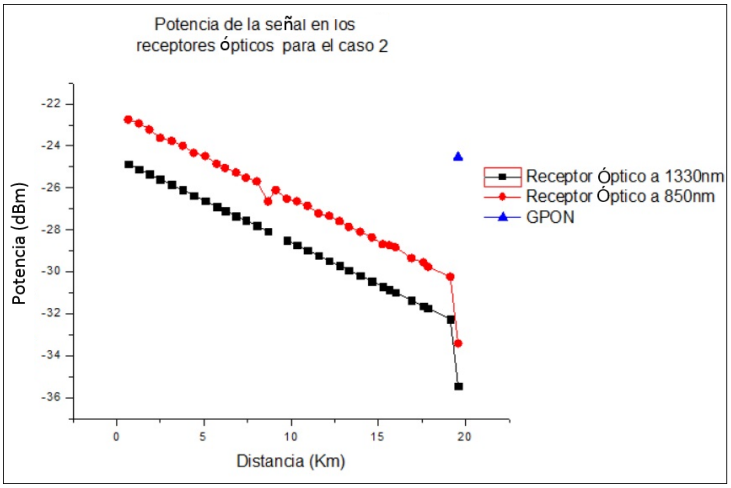


Figura 70: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 2.

En la Tabla 12 se presenta el consolidado final de cada uno de los 32 receptores ópticos a 1330nm de la señal proveniente cuando el sensor opera a una frecuencia de 1310nm y la distribución de la red es de 32 nodos

Tabla 12: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 2.

Receptor óptico con longitud de onda de 1310nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-22.742	10.318	2.9163×10^{-25}
2	1.28	-22.927	9.105	4.069×10^{-20}
3	1.87	-23.221	8.7690	9×10^{-19}
4	2.50	-23.617	8.7851	7.810×10^{-19}
5	3.15	-23.756	7.6851	7.626×10^{-15}
6	3.78	-23.992	7.4186	5.897×10^{-14}
7	4.42	-24.329	6.6361	1.598×10^{-11}
8	5.07	-24.479	6.4209	6.773×10^{-11}
9	5.73	-24.847	6.1752	3.298×10^{-10}
10	6.21	-25.047	6.2537	2.003×10^{-10}
11	6.84	-25.262	52199	8.942×10^{-8}
12	7.41	-25.515	5.6711	7.094×10^{-9}
13	8.02	-25.687	5.2765	6.583×10^{-8}
14	8.67	-26.638	0	1
15	9.12	-26.097	4.5849	1.3634×10^{-6}
16	9.75	-26.518	4.2796	9.358×10^{-6}
17	10.33	-26.635	4.1878	1.4074×10^{-5}
18	10.94	-26.849	3.6571	1.274×10^{-4}
19	11.57	-27.208	3.4302	3.013×10^{-4}
20	12.18	-27.323	3.7359	9.351×10^{-5}
21	12.77	-27.581	3.2925	4.960×10^{-4}
22	13.30	-27.851	3.1140	9.218×10^{-4}
23	13.96	-28.088	3.0324	1.2009×10^{-3}
24	14.62	-28.348	2.8888	1.9328×10^{-3}
25	15.24	-28.678	2.51536	5.9316×10^{-3}
26	15.63	-28.728	0	1
27	15.97	-28.818	2.3685	8.9232×10^{-3}
28	16.89	-29.341	2.33234	9.826×10^{-3}
29	17.58	-29.533	0	1
30	17.83	-29.746	0	1
31	19.12	-30.232	0	1
32	19.57	-33.401	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 12 se representan en la gráfica mostrada en la Figura71.

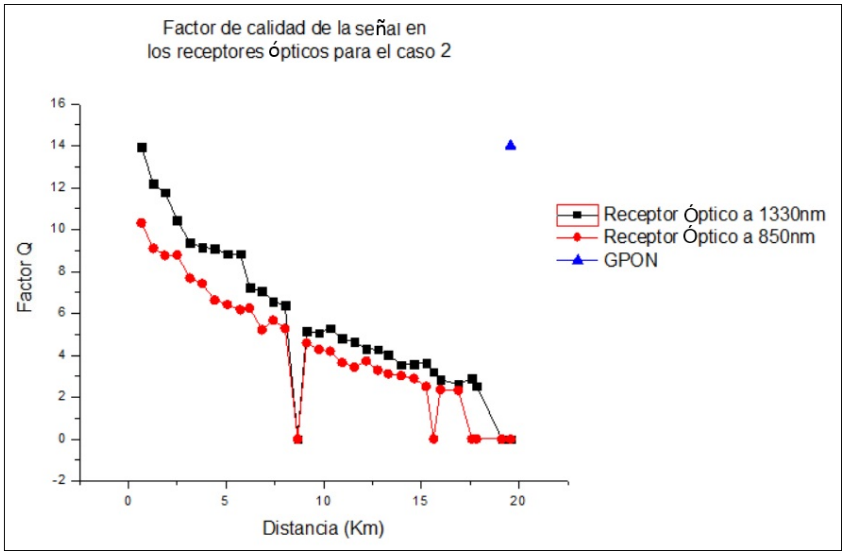


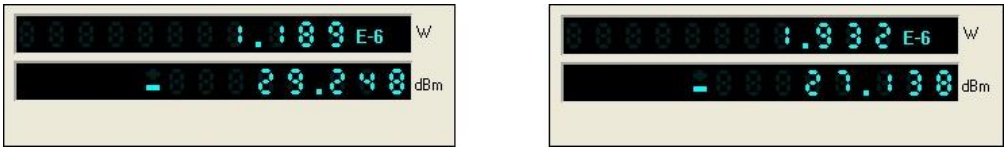
Figura 71: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 2.

RED DE DISTRIBUCIÓN DE 64 NODOS

Caso3: transmisor óptico del sensor a 850nm y red de distribución de 64 nodos.

El nodo 1 para el caso 3 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

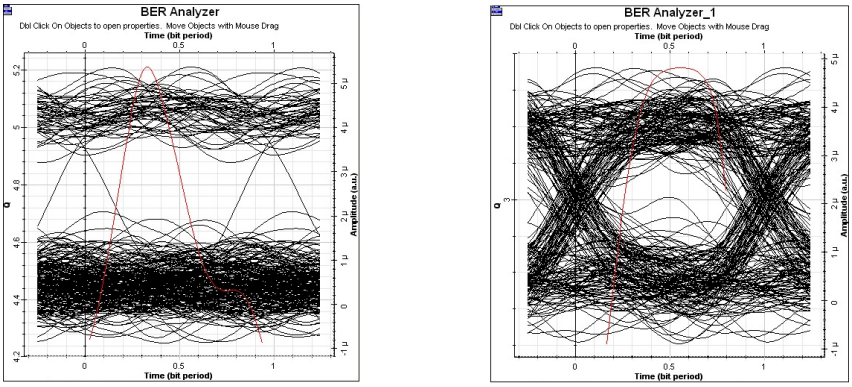
En la Figura 72a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura72b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 72: Potencia de la señal en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 3.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 73a, la señal tiene un factor de Q= 5.209 y un BER= 8.238×10^{-8} , para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 850nm se observa en la Figura 73b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 3.724 y un BER= 9.784×10^{-5}.

