



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Extracción de información de sensado mediante PLOAM
en G.984

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de
Comunicaciones

AUTOR/A: Salgado Cazorla, Cristian

Tutor/a: Vidal Rodriguez, Borja

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Objetivos —

- Evaluar la factibilidad de utilizar una red con estándar G.984 en operación, para extraer información relativa a la temperatura ambiental en el entorno de la red de distribución óptica sin utilizar elementos ajenos a los que conforman la red GPON.
- Identificar los escenarios de las posibles aplicaciones del uso de información PLOAM para sensado.

Metodología — El presente trabajo consiste en una metodología teórica-práctica, en primer lugar, se realizó una revisión teórica del uso de la fibra óptica como sensor distribuido, investigaciones que tratan de utilizar las redes de telecomunicaciones existentes con ciertas modificaciones sobre los equipos activos para conseguir resultados semejantes a los obtenidos utilizando interrogadores especializados. Por otra parte, también se revisó la documentación del estándar sobre todo el proceso de activación de una ONU durante el cual se toma los datos del rango, también se recolectó información sobre las características de los cables de fibra utilizados durante las pruebas experimentales cuyos resultados se presentan en este documento.

Desarrollos teóricos realizados — Como paso inicial para este estudio, se realizó una búsqueda sobre investigaciones, simulaciones del proceso de rango sobre GPON, para determinar todos los retardos que una OLT toman en cuenta durante el proceso de adquisición de rango y ecualización de todas las ONUs que forman parte de la red, la forma de acceder a estos datos para procesarlos y convertirlos en información que permitan caracterizar los efectos de la temperatura sobre el índice de refracción y con ello poder utilizar una red GPON activa como sensor distribuido.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — Con base en la información recolectada, se desarrolló un algoritmo en Matlab que permite estimar teóricamente el efecto producido por la temperatura sobre el índice de refracción y por tanto sobre el retardo del grant de interrogación. También se realizaron pruebas experimentales sobre una red de acceso FTTH en operación para contrastar con el análisis matemático, caracterizando los resultados obtenidos.

Resultados — Se logró acceder a la información que se genera entre la OLT y las ONUs durante el proceso de activación, repitiendo este proceso a diferentes temperaturas, la información recolectada permitió determinar que en G.984 el efecto producido por la temperatura sobre el índice de refracción de un cable de fibra óptica es visible para distancias superiores a los 2.5Km, pero con resoluciones bastante bajas en cuanto a sensado de temperatura, esta resolución se incrementa con relación al largo del cable, pero se logró determinar que la planta externa de una red GPON si se puede utilizar como sensor distribuido.

Líneas futuras — Con base en este estudio y con la evolución tecnología de las redes de acceso hacia nuevos estándares, como G.987, se podría mejorar la resolución de las redes FTTH como sensores de temperatura, de tal forma que sea posible mapear la temperatura de una ciudad sin más que ejecutar el proceso de rango en las diferentes ONUs que formen parte de la red y que tengan una longitud de fibra mínima para que pueda registrar los efectos de la temperatura sobre el índice de refracción.

Publicaciones — Por el momento no existen publicaciones asociadas a la elaboración de esta tesina.

Abstract — Cuando una tecnología se encuentra lo bastante madura y cumple con los objetivos para la cual fue desarrollada lo que queda por delante es buscar la forma de sacarle más provecho a dicha tecnología sin interferir con los objetivos para los que fue desarrollado. Con esto en mente la fibra óptica fue la solución para cubrir las necesidades del incremento de tráfico de Internet, permitiendo conectar centros de datos a velocidades sumamente altas. La Tecnología FTTH llevó estas velocidades de conexión hasta las oficinas, hogares, empresas, etc, donde se ha convertido en una infraestructura básica como puede ser la electricidad o el gas. Por lo tanto, podemos preguntarnos si esta infraestructura puede ser aprovechada para brindar servicios adicionales. Con esta premisa, se realizan una serie de pruebas teóricas y experimentales para estudiar el potencial de explotar la infraestructura de las redes de acceso FTTH aéreas para extraer información ambiental. En concreto, se plasman los resultados de utilizar una red de fibra óptica que opera con el estándar G.984 como sensor para detectar cambios de temperatura, determinando la resolución con la que se puede estimar dichos cambios.

Autor: Cristian Arnulfo Salgado Cazorla, email: crisalc1@teleco.upv.es

Director 1: Borja Vidal Rodríguez, email: bvidal@com.upv.es

Fecha de entrega:

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	4
II. SENSADO CON FIBRA ÓPTICA	5
II.1. Sensado distribuido de temperatura	7
III. INFORMACIÓN PLOAM EN GPON.....	9
III.1. Canal descendente o downstream.....	9
III.2. Canal ascendente o upstream.....	11
III.3. Proceso de activación de una ONU	12
III.4. Extracción de información de los mensajes PLOAM.....	15
IV. ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA BASADA EN PLOAM	16
IV.1. Estimación teórica del RTT	19
IV.2. Determinación de la temperatura a partir del EqD	20
IV.3. Validación experimental	21
IV.4. Estimación de mapa de temperaturas	26
IV.5. Escenarios de posibles aplicaciones	26
IV.6. Líneas a futuro	27
V. Conclusiones	29
Referencias	30

I. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las distintas bandas del espectro electromagnético ha permitido desarrollar la sociedad de la información en la que nos encontramos, siendo las redes de móviles y la fibra óptica las infraestructuras más extendidas. Además, el espectro también puede explotarse para implementar sistemas de exploración y sensado: entre ellos se encuentran radar [1], teledetección [2], monitorización de procesos industriales [3]- [4], etc.

Recientemente está empezando a ganar interés la posibilidad de combinar ambos ámbitos, es decir, utilizar la infraestructura de las redes móviles para extraer información de sensado [5]-[6]. La idea es que las futuras redes 6G se diseñen para incorporar esta posibilidad y aprovechar la alta densificación de celdas de estos estándares junto el desarrollo de componentes que permiten el uso de frecuencias altas [7], con una menor difracción, para detectar la presencia de objetos, así como su forma y localización a partir de las señales radio transmitidas y recibidas por la red móvil. También es posible aprovechar nuevas infraestructuras wireless del backhaul y fronthaul que exploten estas bandas milimétricas [8] para integrar en el servicio de comunicaciones funciones de sensado.

Ante estos desarrollos podemos preguntarnos si de una forma similar podríamos aprovechar la otra infraestructura de comunicaciones más pervasiva, las redes de acceso ópticas (FTTH), para extraer información de sensado.

La tecnología FTTH es la red de acceso a internet con mayor penetración en la actualidad, provocando el incremento de empresas dedicadas a brindar este servicio, como resultado en muchos países se puede ver una gran cantidad de cables de fibra óptica anclados a los postes del tendido eléctrico varios centímetros debajo de los cables de tensión media, pertenecientes a la red de distribución acompañadas de una gran cantidad de fibras de la red de acceso. En ciertas regiones como Europa los despliegues son principalmente subterráneos, pero en América y Asia hay mucho despliegue aéreo que reduce el capex y el tiempo de despliegue de la red. En este caso, la fibra óptica de la red de distribución óptica de la PON podría emplearse para extraer información de temperatura.

El uso de la fibra óptica para aplicaciones de sensado ha sido muy estudiado [9]. Para ello se emplean interrogadores especialmente desarrollados para analizar pulsos ópticos de corta duración, detectando y analizando las señales ópticas que retornan por la misma fibra a lo largo del elemento o estructura sensada. Esto permite derivar la evolución de un cierto parámetro a lo largo de la fibra. Es decir, obteniendo medidas distribuidas. Para ello se emplean distintos efectos que se producen en la fibra que dependen de las perturbaciones externas ya sean de tensión, temperatura o vibración. El interrogador tiene la capacidad de localizar la distancia exacta y la magnitud de las perturbaciones que afectan con resoluciones muy muy altas.

Sin embargo, estos interrogadores suponen un coste que, en la actualidad, es elevado, lo que limita la aplicabilidad de esta aproximación. Por ello, en esta tesina se va a estudiar el potencial de emplear

la infraestructura FTTH para obtener información de temperatura a través del cambio de retardo que induce la dependencia del índice de refracción de la fibra óptica con la temperatura lo que se monitorizará analizando los mensajes PLOAM de una red GPON totalmente operativa sin producir afectaciones en los servicios. Si bien de esta forma no es posible obtener información distribuida, la información integrada de la temperatura en multitud de enlaces puede permitir la creación de mapas de temperatura en las ciudades.

II. SENSADO CON FIBRA ÓPTICA

El sensado utilizando la fibra óptica como sensor distribuido [9] permite monitorear temperatura, integridad estructural de puentes, túneles y otras estructuras, incluso la actividad sísmica en zonas remotas [10] lo que la convierte en una herramienta muy versátil. Este tipo de sensores permite convertir una estructura común en una estructura inteligente, que nos permite conocer su estado utilizando las herramientas de interrogación apropiadas.

Se trata de una tecnología que ha alcanzado la madurez comercial en varios entornos. Un caso de aplicación son los túneles de metro donde se emplea fibra óptica como sensor distribuido de temperatura. Por ejemplo, el metro de Riad cuenta con cerca de 90 Km de fibra óptica utilizada, que forma parte del sistema de alerta temprana y supresión de incendios. Este sistema gestiona más de 10 mil valores de temperatura con capacidad para reportar temperaturas de hasta 750 C y activar contramedidas de emergencia. Sistemas similares se encuentran en otros metros como el de Doha (Qatar), Delhi (India), etc.