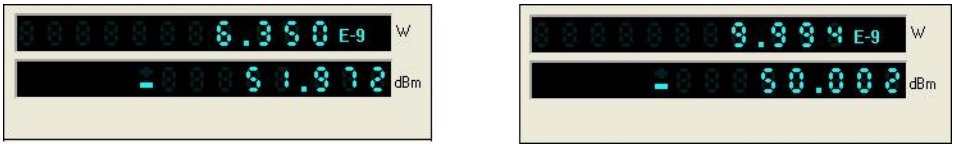


a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 73: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 3.

El nodo 16 para el caso 3 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 16 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 74a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura74b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 74: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 69 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de1.

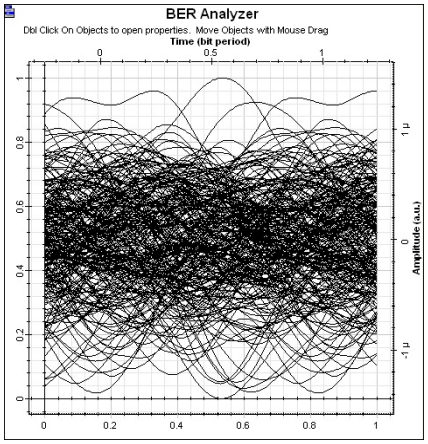
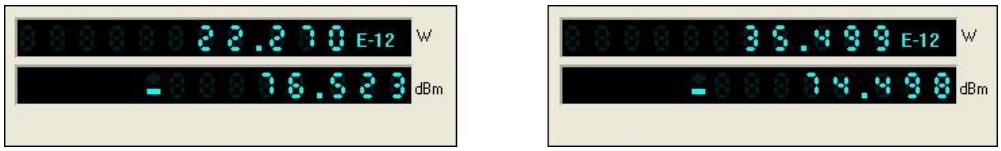


Figura 75: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3.

El nodo 32 para el caso 3 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 32 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 76a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura76b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 76: Medidor de potencia receptores ópticos del nodo 16 para el caso 3.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 77 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de1.

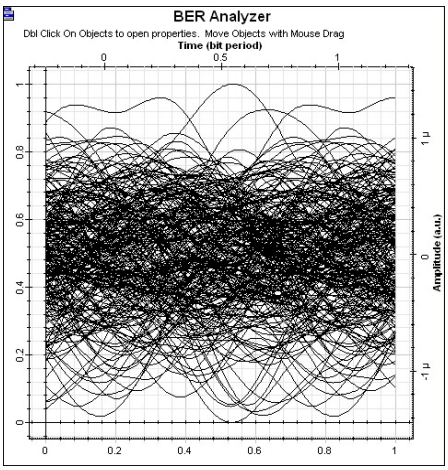


Figura 77: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 3.

En la Tabla 13 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 1330nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 13: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 3.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-29.248	5.2095	8.238×10^{-8}
2	1.28	-30.797	3.2717	4.391×10^{-4}
3	1.87	-32.273	2.2490	9.317×10^{-3}

4	2.50	-33.848	0	1
5	3.15	-35.472	0	1
6	3.78	-37.048	0	1
7	4.42	-38.648	0	1
8	5.07	-40.273	0	1
9	5.73	-41.922	0	1
10	6.21	-43.122	0	1
11	6.84	-44.698	0	1
12	7.41	-46.122	0	1
13	8.02	-47.647	0	1
14	8.67	-49.273	0	1
15	9.12	-50.397	0	1
16	9.75	-51.974	0	1
17	10.33	-53.423	0	1
18	10.94	-54.947	0	1
19	11.57	-56.523	0	1
20	12.18	-58.048	0	1
21	12.77	-59.523	0	1
22	13.30	-60.848	0	1
23	13.96	-62.498	0	1
24	14.62	-64.148	0	1
25	15.24	-65.697	0	1
26	15.63	-66.673	0	1
27	15.97	-67.523	0	1
28	16.89	-69.822	0	1
29	17.58	-71.548	0	1
30	17.83	-72.173	0	1
31	19.12	-75.397	0	1
32	19.57	-76.523	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 13 se representan en la gráfica mostrada en la Figura78.

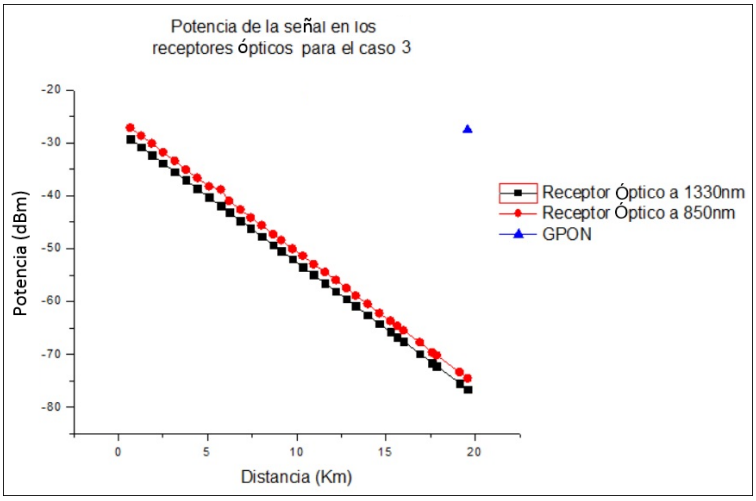


Figura 78: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 3.

En la Tabla 14 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 850nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 14: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 3.

Receptor óptico con longitud de onda de 850nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-27.138	3.7240	9.784×10^{-5}
2	1.28	-28.658	2.4794	6.577×10^{-3}
3	1.87	-30.102	0	1
4	2.50	-31.765	0	1
5	3.15	-33.394	0	1
6	3.78	-35.075	0	1
7	4.42	-36.618	0	1
8	5.07	-38.183	0	1
9	5.73	-38.804	0	1
10	6.21	-40.951	0	1
11	6.84	-42.612	0	1
12	7.41	-44.127	0	1
13	8.02	-45.564	0	1
14	8.67	-47.275	0	1
15	9.12	-48.368	0	1
16	9.75	-50.002	0	1
17	10.33	-51.338	0	1
18	10.94	-52.924	0	1
19	11.57	-54.405	0	1
20	12.18	-55.908	0	1
21	12.77	-57.442	0	1
22	13.30	-58.849	0	1
23	13.96	-60.414	0	1
24	14.62	-62.176	0	1
25	15.24	-63.633	0	1
26	15.63	-64.594	0	1
27	15.97	-65.438	0	1
28	16.89	-67.684	0	1
29	17.58	-69.601	0	1
30	17.83	-70.141	0	1
31	19.12	-73.318	0	1
32	19.57	-74.498	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 14 se representan en la gráfica mostrada en la Figura79.