Otra aplicación es en plantas industriales. Por ejemplo, la planta de producción química de la empresa Panimex en Santiago de Chile cuenta con una granja de tanques de almacenamiento de productos inflamables como alcohol. Para garantizar la seguridad de los trabajadores se monitorea la temperatura de toda la granja. Como los sensores discretos no cubren eficientemente el espacio por su gran extensión, se está empleando un sistema de monitoreo distribuido de temperatura con fibra óptica a lo largo de la superficie de los tanques.

El sensado distribuido también tiene aplicación comercial para la medida de tensión mecánica en obra civil. Por ejemplo, en Austria se está construyendo un túnel en Semmering que está previsto que entre en funcionamiento en 2030. En el proceso de construcción se están usando sensores de fibra distribuidos para medir con precisión de forma continua la deformación que sufren los túneles por los movimientos del terreno.

Asimismo, se ha aplicado a otros sectores como monitorización de tuberías, cables de alta potencia, minería, puentes, cables submarinos, entre muchas otras aplicaciones. En Ecuador apenas se está incursionando en la utilización de estos recursos tecnológicos. Se encuentra instalados dos

sistemas de sensado distribuido sobre tuberías. Todos estos sistemas antes descritos basan su funcionamiento en el análisis de la retrodispersión del haz de luz incidente sobre un cable de fibra óptica que se encuentra desplegada con el único propósito de servir como sensor.

El principio básico del sensado distribuido sobre fibra óptica basa su funcionamiento en la medición de la intensidad de un haz de luz introducido en el medio y la cantidad de este que se refleja, con esta detección síncrona se puede determinar la distancia a la que se produce las perturbaciones, este fenómeno se denomina retrodispersión, y gracias a su análisis se puede caracterizar ciertos parámetros físicos que entran en contacto con la fibra e interfieren con la naturaleza del haz de luz durante todo o ciertas partes específicas de la longitud total de la fibra.

Los primeros sensores de fibra óptica distribuidos solo eran capaces de medir la atenuación que existe a lo largo del cable, atenuaciones producidas por los factores externos (como curvaturas en el cable) y capturarlos en el proceso de retrodispersión. Este principio es la base de los OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), ampliamente utilizados para la monitorización de redes de fibra. Posteriormente, este principio se extendió para la monitorización de otros parámetros entre ellos se puede destacar los sensores basados en técnicas de retrodispersión lineales, en cambios de polarización y los basados en efectos no lineales (efecto Raman, efecto Brillouin).

Un sistema de sensado distribuido tiene tres componentes básicos: El cable de fibra óptica que toma el lugar de n sensores necesarios para cubrir el área o estructura que se desea monitorea, un equipo interrogador que es el encargado de recolectar los datos incorporados en las señales ópticas reflejadas, su funcionamiento es similar al de un OTDR convencional [11], introduciendo en un hilo de fibra pulsos ópticos, detecta y analiza la retrodispersión para determinar los cambios a los que fue sometido dicho cable, a que distancia y la magnitud del evento como se muestra en la Figura 1.

En casos específicos es necesario utilizar fibras especiales, como fibras con redes de Bragg, pero en la mayoría de sus aplicaciones se utilizan los mismos cables que se instalan en los sistemas de telecomunicaciones. El interrogador generalmente es un módulo de montaje en bastidor, pero también existen diseños portátiles que se acoplan a las soluciones de OTDR existentes [12], estos interrogadores se pueden conectar a conmutadores para monitorizar un gran número de fibras de forma automatizada.

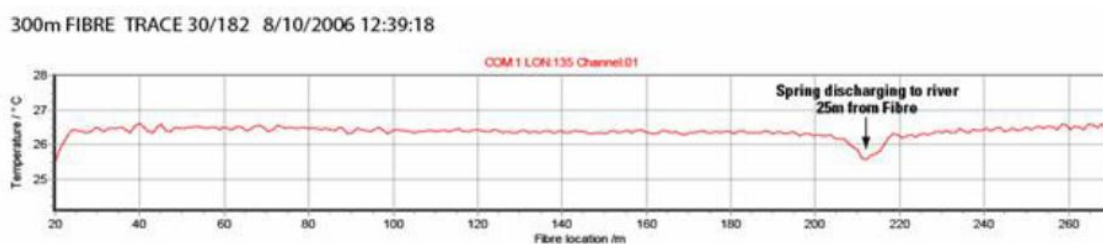


Fig.1. Gráfica OTDR modificado para que opere como sensor de temperatura.

La información adquirida se incorpora a una plataforma para su almacenamiento y visualización. Uno o varios operadores pueden acceder a ella y son los encargados de la toma de decisiones alejados completamente de los ambientes hostiles.

II.1. SENSADO DISTRIBUIDO DE TEMPERATURA

Los sensores de temperatura distribuidos (DTS) [13], empezaron a desarrollarse en los años 80, como una nueva forma de obtener medidas de temperatura y la tecnología ha ido madurando hasta alcanzar el despliegue comercial. En ciertas situaciones, es necesario conocer la temperatura de un conjunto de puntos, por ejemplo, para la monitorización de distintos procesos industriales. La sensorización intensiva es un elemento clave en la optimización y mejora de calidad de la industria (Industria 4.0). La fibra óptica permite obtener medidas a lo largo de su longitud de forma que un conjunto de sensores puede ser sustituido por una fibra y un interrogador. Dicho de otro modo, Es necesario cambiar cambiamos un conjunto discreto de sensores por uno continuo. La tecnología del interrogador ha ido evolucionando y es posible obtener resoluciones espaciales menores a un metro y caracterizar temperaturas con precisión de 1 °C hasta 30 km [13].

El principio básico del sensado distribuido sobre fibra óptica se basa en la capacidad de aprovechar que ciertos efectos externos a la fibra perturban la propagación de la luz. Típicamente se emplean diferentes tipos de scattering [14] que tienen respuestas características a perturbaciones externas bien definidas (temperatura, vibración o tensión), convirtiendo a la fibra óptica en un sensor específico. En concreto, puede determinarse la temperatura usando los efectos Rayleigh, Raman o Brillouin, Figura 2.

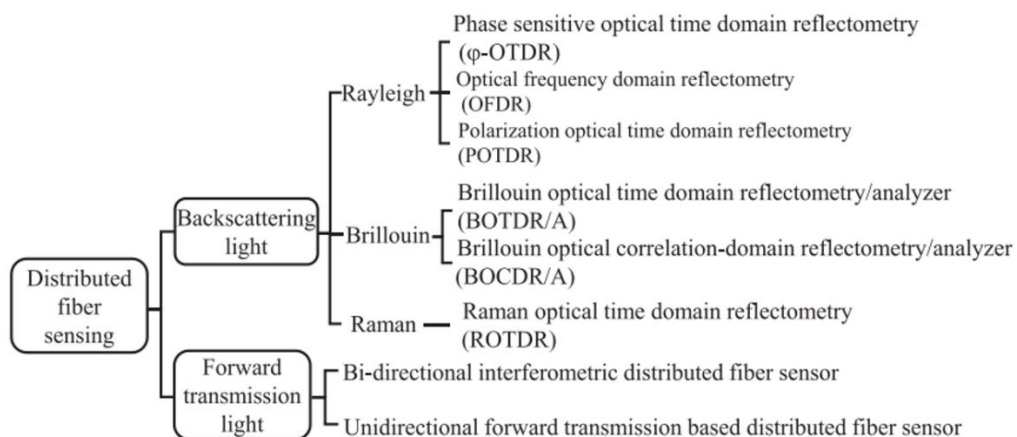


Fig.2. Técnicas de sensado distribuido sobre fibra óptica

Para analizar la retrodispersión Rayleigh se puede utilizar un OTDR convencional, los efectos de la temperatura son difíciles de ver sobre la traza para fibras comúnmente utilizadas en redes de telecomunicaciones. Estos resultados se pueden mejorar con la utilización de fibras especiales [15]

con núcleo diseñado para tener una fuerte dependencia a los cambios de temperatura. Otro método de sentido con OTDR consiste en la utilización de fibras especialmente dopadas. Estas bandas de absorción se desplazan con los cambios de temperatura, mostrando cambios de atenuación. También se puede utilizar fibras con revestimientos sensible a la temperatura, provocando cambios en el índice de refracción produciendo una diferencia visible en la retrodispersión, todos estos métodos están limitados a unos cientos de metros con resoluciones de temperatura entre 2 y 5 grados, estos resultados se vuelven casi ilegibles si se utiliza como sensor fibras monomodo.

Utilizando un Raman-OTDR se analiza la retrodispersión de Raman en lugar de la Rayleigh. El haz de luz es inyectado sobre una fibra produciendo una luz retro esparcida Raman, esta se pasa a través de filtros selectivos a diferentes longitudes de onda para separar la señal en Stokes y anti-Stokes, las moléculas absorben y pierden energía respectivamente, generando fotones de mayor o menor frecuencia, esta información ingresa en un detector que analiza y promedia la señal anti-Stokes que esta tiene una dependencia casi lineal a la influencia de la temperatura [16], consiguiendo resoluciones menores a un grado centígrado en longitudes de fibra óptica mayores a 10 kilómetros.

Una tercera aproximación se basa en el efecto Brillouin. En este caso las variaciones de temperatura o tensión inducen cambios en la frecuencia a la que aparece la resonancia inducida por Brillouin [17], para ello se introduce un haz de luz con la intensidad y anchura espectral correcta a una frecuencia específica, produciendo un haz de menor potencia y en sentido contrario, en una frecuencia diferente, la diferencia intensidad y frecuencia es sensible a la tensión y temperatura. La tecnología basada en el efecto Brillouin tiene mayor intensidad de retrodispersión que los basados en el efecto Raman como se puede ver en la Figura 3.

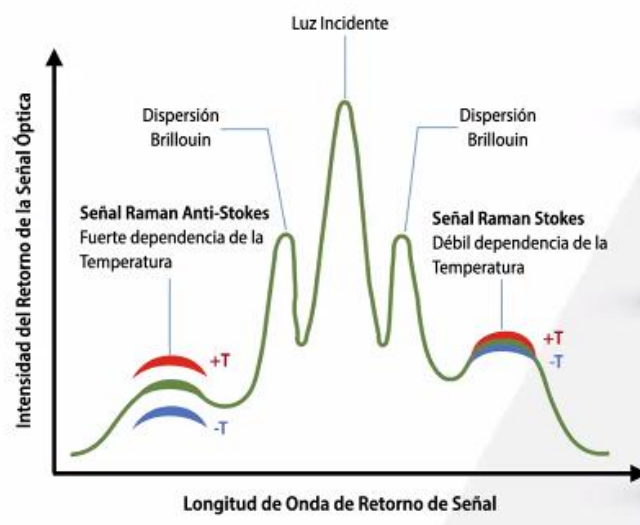


Fig.3. Gráfica efecto Raman y Brillouin

Sin embargo, todas estas aproximaciones requieren de un sistema de interrogación que supone una inversión económica considerable. Si bien para ciertas aplicaciones de alto valor añadido supone una aproximación interesante, para otras su uso es inabordable. Por ello, podría ser interesante

estudiar si es posible obtener no la misma pero cierta información sobre la temperatura ambiente, pero a coste cero, en la línea de las actividades de desarrollo de funcionalidades de sensado a partir de sistemas de comunicaciones móviles.

Además, estos sistemas de sensado distribuido tienen problemas para superar elementos de red pasivos como los utilizados en las redes de acceso. Aunque existen investigaciones [5], [15] que han investigado el uso de interrogadores en longitudes de onda específicas para utilizar una red estándar G.984 activa y con tráfico en los dos sentidos como sensor distribuido utilizando técnicas bien conocidas Rayleigh, Brillouin y Raman, esta aproximación reduce el alcance del sensor por lo que en la práctica las redes de sensado distribuidas suelen emplear despliegues de fibra específicos o fibras oscuras.

III. INFORMACIÓN PLOAM EN GPON

El objetivo de la tesina es derivar información sobre la temperatura ambiental a partir de la información que pueda derivarse de la operación de la red FTTH para su función principal de transmisión de datos. Para ello se va a revisar brevemente los aspectos relacionados más relevantes del estándar más común en FTTH, GPON (G.984).

En una red de telecomunicaciones FTTH distribuida a lo largo de una ciudad, dimensionada para n clientes que pueden acceder a ella a través de los terminales colocados en los domicilios (denominados ONUs), en la cabecera de la red se encuentran interconectados y configurados los equipos activos (OLT, Core Routers) que hacen de interconexión con la red tronca. Para agregar clientes y gestionar la red, el estándar contempla un intercambio de información entre las ONU y la OLT. El formato utilizado son los mensajes PLOAM (Physical Layer Operations, Administration and Management) que predetermina la estructura de las tramas y transporta información en los canales descendente y ascendente, permiten administrar las características de los puertos PON y permiten gestionar de forma remota las ONUs.

III.1. CANAL DESCENDENTE O DOWNSTREAM

El tráfico descendente se difunde desde la OLT utilizando multiplexación por división de tiempo TDM, y, a través de la planta externa (ODN), atraviesa los splitters y hacia todas las ONUs. Si existe una configuración independiente del GEM Port, los datos son compartidos por todos los usuarios del mismo puerto PON, mientras que si la configuración es general todos los usuarios de la red FTTH comparten la información. Esta se discrimina utilizando el parámetro Alloc-ID, las tramas downstream se transmiten en el rango de longitud de onda 1480 – 1500 nm. Estas proporcionan el tiempo de referencia del puerto PON así como la señalización de control para upstream. Su funcionamiento es continuo así no exista tráfico de usuarios para mantener la sincronización [18].

Las tramas descendentes tienen longitud fija de 125 μ s formado por dos bloques como se muestra en la Figura 4, el PCBd o bloque de control físico descendente, contiene los datos necesarios para la sincronización y el bloque de carga útil.

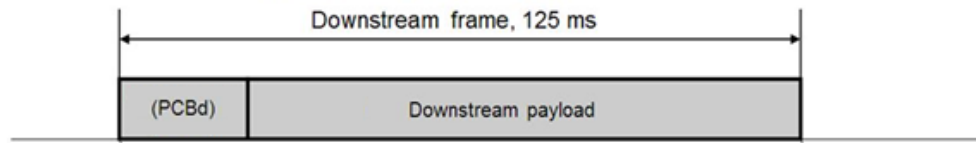


Fig.4: Trama descendente GTC.

El bloque PCBd contiene dos sub bloques, el encabezado de la trama GTC que delimitan las tramas, y BWmap que contiene información de asignación de ancho de banda y sincronización en upstream para garantizar el envío de datos evitando colisiones. En la Figura 5 se puede ver el diagrama completo del bloque PCBd.

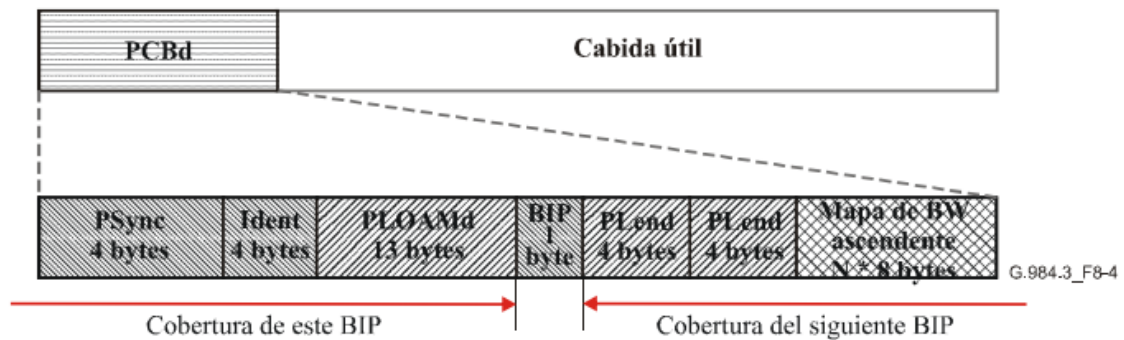


Fig.5. Bloque PCBd de la trama descendente GTC

El proceso de sincronización física se realiza mediante el preámbulo PSync. Es el campo de sincronización física, que delimita la trama PCBd. Es un campo de 32 bits con un patrón pre establecido.

El campo Ident es utilizado como identificador de supertramas por los sistemas de encriptación de los usuarios. Cada vez que recibe una trama se incrementa el valor, hasta llegar su valor máximo. En la siguiente trama su valor vuelve a cero. También provee de información sobre si se encuentra o no activado el FEC en sentido descendente.

En la cabecera hay un campo PLOAMd que transmite información necesaria para la gestión de la red PON. En concreto se encarga de mapear los mensajes de activación de las ONUs, lleva información de control como retardos de actualización, para realizar ajustes de potencia del laser, tamaño del preámbulo y cantidad de transmisiones por solicitud.

A continuación la cabecera tiene un campo BIP, que contiene la paridad entrelazada de bits, utilizado por el receptor para medir los errores en el enlace.

Por último, se encuentra la información para definir el mapa de ancho de banda que es la información necesaria para indicar a cada tipo de tráfico de cada ONU el slot temporal que tiene asignado para enviar tráfico de subida.

III.2. CANAL ASCENDENTE O UPSTREAM

La transmisión en sentido ascendente a diferencia de downstream se realiza en ráfagas y utiliza acceso múltiple por división de tiempo TDMA. Estas ráfagas se transmiten en el rango de longitudes de onda de 1290 – 1330 nm. Los datos de n ONUs diferentes se juntan en los splitters. Para evitar colisiones las ráfagas se envían en intervalos de tiempo gestionados por la OLT (a través del ranging protocol), según las políticas de asignación de ancho de banda DBA [18].

Al igual que las tramas descendentes tienen una duración de 125 μ s. Cada ráfaga contiene como mínimo la tara de la capa física ascendente PLOu, además del bloque de carga útil. También puede contener diversa información de gestión que se compartimenta en secciones de operación, gestión y administración de capa física ascendente PLOAMu, secuencia de nivelación de potencia PLSu o informe de ancho de banda dinámica DBRu. Las tramas tienen varias ráfagas de la misma o de diferentes ONUs, como se muestra en la Figura 6, gobernados por la OLT mediante el mapa de ancho de banda BWmap.