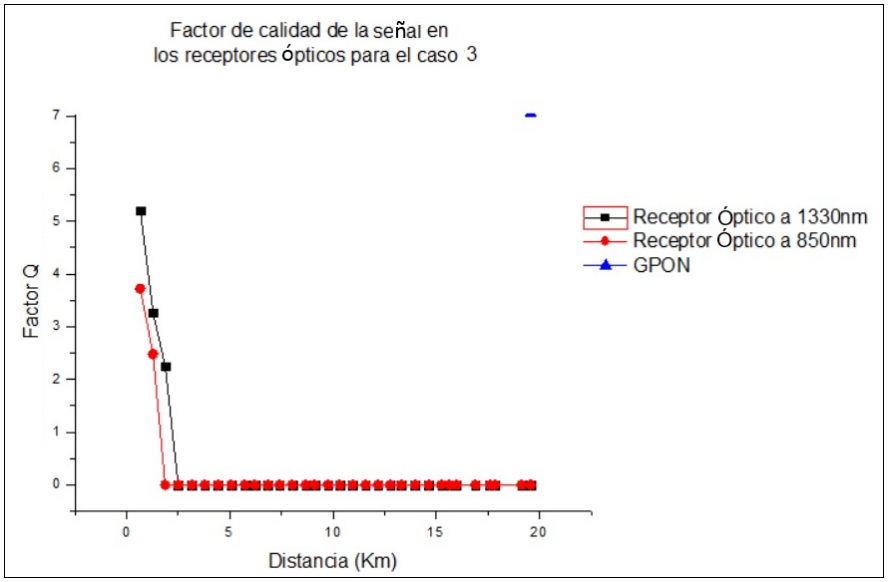


Figura 79: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 3.

Caso4: transmisor óptico del sensor a 1310nm y red de distribución de 64 nodos.

El nodo 1 para el caso 4 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

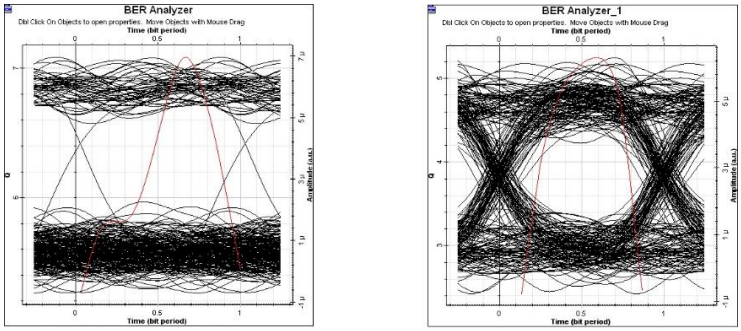
En la Figura 80a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura80b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 80: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 4.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 81a, la señal tiene un factor de Q= 7.086 y un BER= 5.976×10^{-13} , para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1310nm se observa en la Figura 81b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 5.2457 y un BER= 7.761×10^{-8}.

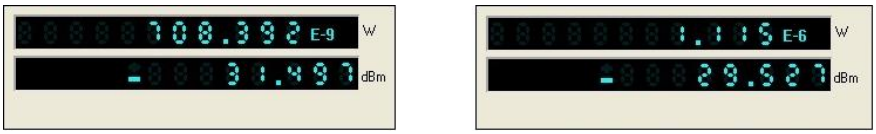


a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 81: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 4.

El nodo 16 para el caso 4 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 16 del caso 16 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

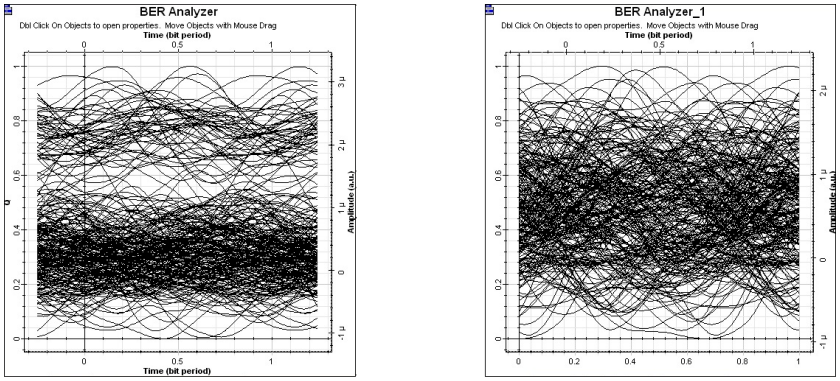
En la Figura 82a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura82b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 82: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 4.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 16 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 83a, la señal tiene un factor de Q= 2.5875 y un BER= 3.751×10^{-3} , para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 850nm se observa en la Figura 83b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 0 y un BER= 1

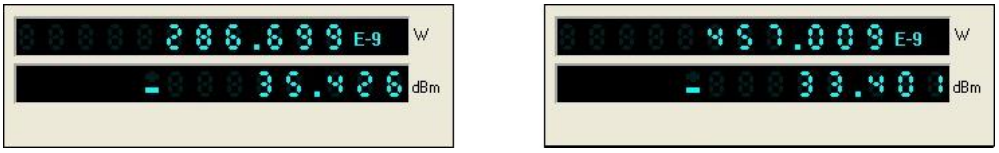


a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 83: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 4.

El nodo 32 para el caso 4 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -18.062dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 32 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 84a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura84b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 84: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 4.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 85 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de1.

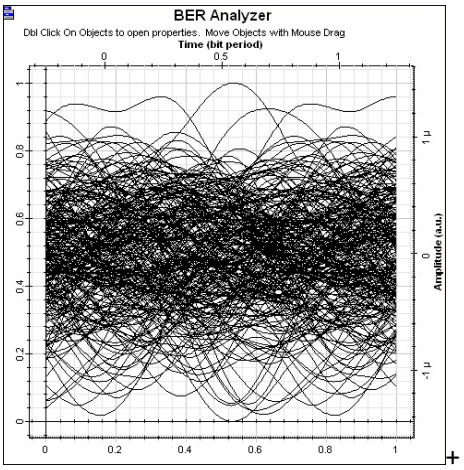


Figura 85: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 4.

En la Tabla 15 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 1330nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 15: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 4.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-27.862	7.0863	5.976×10^{-13}
2	1.28	-28.110	6.2239	1.985×10^{-10}
3	1.87	-28.345	5.9958	8.499×10^{-10}
4	2.50	-28.597	5.2405	6.768×10^{-8}

5	3.15	-28.857	5.0984	1.427×10^{-7}
6	3.78	-29.110	4.7696	6.613×10^{-7}
7	4.42	-29.365	4.5728	2.014×10^{-6}
8	5.07	-29.625	4.4355	3.771×10^{-6}
9	5.73	-29.888	4.5116	2.844×10^{-6}
10	6.21	-30.081	3.6392	1.132×10^{-4}
11	6.84	-30.333	3.5875	1.299×10^{-4}
12	7.41	-30.562	3.3365	3.441×10^{-4}
13	8.02	-30.806	3.1532	6.388×10^{-4}
14	8.67	-31.077	0	1
15	9.12	-31.246	2.6878	2.626×10^{-3}
16	9.75	-31.497	2.5875	3.751×10^{-3}
17	10.33	-31.728	2.7086	2.746×10^{-3}
18	10.94	-31.974	0	1
19	11.57	-32.226	2.3	8.771×10^{-3}
20	12.18	-32.469	2.1488	1.182×10^{-2}
21	12.77	-32.706	2.1458	1.294×10^{-2}
22	13.30	-32.918	1.9446	1.959×10^{-2}
23	13.96	-33.180	0	1
24	14.62	-30.434	3.5873	1.353×10^{-4}
25	15.24	-33.692	0	1
26	15.63	-33.850	0	1
27	15.97	-33.973	0	1
28	16.89	-34.353	0	1
29	17.58	-34.629	0	1
30	17.83	-34.729	0	1
31	19.12	-35.245	0	1
32	19.57	-35.426	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 15 se representan en la gráfica mostrada en la Figura86.

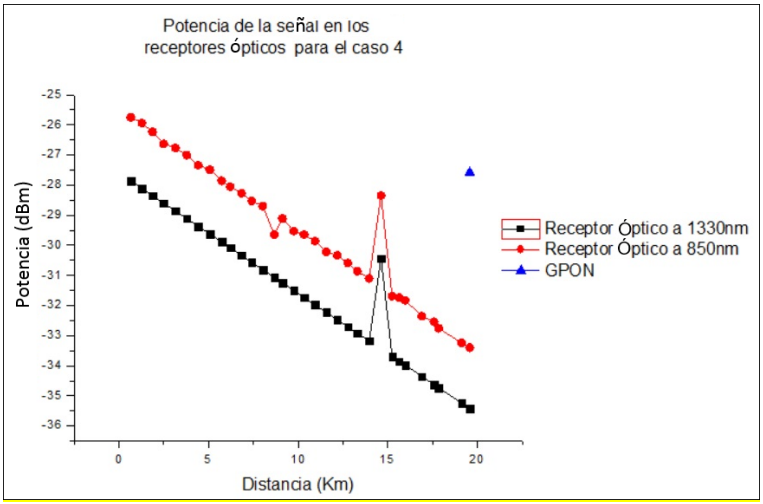


Figura 86: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 4.

En la Tabla 16 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 850nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 16: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 4.

Receptor óptico con longitud de onda de 1310nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-25.752	5.2457	7.761×10^{-8}
2	1.28	-25.937	4.5679	2.442×10^{-6}
3	1.87	-26.231	4.4210	4.909×10^{-6}
4	2.50	-26.627	4.4515	4.262×10^{-6}
5	3.15	-26.765	3.9296	4.245×10^{-5}
6	3.78	-27.002	3.7032	1.06×10^{-4}
7	4.42	-27.338	3.3262	4.371×10^{-4}
8	5.07	-27.488	3.2616	5.538×10^{-4}
9	5.73	-27.857	3.1345	8.592×10^{-4}
10	6.21	-28.057	3.1313	8.701×10^{-4}
11	6.84	-28.272	2.5663	5.138×10^{-3}
12	7.41	-28.526	2.8216	2.388×10^{-3}
13	8.02	-28.697	2.5717	5.058×10^{-3}
14	8.67	-29.649	0	1
15	9.12	-29.107	0	1
16	9.75	-29.527	0	1
17	10.33	-29.645	0	1
18	10.94	-29.859	0	1
19	11.57	-30.219	0	1
20	12.18	-30.332	0	1
21	12.77	-30.591	0	1
22	13.30	-30.861	0	1
23	13.96	-31.099	0	1
24	14.62	-28.348	2.8888	1.932×10^{-3}
25	15.24	-31.688	0	1
26	15.63	-31.738	0	1
27	15.97	-31.827	0	1
28	16.89	-32.351	0	1
29	17.58	-32.543	0	1
30	17.83	-32.756	0	1
31	19.12	-33.243	0	1
32	19.57	-33.401	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 16 se representan en la gráfica mostrada en la Figura87.

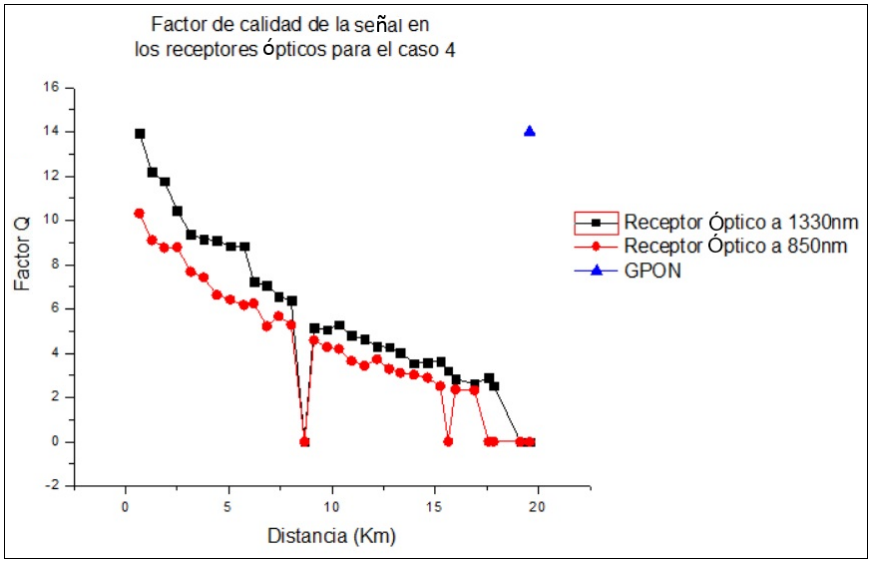


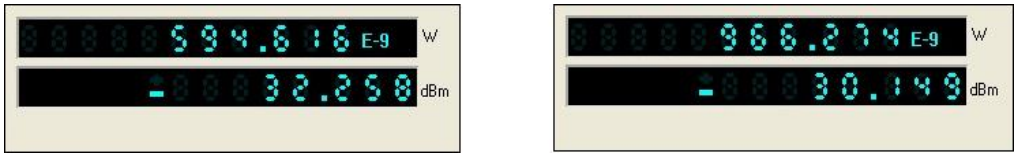
Figura 87: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 4.

RANGO DE DISTRIBUCION DE 128 NODOS

Caso5: transmisor óptico del sensor a 850nm y red de distribución de 128 nodos.

El nodo 1 para el caso 5 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

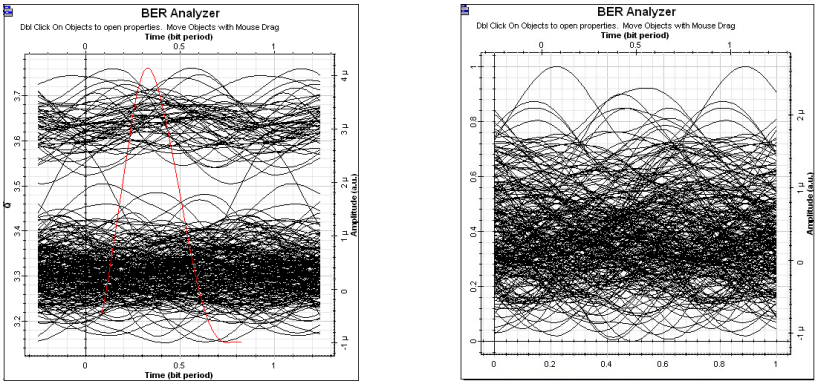
En la Figura 88a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura 88b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 88: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 5.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 89a, la señal tiene un factor de Q= 2.673 y un BER= 3.201 $\times 10^{-3}$, para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 850nm se observa en la Figura 89b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 0 y un BER= 1

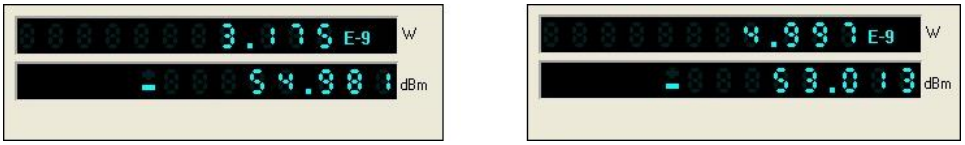


b) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 89: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 5.