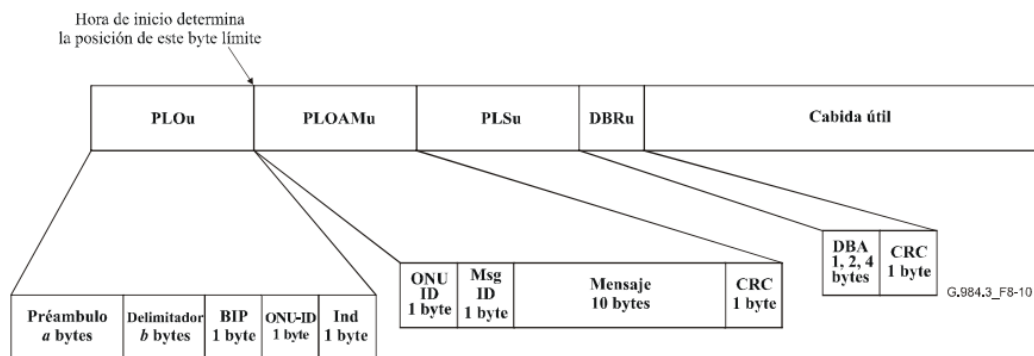


Fig.6. Trama ascendente GTC

Al igual que en bajada, se establece un canal en subida para transmitir información de gestión: PLOAMu es un campo de 13 bytes de duración, que se envían al inicio de cada ráfaga. Este campo transporta los mensajes de operación administración y mantenimiento de la capa física.

La cabecera también incluye la secuencia de nivelación de potencia ascendente PLSu. Este campo de 120 bytes de duración, permite ajustar los niveles de potencia de la fuente de luz de las ONUs, para reducir el margen dinámico óptico de recepción de la OLT. Esencialmente se realiza durante el proceso de activación de las ONUs pero también se puede realizar en operación si así lo requiere la OLT, caso contrario se desactiva para reducir la posibilidad de colisiones.

Finalmente la cabecera incluye un informe de ancho de banda dinámica que contiene información relacionada con el encapsulamiento T-CONT para determinar los intervalos de tiempo en función de DBA, informando del ancho de banda dinámico en upstream.

III.3. PROCESO DE ACTIVACIÓN DE UNA ONU

De los múltiples procesos que se producen en una red PON, el que más nos interesa es el proceso de activación.

Cuando una nueva ONU se agrega a red, cambiando su estado de inactiva a activa o se reinicia debido a algún motivo externo, se inicia una maquina de estado de sincronización que se muestra en la Figura 7, que describe el proceso de activación. Se pueden resumir en tres fases principales:

- 1) La fase de aprendizaje de parámetros operacionales embebidos en los mensajes PLOAMd.
- 2) La fase de adquisición de numero de serie del equipo dentro del proceso de activación, aquí la ONU recibe un identificar único, en el puerto PON. Una misma ONU puede estar registrada en uno o más puertos de la OLT.
- 3) La fase de determinación de rango para establecer la distancia física del dispositivo mediante el ranging protocol [19], El tiempo de ida y vuelta, RTT (Round Time Trip) es directamente proporcional al doble de la longitud de fibra existente entre los equipos activos (OLT - ONU). Para garantizar que todas las ONUs transmitan en el tiempo correcto para evitar colisiones que degradan el servicio la OLT asigna un retardo específico para cada ONU.

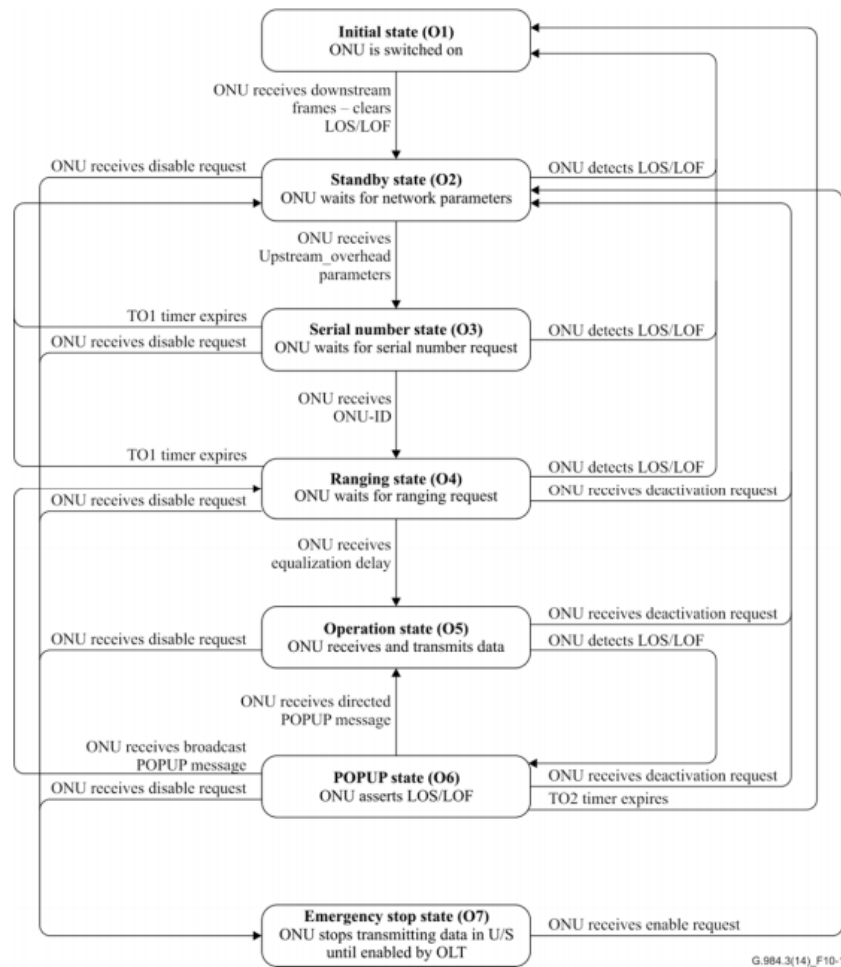


Fig.7. Máquina de estado del proceso de activación de una ONU [20]

Las ONUs nuevas tienen que esperar que la OLT difunda una ventana de tiempo sin transmisión ascendente denominada Hunt State para iniciar con el proceso de sincronización, cuyos estados se describen a continuación [20].

Estado O1 – Inicial: Al encender una ONU, ésta entra en estado LoS, esperando la señal descendente Hunt State para iniciar con el proceso de sincronización. Cuando encuentra la matriz PSync sin errores inicia un contador N que se incrementa con cada matriz PSync correcta que encuentre, y cambia a estado de pres sincronizado. Caso contrario regresa al estado Hunt. Si el contador N llega al valor recomendado ($N = 2$), la ONU entra en estado sincronizado, e inicia el procesador de datos del bloque PCBd. Si durante este proceso la ONU registra 5 matrices PSync con errores se considera que perdió la sincronización y regresa al estado Hunt eliminando todos los parámetros de la capa de convergencia de transmisión adquiridos hasta ese momento. Caso contrario se elimina la pérdida de trama LoF y el estado LoS avanzando al siguiente estado.

Estado O2 – Espera: Una vez alcanzada la sincronización descendente es necesario sincronizar en dirección ascendente. Para ello, la ONU recibe los parámetros de convergencia de transmisión

como el identificado ONU-ID, identificador de asignación Alloc-ID, retardo de ecualización y parámetros de cabecera de ráfaga. Con esta información, se configura y avanza al siguiente estado.

Estado O3 – Número de serie: La OLT solicita a todas las ONU difundir su número de serie. Para evitar colisiones con el tráfico en upstream la OLT crea un Hunt State de 250 μ s con un mapa de ancho de banda vacío. Las ONUs envían su número de serie con retardos aleatorios entre 0 y 48 μ s para evitar colisiones, la OLT recibe los números de serie y comprueba si existe el registro dentro del puerto, caso contrario regresa al estado O1, envía un AssignONU-ID con el identificador de la ONU y esta cambia al siguiente estado. Durante este proceso se inicia un temporizador TO1 para cancelar cualquier intento de activación fallido delimitando el tiempo que una ONU puede permanecer en este estado. El tiempo recomendado para TO1 es de 10 segundos. Una vez superado el temporizador, la ONU regresa al estado O2.

Estado O4 – Ranging: Las ráfagas de las todas las ONUs deben sincronizarse con los límites de la cabecera GTC ascendente. Para ello la OLT necesita conocer la distancia a la que se encuentra cada una de las ONUs dentro de la red dado que necesita que cada ONU inicie su ráfaga de subida de forma que llegue al tramo común sin que se produzcan colisiones con otras tramas. Esto es lo que se conoce como proceso de ranging. Para ello envía un Hunt State de 202 μ s de duración con solicitud de rango. La ONU responde con su número de serie. Al tiempo transcurrido entre la solicitud y la respuesta se le denomina RTT. Este se resta con el valor estándar según la configuración del Range Mode configurado en el puerto PON y se obtiene el tiempo de ecualización de cada ONU. Este se asigna mediante un mensaje de Ranging Time. La ONU guarda esta información, se configura con ella y pasa al siguiente estado.

Estado O5 – Operación: La ONU se encuentra configurada y lista para enviar datos o mensajes de operación y administración o cualquier operación de capa física que la OLT solicite. Una vez que todas las ONUs tienen asignado el tiempo de ecualización correcto, la OLT puede sincronizar todas las ráfagas ascendentes.