El nodo 16 para el caso 5 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 16 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 90a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura90b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 90: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 5.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 16 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 91 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

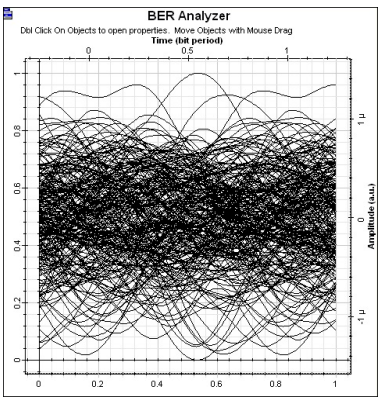
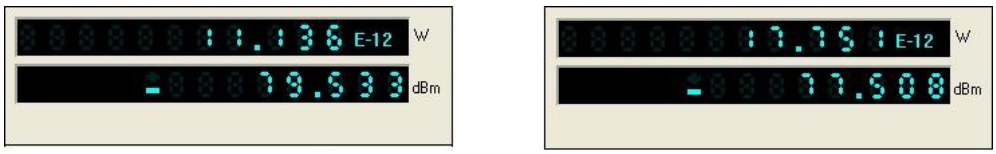


Figura 91: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 5.

El nodo 32 para el caso 5 cuenta con un sensor a 850nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 92a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura92b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 850nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 850nm.

Figura 92: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 5.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 93 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

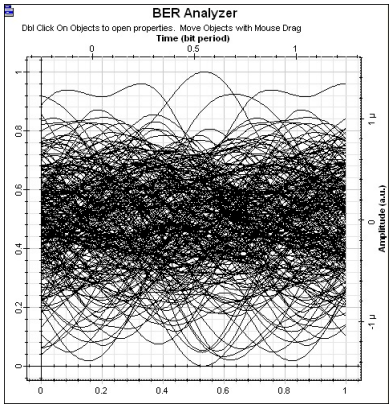


Figura 93: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 5.

En la Tabla 17 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 1330nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 17: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 5.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-32.258	2.6730	3.2017×10^{-3}
2	1.28	-33.808	0	1
3	1.87	-35.283	0	1
4	2.50	-36.858	0	1

5	3.15	-38.482	0	1
6	3.78	-40.058	0	1
7	4.42	-41.658	0	1
8	5.07	-43.283	0	1
9	5.73	-44.932	0	1
10	6.21	-46.133	0	1
11	6.84	-47.708	0	1
12	7.41	-49.133	0	1
13	8.02	-50.656	0	1
14	8.67	-52.283	0	1
15	9.12	-53.406	0	1
16	9.75	-54.981	0	1
17	10.33	-56.433	0	1
18	10.94	-57.957	0	1
19	11.57	-59.533	0	1
20	12.18	-61.058	0	1
21	12.77	-62.533	0	1
22	13.30	-63.857	0	1
23	13.96	-65.507	0	1
24	14.62	-67.158	0	1
25	15.24	-68.706	0	1
26	15.63	-69.683	0	1
27	15.97	-70.533	0	1
28	16.89	-72.831	0	1
29	17.58	-74.558	0	1
30	17.83	-75.183	0	1
31	19.12	-78.406	0	1
32	19.57	-79.533	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 17 se representan en la gráfica mostrada en la Figura94.

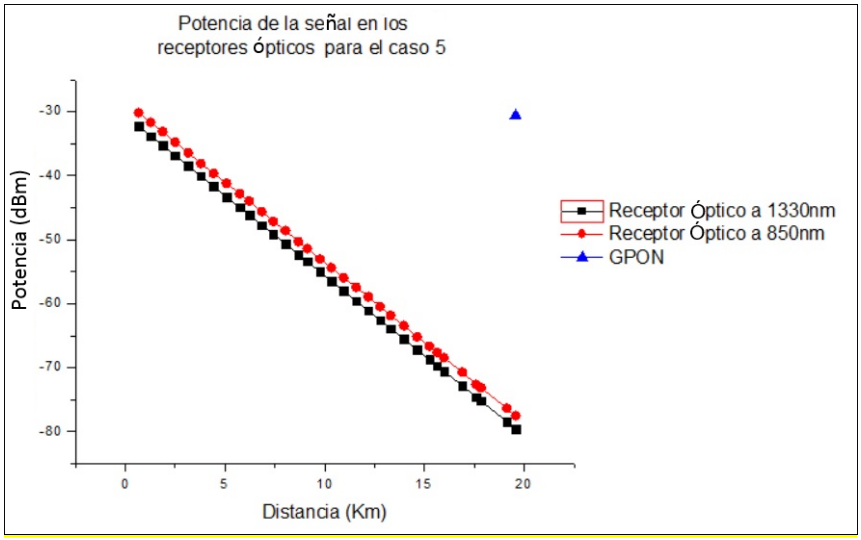


Figura 94: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 5.

En la Tabla 18 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 850nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 18: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 850nm para el caso 5.

Receptor óptico con longitud de onda de 850nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-30.149	0	1
2	1.28	-31.669	0	1
3	1.87	-33.112	0	1
4	2.50	-34.776	0	1
5	3.15	-36.404	0	1
6	3.78	-38.085	0	1
7	4.42	-39.628	0	1
8	5.07	-41.192	0	1
9	5.73	-42.814	0	1
10	6.21	-43.961	0	1
11	6.84	-45.622	0	1
12	7.41	-47.137	0	1
13	8.02	-48.574	0	1
14	8.67	-50.285	0	1
15	9.12	-51.377	0	1
16	9.75	-53.013	0	1
17	10.33	-54.348	0	1
18	10.94	-55.934	0	1
19	11.57	-57.415	0	1
20	12.18	-58.917	0	1
21	12.77	-60.452	0	1
22	13.30	-61.859	0	1
23	13.96	-63.424	0	1
24	14.62	-65.186	0	1
25	15.24	-66.643	0	1
26	15.63	-67.604	0	1
27	15.97	-68.448	0	1
28	16.89	-70.694	0	1
29	17.58	-72.611	0	1
30	17.83	-73.151	0	1
31	19.12	-76.328	0	1
32	19.57	-77.508	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 10 se representan en la gráfica mostrada en la Figura95.

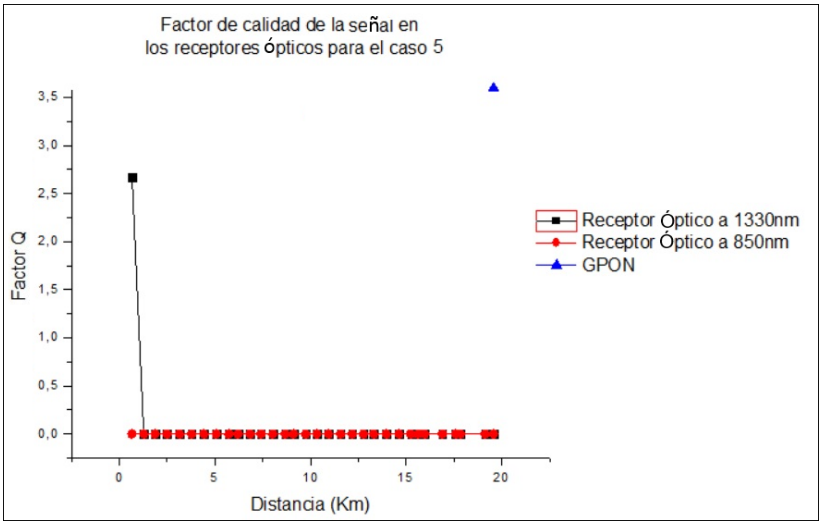
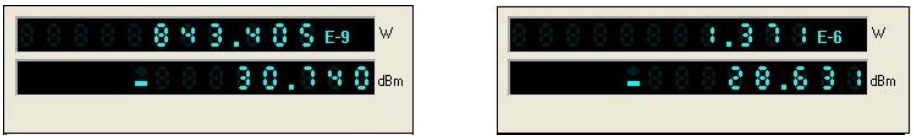


Figura 95: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 5.