Estado O6 – POPUP: Cuando una ONU detecta pérdida de señal LoS o tramas mal ensambladas LoF, se corta el envío de información ascendente de esta ONU específica e intenta recuperar la señal óptica. Para recuperar la sincronización y eliminar la alarma LoS o LoF, si se consigue antes que el temporizador TO2 caduque (100 ms) la ONU regresa al estado de operación o de ser necesario al estado O4 según lo indiquen los mensajes POPUP, Si no se puede recuperar la señal óptica o restaurar la sincronización de trama la ONU regresa al estado inicial.

Estado O7 – Parada de emergencia: La OLT puede activar o desactivar las ONUs a través de mensajes de Disable/Enable de un número de serie específico. Cuando una ONU recibe este mensaje desactiva el láser en espera de recibir un mensaje de activación por parte de la OLT. De ser el caso, descarta los parámetros anteriores y regresa al estado de espera para recibir los nuevos parámetros de configuración.

Los valores obtenidos en el ranging se van actualizando cuando se superan unos umbrales, DOWi y TIWi, [20, p74]. Este proceso de actualización puede ser forzado para obtener medidas de temperatura sin necesidad de activar y desactivar la ONU, y por tanto, sin afectar a la provisión del servicio.

III.4. EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS MENSAJES PLOAM

El PLOAM es un canal que se habilita en las tramas de convergencia de transmisión GPON, para el envío de mensajes de control entre la OLT y las ONUs. Proporciona funciones de administración como activación de ONUs, establecimiento del canal de control y gestión de las ONU, configuraciones de cifrado, señalización de alarmas y gestión de claves.

Como se muestra en la Figura 8, la estructura genérica del campo PLOAM es de 13 bytes conformado por octetos. Dentro de la cabecera de las tramas GTC estos campos se transmiten de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha [21]:

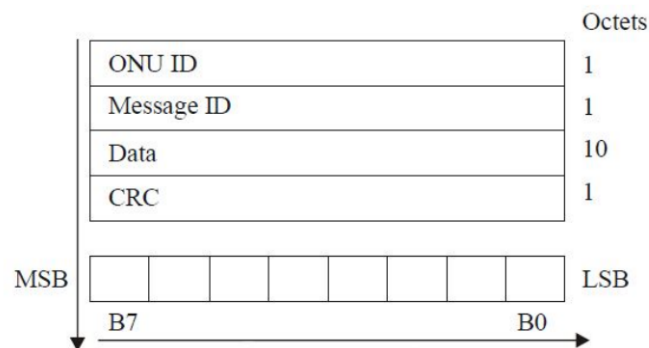


Fig.8. Estructura mensaje PLOAM

Los distintos campos son:

- ONU ID: Durante el estado rango la OLT asigna un identificador numérico único para cada ONU dentro del mismo puerto PON, tienen un valor entre 1 y 253, este valor se mantienen desde su asignación hasta que se desactiva la ONU.
- Message ID: Identifica el tipo de mensaje.
- Data: Es el campo mas grande con 10 bytes, lleva la carga útil de los mensajes GTC.
- CRC: O campo de verificación, lleva la secuencia de verificación de la trama, cuando CRC tiene error se descarta todo el mensaje en el receptor.

El proceso de activación de una ONU que se enciende y pasa desde su estado inicial al estado de operación es bastante rápido. Como ya se ha visto las tramas en sentido descendente y ascendente tiene una duración de 125 μ s por lo que todo el proceso dura unas décimas de segundos. Todos los mensajes PLOAM tienen una volatilidad en el rango de los microsegundos. Según la teoría varios de estos datos se guardan en los parámetros de configuración de los equipos activos.

IV. ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA BASADA EN PLOAM

En vez de seguir la aproximación descrita brevemente en la sección II para la medida de la temperatura que se basa en efectos de scattering para determinar la evolución temporal de la temperatura a lo largo de la fibra con interrogadores específicos, el objetivo de la tesina es estudiar los cambios de temperatura ambiental a partir de la información PLOAM. Por tanto el mecanismo físico es distinto. Aquí se pretende determinar la temperatura media del enlace de fibra a partir de la variación del índice de refracción inducido por los cambios de temperatura, $\frac{dn}{dT}$. Esta dependencia viene dada principalmente por el coeficiente termoóptico de la fibra que es un orden de magnitud mayor que el término debido a la expansión térmica. La dependencia de la temperatura del índice de refracción del dióxido de silicio se ha estudiado en muchas investigaciones, por ejemplo [16]-[22], diversos estudios han demostrado de forma experimental que en general la dependencia del índice con la temperatura es pequeña, típicamente, para sílice fundido es del orden de $\frac{dn}{dT} \approx 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ considerando la fibra óptica como un elemento amorfo compuesta por moléculas no lineales se puede obtener como primera aproximación la ecuación (1) que describe la relación de la temperatura con el índice de refracción de una fibra óptica de dióxido de silicio válido para temperaturas inferiores a 1200 grados kelvin.

$$n \approx n_{refraccion} + 7.0978 \cdot 10^{-6} T \quad (1)$$

En realidad, el comportamiento no es exactamente lineal, sino que viene afectado por términos adicionales pero que para nuestros rangos de variación de temperatura no son relevantes [23]. Además, la dispersión cromática también se ve ligeramente afectada por las variaciones de temperatura [24] pero igualmente los cambios no son relevantes para el escenario considerado en esta tesina.

Para extraer la información de temperatura a partir de la información de PLOAM se realizará un estudio teórico y experimental usando una red comercial activa basada en el estándar G.984 GPON y desplegada en la zona centro norte de Esmeraldas – Ecuador. La red sigue un esquema como se ve en la Figura 9. Los equipos activos ubicados en la cabecera de red son dos enrutadores de marca MIKROTIK, y una OLT de ZTE C320. Toda la planta externa está distribuida de forma aérea sobre los postes de la red eléctrica, donde también se encuentran las cajas de distribución (NAPs). La red cuenta con dos niveles de splitters, el primero de 1:4, el segundo de 1:16. Cada puerto PON brinda servicio a un máximo de 64 clientes. La red de acceso también está distribuida con fibra óptica para finalizar en los domicilios de los usuarios con una ONU con capacidad Wifi. Es una red relativamente nueva con no más de 2 años de operación dentro de la ciudad. Como es habitual, está sectorizada, por ende, no se tiene longitudes grandes entre OLT y ONU con distancias máximas que no superan los 4 Km.

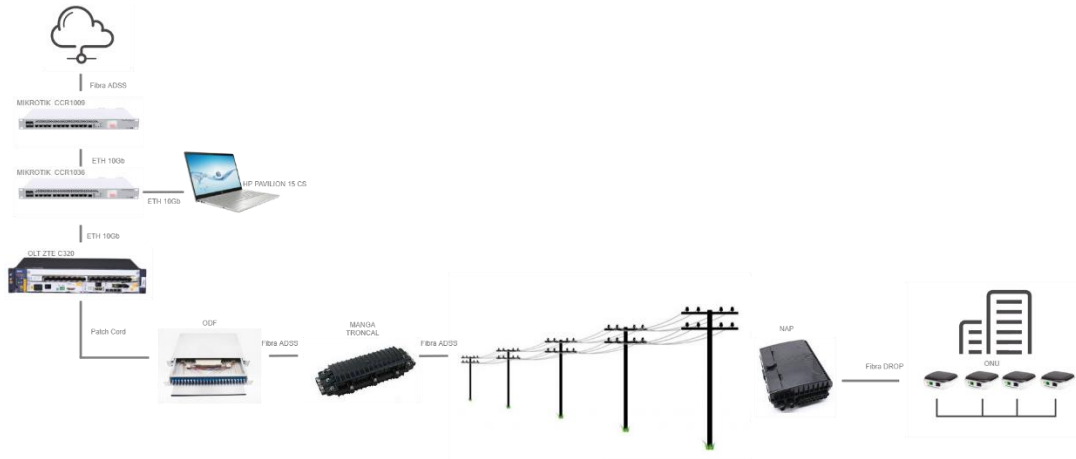


Fig.9. Esquema de red G.984 desplegado y activo.

Como se ha comentado en el canal ascendente, el estándar G.984 utiliza tecnología TDMA para la asignación de recursos entre todos los usuarios del mismo puerto PON. Para ello es necesario determinar el tiempo exacto en el que cada ONU puede iniciar la transmisión de su ráfaga. Para determinar este tiempo la OLT se vale del protocolo de Rango durante el proceso de activación de las ONUs, determinando la distancia física y asignándole una distancia virtual individual. Figura 10, para que las señales de cada ONU lleguen en diferentes momentos y no se superpongan.