Caso6: transmisor óptico del sensor a 1310nm y red de distribución de 128 nodos.

El nodo 1 para el caso 6 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 0.66km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 1 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

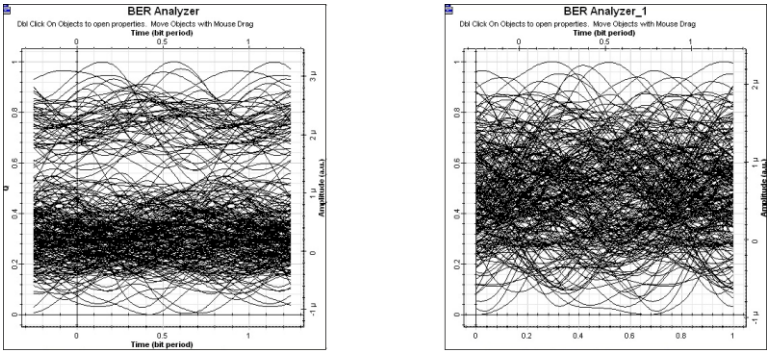
En la Figura 96a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 1 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura96b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 96: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 1 para el caso 6.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 1 en el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 1330nm se observan en la Figura 97a, la señal tiene un factor de Q= 3.647 y un BER= 1.14 $\times 10^{-4}$, para el receptor óptico que opera en la longitud de onda de 850nm se observa en la Figura 97b por medio de un diagrama de ojo que la señal tiene un factor de Q= 0 y un BER= 1



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 97: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 1 para el caso 6.

El nodo 16 para el caso 6 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 9.75km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios por lo que el esquema es similar al del nodo 16 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 98a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 16 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura98b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 98: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 16 para el caso 6.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 16 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 99 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

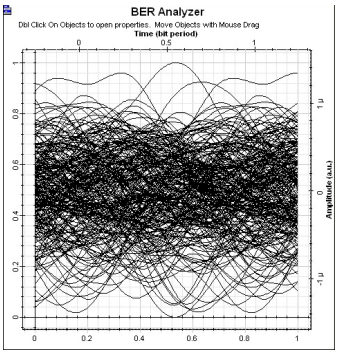
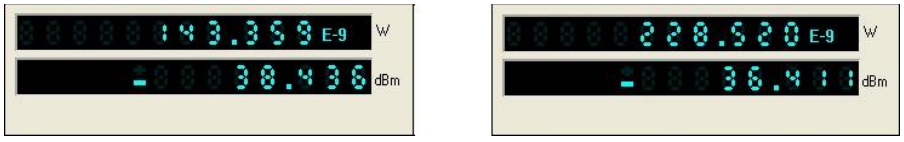


Figura 99: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 16 para el caso 6.

El nodo 32 para el caso 6 cuenta con un sensor a 1310nm, una fibra óptica con longitud de 19.57km y atenuación de -21.072dB/km, la configuración general no sufre grandes cambios

por lo que el esquema es similar al del nodo 32 del caso 1 y no se hace necesario mostrar nuevamente el esquema general.

En la Figura 100a se presenta la medición de potencia realizada en el receptor óptico del nodo 32 y que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1330nm y en la Figura 100b la medición de potencia realizada en el receptor óptico que recibe la señal demultiplexada en una longitud de onda de 1310nm.



a) Receptor óptico a 1330nm. b) Receptor óptico a 1310nm.

Figura 100: Medidor de potencia en el receptor óptico del nodo 32 para el caso 6.

Los resultados arrojados por el analizador de BER para el nodo 32 en ambos receptores ópticos muestra que la señal ya se ha perdido por completo como se ve en la Figura 101 debido a las perdidas introducidas por los elementos que componen el sistema. El factor Q es de 0 y el BER de 1.

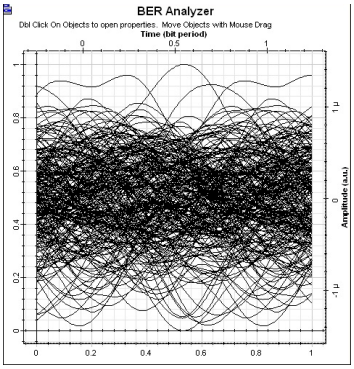


Figura 101: Diagrama de ojo receptores ópticos del nodo 32 para el caso 6.

En la Tabla 19 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 1330nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 19: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1330nm para el caso 6.

Receptor óptico con longitud de onda de 1330nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-30.872	3.6479	1.14×10^{-4}
2	1.28	-31.120	3.1885	5.780×10^{-4}
3	1.87	-31.355	3.0877	8.373×10^{-4}
4	2.50	-31.607	2.6229	3.635×10^{-3}
5	3.15	-31.867	2.65	3.282×10^{-3}
6	3.78	-32.120	2.4624	5.544×10^{-3}
7	4.42	-32.376	2.2437	1.034×10^{-2}
8	5.07	-32.634	0	1

9	5.73	-32.899	2.249	1.0601×10^{-2}
10	6.21	-33.091	0	1
11	6.84	-33.344	0	1
12	7.41	-33.572	0	1
13	8.02	-33.816	0	1
14	8.67	-34.088	0	1
15	9.12	-34.256	0	1
16	9.75	-34.507	0	1
17	10.33	-34.739	0	1
18	10.94	-34.984	0	1
19	11.57	-35.235	0	1
20	12.18	-35.479	0	1
21	12.77	-35.716	0	1
22	13.30	-35.928	0	1
23	13.96	-36.191	0	1
24	14.62	-36.454	0	1
25	15.24	-36.703	0	1
26	15.63	-36.860	0	1
27	15.97	-36.983	0	1
28	16.89	-37.363	0	1
29	17.58	-37.639	0	1
30	17.83	-37.739	0	1
31	19.12	-38.255	0	1
32	19.57	-38.436	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 10 se representan en la gráfica mostrada en la Figura102.

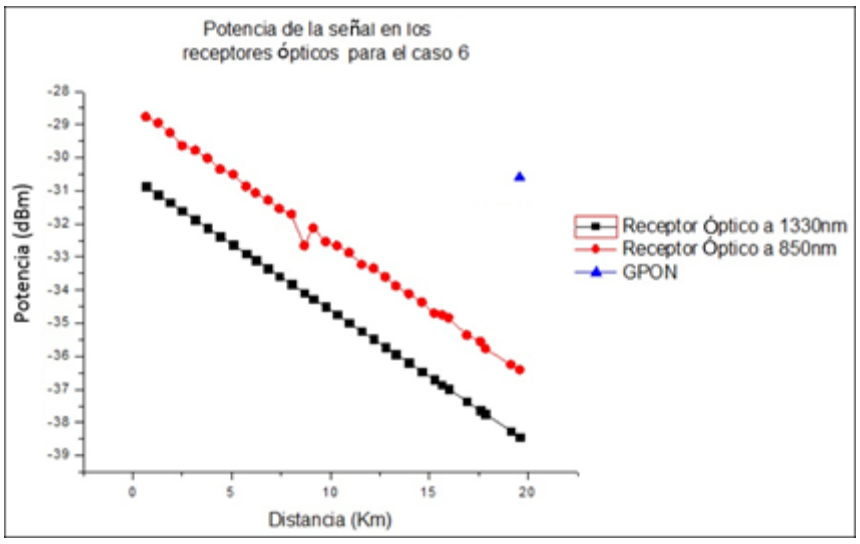


Figura 102: Grafica de potencia en el receptor óptico para el caso 6.

En la Tabla 20 se presenta el consolidado final de cada uno de los receptores ópticos que operan en una frecuencia de 1310nm y que componen el sistema de comunicación.

Tabla 20: Parámetros del receptor óptico a una frecuencia de 1310nm para el caso 6.

Receptor óptico con longitud de onda de 1310nm				
Nº Nodo	**Distancia (km)**	**Potencia (dBm)**	**Factor Q**	**BER**
1	0.66	-28.763	2.6762	3.708×10^{-3}
2	1.28	-28.947	0	1
3	1.87	-29.240	2.2283	1.292×10^{-2}
4	2.50	-29.638	2.2456	1.236×10^{-2}
5	3.15	-29.776	0	1
6	3.78	-30.012	0	1
7	4.42	-30.349	0	1
8	5.07	-30.499	0	1
9	5.73	-30.867	0	1
10	6.21	-31.067	0	1
11	6.84	-31.282	0	1
12	7.41	-31.536	0	1
13	8.02	-31.707	0	1
14	8.67	-32.658	0	1
15	9.12	-32.117	0	1
16	9.75	-32.538	0	1
17	10.33	-32.655	0	1
18	10.94	-32.869	0	1
19	11.57	-33.229	0	1
20	12.18	-33.343	0	1
21	12.77	-33.601	0	1
22	13.30	-33.871	0	1
23	13.96	-34.109	0	1
24	14.62	-34.368	0	1
25	15.24	-34.699	0	1
26	15.63	-34.749	0	1
27	15.97	-34.838	0	1
28	16.89	-35.360	0	1
29	17.58	-35.554	0	1
30	17.83	-35.765	0	1
31	19.12	-36.253	0	1
32	19.57	-36.411	0	1

Los resultados presentados en la Tabla 21 se representan en la gráfica mostrada en la Figura103.

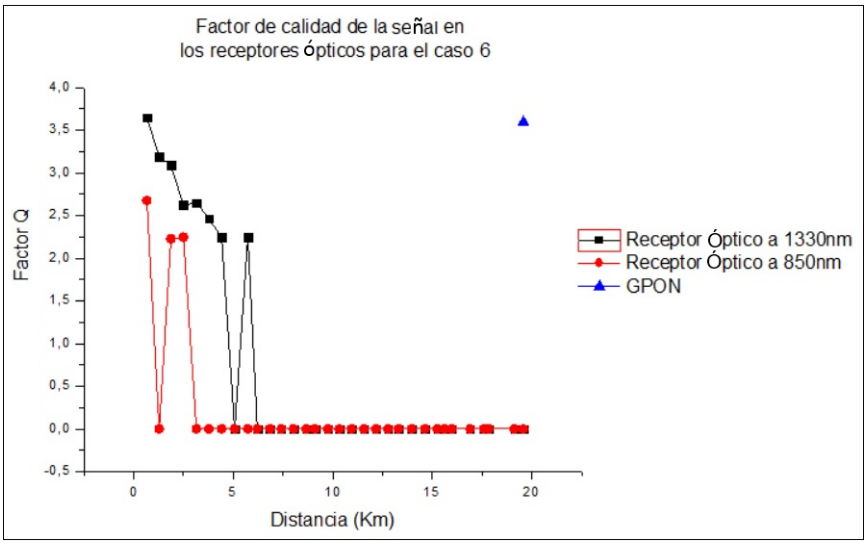


Figura 103: Gráfica de factor Q en el receptor óptico para el caso 6.

Para todos los casos la potencia de la señal disminuye de forma lineal a medida que la longitud de la fibra aumenta por la relación de atenuación que presenta la fibra por longitud que presenta además de ser independiente de la frecuencia a la que se transmita.

El factor de calidad de la señal también se ve afectada por la distancia que recorre la señal hasta llegar a la OLT ya que la atenuación incrementa en relación a -3dB a medida que la distribución de la red también aumenta y las pérdidas aumentan cuando la distancia a recorrer es mayor.

CAPITULO VI: VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se han realizado estudios sobre las redes de sensores como en [20] donde se realiza el diseño de un nodo de sensado remoto inalámbrico detallando los tipos de protocolos empleados para la comunicación inalámbrica y los tipos de antenas que se emplean. Las aplicaciones en las que se emplean las redes de sensores también han sido un gran tema de estudio, en el ámbito de la agricultura se han realizado grandes avances para la vigilancia y cuidado de los cultivos como en [21] donde permite la modificación de algunas variables del entorno para optimizar los recursos.

Otra aplicación un poco más específica que se le ha dado a las redes de sensores es el caso de [22], donde se propone el diseño de una red de sensores para mantener bajo control el tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá teniendo en cuenta aspectos como la seguridad vial, la semaforización y la óptima circulación de los vehículos.

La fibra óptica ha sido objeto de estudio desde hace bastante tiempo y últimamente las redes de acceso óptico han cobrado fuerza gracias a las ventajas que ofrece y las facilidades que ofrece en su implementación para la transmisión de señales, en [23] se hace un estudio detallado de las redes PON y los servicios que se pueden ofrecer empleando estas redes de acceso en un sistema de comunicación.

Sin embargo, en [24] se hace un estudio más detallado de la transmisión de señales en un sistema WDM empleando un láser DFB para 10 canales con una distancia de 21km analizando los resultados obtenidos en detalle para diferentes ambientes.

8. CONCLUSIONES

Las redes de sensores cobran mayor fuerza cada día debido a las múltiples aplicaciones en las que pueden ser empleadas, ya que cuentan con variada cantidad de periféricos que permiten mayor precisión en la toma de medidas de una variable específica y con ello el aumento de la velocidad de transmisión de información que obliga un avance tecnológico permanente haciendo dinámico el mercado de los sensores y conllevando a disminuir los costos, lo que hace de las redes de sensores una parte fundamental para lograr territorios inteligentes.

Dentro del análisis de las redes de acceso óptico se tuvo en cuenta principalmente que pudiese dar soporte a una red de sensores por lo que es necesario la conexión punto-multipunto condición por la cual las redes de acceso óptico activas no fueron tenidas en cuenta para el diseño de la red de acceso óptico además, posee gran cantidad de elementos activos que hace que el consumo de energía sea mayor y por ende los costos para mantener dichas redes de acceso en estado óptimo sean elevados, sin embargo, cabe aclarar que las redes de acceso óptico activas poseen la gran ventaja de alcanzar distancias mucho mayores entre la OLT y el usuario, así como la transmisión full-dúplex que garantiza la transmisión de información de forma ascendente o descendente de forma simultánea.