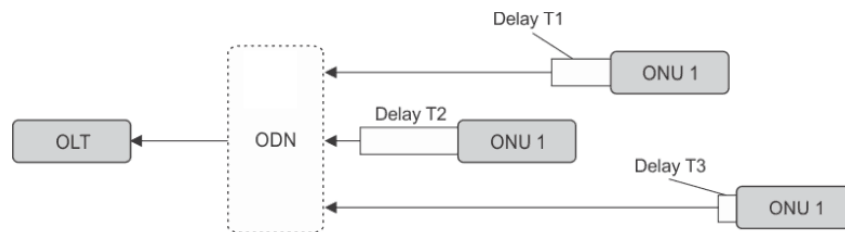


Fig.10. Asignación retardo entre las diferentes ONUs

El protocolo de rango se ejecuta en el estado O4 mediante comandos del sistema operativo de la OLT. Cuando una o varias ONUs han llegado hasta este estado durante su proceso de activación. Para ello la OLT pone a disposición de forma periódica las ventanas de rango y con los mensajes PLOAM se solicita a una ONU específica un Ranging Request. Esta responde con un Ranging Time[19]. Como se indica en la Figura 11. La duración de la ventana de rango es:

$$Range_Mode * \frac{2}{\frac{300000 \text{ Km/s}}{n}} + 2\mu\text{s} \quad (2)$$

El range mode es un valor específico que viene preconfigurado por defecto en los parámetros de inicio de la OLT¹ como se muestra en la Tabla 1. Los 2 μs se añaden como tiempo de guarda para tomar en cuenta el tiempo de respuesta de la ONU.

¹ En el caso de esta tesina se trata de una OLT ZTE modelo C320

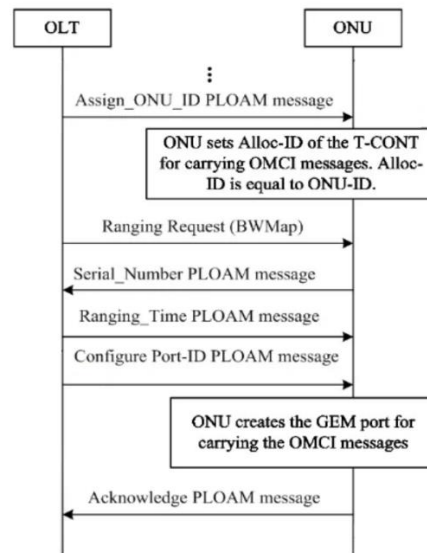


Fig.11. Proceso de adquisición de rango

PARAMETROS	DESCRIPCIÓN	VALOR
Mode0	Distancia de alcance	0 – 20 Km
Mode1	Distancia de alcance	20 – 40 Km
Mode2	Distancia de alcance	40 – 60 Km

Tabla 1: Modos de configuración de rango para OLT ZTE

Es posible verificar la configuración de la OLT en cuanto al alcance. Para ello en el entorno de configuración, logueado como administrador, introduciendo el comando `show gpon olt config gpon-olt_1/1/Port` se muestra la información del puerto PON, como se muestra en la Figura 12.

```

OLT1#show gpon olt config gpon-olt_1/1/10
gpon-olt_1/1/10 Name:OLT-10
  MaxSupportOntS :128                MaxSupportTcontS :4096
  RealLegalOntS  :30                 RealIllegalOntS   :0
  Discovering onu:10                 Missing onu       :5
  Range mode(100m): 0 - 200
  Uncfg onu aging time(s): 300
  Auto learn:disable
  SCB port:4095
  FEC:none
  Resource ID assign mode:model
OLT1#
OLT1#
    
```

Fig.12. Información del puerto PON numero 10 OLT ZTE C320

Para la tesina, un dato indispensable para poder desarrollar esta investigación es el tiempo de ida y vuelta de las tramas, RTT. En el entorno GPON, no se trabaja directamente sobre este parámetro, sino que se emplea el EqD (retardo de ecualización). Este parámetro se refiere al retardo que asigna

la OLT a cada ONU individual como resultado del proceso de ranging Este tiempo queda guardado en la configuración de la ONU con su relación con la configuración de rango del puerto PON y se puede observar con el comando que se muestra en la Figura 13.

```

OLT1#configure terminal
Enter configuration commands, one per line. End with CTRL/Z.
OLT1(config)#show gpon onu distance gpon-onu_1/1/13:2
      Eqd (bit)          Distance(m)
.....
221831                  3515          OLT1(config)#
OLT1(config)#

```

Fig.13. Línea de comando para visualizar la distancia ente la OLT ZTE C320 y una ONU

IV.1. ESTIMACIÓN TEÓRICA DEL RTT.

EL Round Trip Time es la suma de los retardos que existen entre el envío de un Ranging Request, hasta la recepción de un Ranging Time en la OLT. Incluye varios factores. Se inicia con el retardo de propagación RTD (Round Trip Delay) en downstream. La ONU recibe el mensaje lo procesa y contesta la solicitud. El tiempo empleado en estas acciones se denomina ONU_Response_Time y depende de factores como marca, modelo y compatibilidad. Este retardo se puede visualizar mediante comandos de consola en el ambiente de administración de la OLT como se muestra en la Figura 11. Por último se toma en cuenta el retardo de propagación en upstream, Llos tiempo de guarda y retardos aleatorios no se consideran durante el proceso de rango.

El retardo de propagación en downstream y upstream cambia ligeramente en su valor ya que esta ligado directamente al índice de refracción con respecto a la longitud de onda, Con el fin de calcular el RTT lo mas preciso posibles se calcula con los valores especificados por el fabricante en la longitud de onda en los canales downstream/upstream [25].

$$RTD = 2 \frac{L}{c} \quad (3)$$

Donde L representa la longitud de fibra, c la velocidad de la luz y n el índice de refracción de la fibra óptica. Descomponiendo la formula en los canales de descendente y ascendente para tener en cuenta la dispersión cromática tenemos que:

$$RTD = L \frac{n_{1490}}{c} + L \frac{n_{1310}}{c} \quad (4)$$

Si al retardo de propagación agregamos el tiempo de respuesta de la ONU, ONURspntime, que es un parámetro que puede obtener la OLT via OMCC y por tanto al que puede accederse (como se muestra en la Figura 15). Según el estándar G.984.3 [20, p. 75], este parámetro debe tener un valor de $35 \pm 1 \mu s$. A partir de esta información podemos obtener:

$$RTT = RTD + ONURspnTime \quad (5)$$

$$RTT = L \frac{n_{1490}}{c} + L \frac{n_{1310}}{c} + ONURspnTime \quad (6)$$

Incluyendo la dependencia con la temperatura, puede obtenerse que la temperatura puede obtenerse a partir de la medida del RTT como:

$$T = \frac{(RTT \cdot c - Ln_{1490} + Ln_{1310} + ONURspnTime \cdot c)}{2} \cdot \frac{1}{L} \quad (7)$$

Como ejemplo, se puede representar el caso para una fibra de 10 Km con una variación de entre 20 y 100 °C

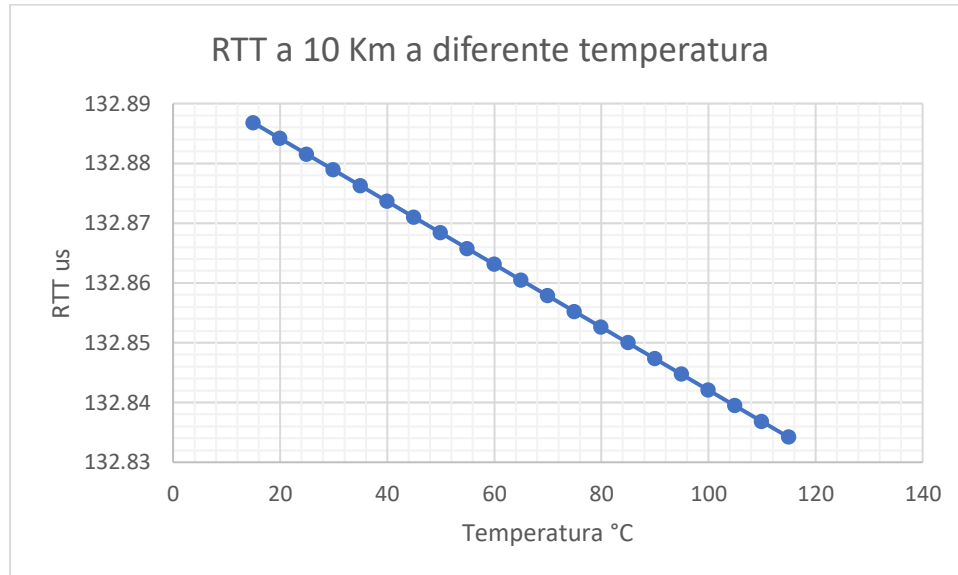


Fig.14. Gráfica de variación del RTT con respecto a la temperatura en una fibra de 10 Km.

IV.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA A PARTIR DEL EqD

Como se ha descrito anteriormente la temperatura tiene una relación lineal con el índice de refracción, causando un cambio en el retardo de la luz que recorre la fibra. Este retardo es utilizado en el cálculo de la distancia física y, por tanto, en el cálculo que realiza la OLT del retardo de ecualización EqD [20], [26].

$$EqD = T_{eqd} - RTT \quad (8)$$

donde T_{eqd} es el retardo de ecualización de distancia cero (zero-distance equalization delay) y depende de la configuración máxima del valor RTD en el puerto PON por ejemplo, para la configuración máxima según el range mode de 20 Km T_{eqd} es unos 200 μ s.