Debido al avance tecnológico que han logrado las redes de acceso ópticas pasivas es claro que las redes tipo GPON poseen grandes ventajas respecto a los demás tipos de redes PON, para el diseño del sistema de transmisión sobre fibra óptica se tomó como referencia los parámetros que este tipo de redes ópticas posee y por tanto los resultados obtenidos poseen también las características de este tipo de redes como lo son la velocidad de transmisión, cantidad de direccionamiento por nodo de hasta 128 , topologías que minimizan el despliegue de fibra óptica, entre otras, aunque el costo de los láseres que se emplean como emisores puede llegar a elevar el costo de implementación de este tipo de redes siguen cobrando fuerza en los sistemas de transmisión ópticos.

Con el diseño propuesto para la red de acceso óptica como soporte a la red de sensores se intentó hacer una aproximación a la topología de las redes con las que cuenta la ETB hasta el momento en la ciudad de Bogotá D.C haciendo que las simulaciones presentadas sean lo más cercanas posibles a la realidad, sin embargo, por limitaciones presentadas por el software no fue posible realizar las simulaciones en sentido ascendente y descendente simultáneamente por lo que se optó por analizar con detalle solo el canal ascendente ya que este sentido de transmisión es el más interesante de los casos cuando los sensores se encuentre trasmitiendo información hacia la OLT.

La red propuesta constó de 1 OLT y 32 ONUs que para el caso de las simulaciones se realizaron de forma independiente constando de 1 OLT y 1ONU reutilizando los recursos propios de la red, dando que no está dentro del alcance del trabajo analizar el comportamiento de los protocolos de capa de enlace del modelo OSI por medio del cual se realiza la señalización adecuada en un sistema de transmisión. De este modo se optó por emplear elementos como los multiplexores y demultiplexores que cumplen con dicha función de forma similar aunque puede llegar a degradar la señal transmitida debido a las pérdidas que introducen al sistema de comunicaciones.

Tomando como referencia la señal propia de una red GPON se puede observar que al colocar elementos activos como los multiplexores y demultiplexores la señal se ve afectada por las pérdidas que dichos componentes introducen a la red, por lo que se hace necesario el uso de protocolos de señalización. El BER y el factor Q son parámetros fundamentales para determinar la calidad de la señal, sin embargo, no son suficientes para determinar el origen de la perdida de información por lo que se hace uso de los diagramas de ojo que permiten obtener con detalle la forma de los pulsos que son enviados desde la ONU hacia la OLT.

Al variar la frecuencia de trabajo de los láseres empleados en los transmisores ópticos de los sensores se observa una variación importante en la calidad de la señal ya que la atenuación de la señal por unidad de distancia es mayor cuando se emplea una frecuencia en la primera ventana de trabajo de la fibra óptica a cuando se emplea una frecuencia que se encuentra en la segunda o tercera ventana de trabajo. La tecnología empleada para los transmisores ópticos que operan a frecuencias bajas es mucho más económica, lo que permite que sus costos de producción sea menor que los láseres que se emplean en frecuencias altas.

La modulación que se emplea para transmitir la información recolectada por los sensores es un factor importante a tener en cuenta al momento de diseñar una red de este tipo ya que como se observa en los resultados obtenidos, la modulación externa que se empleó para el láser de la red GPON presenta una relación de extinción mayor que hace que la calidad de la señal sea buena, mientras que al emplear una modulación directa como la utilizada en el transmisor óptico del sensor como la relación de extinción de la señal es menor la calidad de la señal también es menor.

Según los casos anteriormente expuestos, se puede deducir que el mejor de los casos se presenta cuando el transmisor del sensor opera a una frecuencia de 1310nm y la red de distribución es de 32 nodos ya que los receptores ópticos logran detectar la señal después de aproximadamente 17km, sin embargo, el sistema cuenta con una calidad baja después de los 9km por lo que sería apropiado el uso de amplificadores o repetidores de señal. Para los casos en que la red de distribución es de 64 nodos y 128 nodos la señal es demasiado débil cuando llega a los receptores ópticos de la OLT incluso cuando la distancia es menor a 1km.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Roldán Velásquez F, Foro “Innovación abierta y colaborativa”
http://frajaro.blogspot.com.co/2013/06/innovacion-abierta-y-colaborativa.html

[2] Escobar S, Martínez C, “Herramientas para el diseño de enlaces de fibra óptica” – 2002

[3] The Fiber Optic association “Guide to Fiber optics & premises cabling”

[4] Urrutia G, “Fibras ópticas especiales para 10Gbits”
http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=306&tip=7

[5] Gómez Martínez C, “modos de modulación”
http://carlosgomez098.blogspot.com.co/2012/08/tema-4-tipos-y-modulacion-de-senales_16.html

[6] Vaquerizo I, “Informa semanal ciudades que piensan”
http://www.rtve.es/noticias/20120210/informe-semanal-ciudades-piensan/497293.shtml

[7] Roldán Velásquez F, Foro “Los territorios inteligentes en Colombia”
http://www.innovacionabierta.com.co/profiles/blogs/los-territorios-inteligentes-smart-cities-en-colombia

[8] Zapardiel Prieto J, “Diseño de una red de acceso mediante fibra óptica” -2014

[9] Millán Tejedor R, “Tecnologías de banda ancha por fibra óptica” – 2010

[10] “Comunicaciones ópticas II: Redes de acceso óptico”

[11] Empresa de telecomunicación de Bogotá
http://etb.com.co/inversionistas/Inicio.aspx

[12] ETB Deploys GPON Network with an “EasyOptical+OTDR” Solution
http://wwwen.zte.com.cn/endata/magazine/ztetechnologies/2016/no4/articles/201607/t20160721_459175.html

[13] García Patiño M, Valero Mora J, “Guía para la implementación de redes de sensores inalámbricos (WSN) ” – 2010

[14] Parra Herrera F, “Introducción a las redes de sensores inalambricos”

[15] Serna Sanchis J, “Redes de sensores inalámbricos” – 2007

[16] Datasheet Tmote Sky Moteiv:
http://www.moteiv.com/

[17] Datasheet Mica2dot Crossbow
https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2dot.pdf

[18] Manual del usuario OptiSystem, OptiSystem_Getting_Started

[19] Sierra Sanchez, F, Tellez García R, Rubiano Muñoz A. Estimación del BER en un enlace de comunicaciones ópticas

[20] Echeverry Moreno C, Gonzalez Jaramillo M. Diseño de un nodo de sensado remoto inalámbrico usando elementos radiantes de alta ganancia.

[21] Urbano Molano F. Redes de sensors inalámbricos aplicadas a optimización en agricultura de precisión para cultivos de café en Colombia

[22] Estupiñan Cuestas E, “Viabilidad técnica paa una red de sensores de captura de variables de tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá”

[23] Castro Ramirez N. “Estudio de las aplicaciones de las redes PON”

[24] Osorio Pinilla J, Gonzalez Nieto J. Configuración dinámica de canales ascendentes y descendentes en una red de acceso WDM-PON.