Durante el proceso de activación de una ONU en el estado O4 al pasar al estado de operación O5 se realiza el cálculo del rango que se ve afectado por el efecto de la temperatura sobre el índice de refracción. Podemos acceder a estos introduciendo los parámetros de temperatura en el cálculo del RTD, despejamos el RTT del retardo de ecualización para poder aproximar la temperatura ambiente del cable en el momento de activación de una ONU.

$$RTD = L \frac{n_{1490} + 7.0978 \cdot 10^{-6} T}{c} + L \frac{n_{1310} + 7.0978 \cdot 10^{-6} T}{c} \quad (9)$$

$$RTT = Teqd - EqD \quad (10)$$

Estas estimaciones incluyen distintas fuentes de error. Los cálculos se basan en estimaciones de los índices de refracción de la fibra. Se han considerado valores representativos de las fibras que se despliegan habitualmente pero que, sin embargo, como se indica en [20, Anexo VII], presenta cierta variabilidad debida a diferencias de fabricación, así como por la deriva en longitud de onda de las fuentes empleadas que no emplean estabilización para reducir su coste. Esta variabilidad de los índices se traduce en un error en la medida de retardo que típicamente es menor que $\pm 0.000017 \cdot RTT$ [20].

IV.3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Esta relación entre la temperatura y el índice de refracción nos permite caracterizar los cambios los cambios en el ambiente en el que esta desplegado la fibra. Como hemos visto, los datos necesarios para realizar el proceso de activación de una ONU, incluyen la medida del retardo. Estos datos se transmiten en sentido ascendente y descendente mediante los mensajes PLOAM y se guardan en los parámetros de configuración de los puertos PON y de cada ONU activa y con permiso de transmisión. Las Figuras 15-17 muestran los datos a los que se tiene acceso desde una OLT GPON, en concreto un modelo ZTE C320. Estos parámetros son visibles dentro del ambiente de configuración de la OLT, utilizando telnet y con un usuario y contraseña de administrador se puede acceder a esta información con los comandos adecuados.

```
OLT1#show gpon remote-onu interface pon gpon-onu_1/1/13:2
Interface:                pon_0/1
GEM-blocklen:             48 (bytes)
Sf-threshold:             5
Sd-threshold:             9
Alarm:                    enable
AlarmDisableInterval:    0
TotalTcontNum:           8
PiggybackDbasRptMode:    mode0 only
WholeOnuDbasRptMode:     not support
RxOpticalLevel:          -16.402 (dBm)
LowerRxOpticalThreshold: ont internal policy
UpperRxOpticalThreshold: ont internal policy
TxOpticalLevel:          2.110 (dBm)
LowerTxOpticalThreshold: ont internal policy
UpperTxOpticalThreshold: ont internal policy
Onu response time:       35999 (ns)
Power feed voltage:      3.30 (V)
Lower voltage threshold: 0.00 (V)
Upper voltage threshold: 6.56 (V)
Laser bias current:      15.240 (mA)
Lower bias current threshold:0.000 (mA)
Upper bias current threshold:131.000 (mA)
Temperature:             43.039 (C)
Lower temperature threshold: -127.000 (C)
Upper temperature threshold: 127.000 (C)
OLT1#
```

Fig.15. Línea de comando para visualizar las propiedades del puerto virtual PON asignado a una ONU específica

```
OLT1#show gpon onu detail-info gpon-onu_1/1/13:2
ONU interface:          gpon-onu_1/1/13:2
  Name:                 ONU-13:2
  Type:                 ZTE-F625
  State:                ready
  Admin state:         enable
  Phase state:         working
  Authentication mode: sn
  SN Bind:              enable with SN check
  Serial number:       CDKT2AB08048
  Password:
  Device ID:
  Description:         ONU-13:2
  Vport mode:          gempport
  DBA Mode:            Hybrid
  ONU Status:          enable
  OMCI BW Profile:    enable
  Line Profile:        N/A
  Service Profile:    N/A
  Alarm Profile:       N/A
  Performance Profile: N/A
  ONU Distance:        3515m
  Online Duration:     164h 35m 15s
  FEC:                 none
  1PPS+ToD:           disable
```

Fig.16. Línea de comando para visualizar la información detallada de una ONU

```
OLT1#
OLT1#show gpon onu distance gpon-onu_1/1/13:2
  Eqd (bit)          Distance (m)
.....
221831              3515          OLT1#
OLT1#
```

Fig.17. Línea de comando para visualizar la distancia física y el valor de ecualización asignado a una ONU

Como referencia teórica se ha simulado en Matlab la estimación del rango considerando las especificaciones del estándar G.984 e introduciendo los parámetros reales de las especificaciones del fabricante en cuanto a los índices de refracción en las longitudes de onda de downstream y upstream, el tiempo de respuesta que se obtiene a través de comandos, el retardo pre establecido con el range mode configurado en la OLT ZTE C320 así como, la dispersión cromática proporcionada por el fabricante. Con este modelo de OLT junto con distintas longitudes de fibra estándar G.657 A1 (marca Life Fiber) se han realizado las pruebas experimentales en las que se ha cambiado de forma controlada la temperatura para distancias conocidas.

Dadas estas estimaciones se han hecho pruebas experimentales con distancias de entre 2 y 3 km. Las pruebas experimentales han consistido en realizar el proceso de activación para tomar datos

iniciales, elevar la temperatura de forma manual y volver a hacer el proceso de activación a diferentes temperaturas e ir tomando los datos mediante comandos que utilizan el canal PLOAM.

Para comprobar la adquisición correcta de los datos por parte de OLT, se instala un escenario de prueba como se muestra en la Figura 18, que cuenta con dos niveles de splitters con el objetivo de reducir la potencia de salida del puerto PON que tiene instalado un modulo SFP clase C+ que entrega 6 dBm de potencia de transmisión. Generalmente las redes GPON cuentan con 2 niveles de splitters en planta externa. Además las ONUs con las que se cuenta para realizar las pruebas experimentales tiene una sensibilidad óptica de -8 dBm que son las mismas que se encuentran instaladas y operativas en los domicilios de los usuarios de la red.

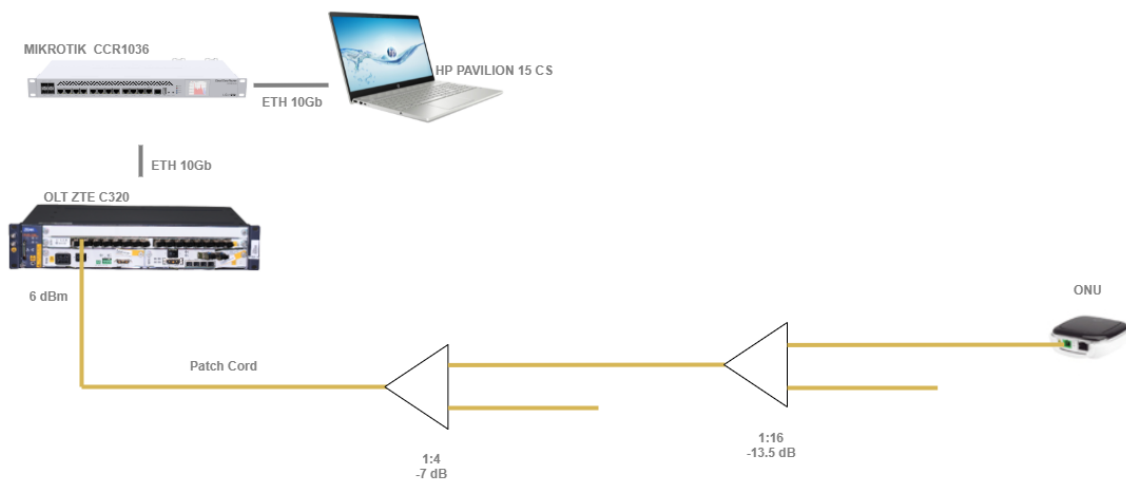


Fig.18. Escenario de prueba

Un primer experimento se ha centrado en comprobar la sensibilidad del sistema para determinar la distancia (o retardo) entre los equipos activos que es capaz de reconocer la OLT.

Para ello sobre el escenario de prueba se ha instalado un rollo de fibra de 2940 m de fibra óptica G.657 A1 entre OLT y ONU, a temperatura ambiente en el momento de las pruebas, 27 °C. En estas condiciones se fuerza el proceso de ranging activando y desactivando la ONU de prueba (ZTE F601) y se repite el proceso 20 veces para determinar la sensibilidad del OLT en la medidad del retardo, obteniéndose los datos que se muestran la Tabla 2, donde puede verse que hay variaciones en el bit menos significativo, las pruebas de laboratorio se realiza utilizando fibra óptica G.657.

	EqD bits	EqD μs		EqD bits	EqD μs
1	229455	136.5395	11	229453	136.5383
2	229456	136.5401	12	229452	136.5377
3	229450	136.5365	13	229455	136.5395
4	229454	136.5389	14	229455	136.5395
5	229454	136.5389	15	229454	136.5389
6	229454	136.5389	16	229455	136.5395
7	229454	136.5389	17	229454	136.5389
8	229455	136.5395	18	229455	136.5395

9	229455	136.5395	19	229456	136.5401
10	229455	136.5395	20	229456	136.5401

Tabla 2: Muestras de laboratorio para cálculo del error

La medida media en bits es 229454 ± 1 bit. El retardo correspondería con $136.53910 \pm 0.0006 \mu\text{s}$ mientras que el valor teórico es 136.5294. El error debido a la variabilidad del índice de refracción para este caso, resultaría en un error de $\pm 0.0011 \mu\text{s}$. El error más significativo parece ser por tanto el de carácter instrumental.

En el análisis experimental para someter el cable a cambios de temperatura se introduce totalmente en un recipiente que se llena con agua caliente.

Para monitorizar la temperatura a la que se encuentra expuesto el cable de fibra óptica se introduce en el recipiente un termómetro digital con rango de medición entre -50 y 300 grados centígrados, con precisión de 1 grado. Para forzar el rango hay que activar y desactivar la ONU antes de cada medida. Las pruebas experimentales se realizaron en el lugar donde se encuentra instalado la cabecera de la red GPON.

Los datos a los que se tiene acceso a través de comandos de consola desde el ambiente de configuración de la OLT que son representativos para este análisis experimental del efecto producido por la temperatura sobre el índice de refracción son: el retardo de ecualización EqD expresado en bits, asignado a una ONU durante el proceso de activación durante el estado Rango, y la distancia física calcula por la OLT que existe entre si y la ONU expresada en metros.

A continuación se han realizado pruebas con distintos modelos de ONU como se recoge en la Tabla 3. Se observa los resultados los resultados absolutos cambian dependiendo del modelo concreto, si bien, los relativos en los dos modelos de la misma marca que la OLT si que siguen bien el incremento de longitud física. El error en el tercer caso puede deberse a problemas de compatibilidad entre equipos en cuanto a errores en el índice de refracción entre cada uno de ellos.

	ONU ZTE F601	ONU ZTE F670L	ONU KINGTYPE GPNF11C
Longitud física	Distancia calculada	Distancia calculada	Distancia calculada
OLT/ONU			
10m	N/A	10	22
11m	1m	11	23
11.5m	2m	12	24
12m	2m	12	25
13m	3m	13	26
14m	4m	14	27

Tabla 3: Resultados experimentales para comprobar la resolución de la OLT ZTE C320

Tras estas pruebas de sensibilidad, se ha procedido a hacer una estimación de temperatura. Modificando el cálculo utilizado para la simulación del RTT, para hacer la conversión de bits a micro segundos y utilizando la ecuación de EqD se obtiene el valor del RTT exacto registrado por la OLT en el momento de la activación de la ONU, si contrastamos este valor con el registrado a la temperatura ambiente se puede comprobar el efecto producida por esta en el índice de refracción de un cable de fibra óptica G.657.

El índice de refracción de un cable de fibra óptica es directamente proporcional a la temperatura a la que se expone, como se puede observar en la Figura 19. Comparando estos datos con los obtenidos a través de los cálculos matemáticos, los resultados son similares. En los dos conjuntos de datos existe una variación en el RTT que es apreciable en intervalos de 20 °C. Tomando en cuenta los valores del RTT se puede observar que el efecto que introduce la temperatura en el índice de refracción de una fibra óptica que se encuentra activa dentro de una red GPON se encuentra en el rango de los nano segundos.

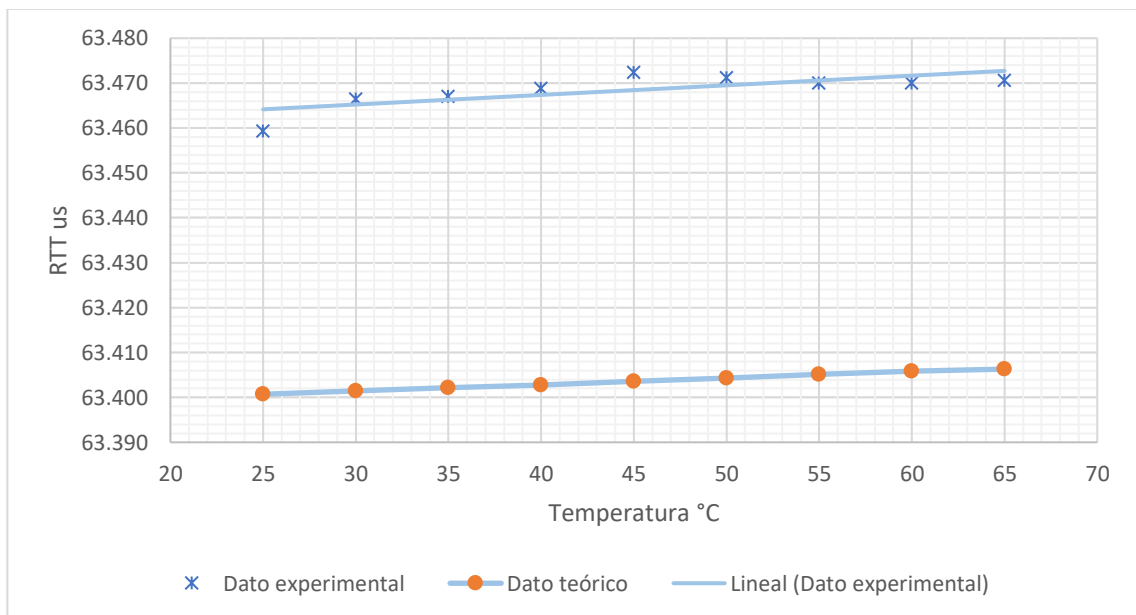


Fig.19. Gráfica de variación del RTT con respecto a la temperatura

Las medidas experimentales coinciden razonablemente con las estimaciones teóricas y permiten comprobar que una red GPON se puede utilizar como una gran sensor, cuya resolución es directamente proporcional con la distancia que existe entre los elementos activos de la red. Si bien una red GPON FTTH para una distancia de unos 3000m de fibra óptica entre OLT y ONU la resolución de temperatura estaría en unos 20 grados centígrados.

IV.4. ESTIMACIÓN MAPA DE TEMPERATURAS.

Considerando el efecto de la temperatura en el RTT de un cable de fibra óptica caracterizado en el apartado anterior, es plausible detectar cambios en la temperatura del ambiente en el cual se encuentra distribuida la planta externa de una red GPON FTTH, analizando los parámetros de rango que se guardaron en las ONUs en el momento de su activación.

La red GPON FTTH en la que se realizaron las pruebas experimentales es pequeña y centralizada en un sector específico de la ciudad de Esmeraldas. Los usuarios se encuentran distribuidos en longitudes desde cientos de metros hasta un poco más de 3 Km. Como está descrito en el apartado anterior es necesario que exista más de 2 Km de fibra óptica entre los equipos activos para poder detectar cambios en la temperatura ambiente.

Con el objetivo de notar si existe diferencia en el RTT de las ONUs de prueba se tomaron muestras durante la temperatura más baja de la ciudad que se produce en horas de la madrugada (entre las 03:00 y 04:00 am) contrastadas con muestras tomadas durante las horas de mayor temperatura (entre las 01:00 y 2:00 pm), los resultados se muestran en la Tabla 4.

	Temperatura ambiente °C	Distancia registrada en la OLT m	Eqd (bit)	RTT μ s
Usuario 1	25	3515	221837	67.994
	28	3515	221834	67.995
Usuario 2	25	2885	229675	63.330
	28	2885	229674	63.330
Usuario 3	25	3128	226643	65.134
	28	3128	226639	65.136
Usuario 4	25	2977	228537	64.007
	28	2977	228532	64.010

Tabla 4: Datos registrados por la OLT con usuarios activos

Los datos muestreados son de usuarios activos que tienen tráfico en sentido descendente y ascendente, se puede observar que existe un pequeño cambio en los datos obtenidos del RTT que varían entre 0 y 3 nano segundos, debido a la resolución tan baja de sensado que nos permite hacer una red GPON, el efecto que produce tres grados centígrados sobre longitud de fibra entre un poco superiores a los 3 Km no es apreciable, como se puede observar en el apartado anterior los cambios de temperatura para distancias similares a los 3Km son perceptibles para cambios de aproximadamente 20 °C.

IV.5. ESCENARIOS DE POSIBLES APLICACIONES

Debido a la resolución que con la que podemos sensar utilizando una red GPON FTTH las posibles aplicaciones se limitan a aquellas con cambios de temperatura bastante grandes. No es posible determinar diferencias de temperatura entre varios sectores de la ciudad ya estas diferencias son mucho menores a 20 grados centígrados. Sin embargo puede servir para detectar incendios en líneas

eléctricas. La estructura física donde se monta la red de fibra óptica en el caso de Ecuador es en su mayoría propiedad de la Corporación Nacional de Electricidad, CNEL EP, que tiene instaladas líneas de tensión baja y media, con voltajes monofásicos 120V, bifásicos de 220V, con transformadores aéreos. Estos cuando reciben descargas muy altas llegan a provocar incendios que se propagan sobre las redes de telecomunicaciones. De esta forma se puede comprobar la afectación a través de la extracción de información de sensado mediante PLOAM.

Asimismo, en entornos industriales donde se desea monitorizar maquinaria y donde tal vez no la información distribuida no es tan importante se podrían sustituir los interrogadores basados en efectos no lineales por equipos de muy bajo coste PON.

IV.6. LÍNEAS A FUTURO

La tecnología avanza en escalas logarítmicas, para satisfacer las necesidades de los consumidores de los servicios tecnológicos. El consumo de ancho de banda se incrementa con las aplicaciones que se desarrollan todos los días, obligando a las empresas que prestan estos servicios a buscar soluciones que permitan satisfacer la creciente demanda de ancho de banda.

Esta presión hace que haya una evolución continua en los estándares de la red de acceso que proporcionan velocidades cada vez más altas. Estándares como XGPON, XGS-PON, G.9804, IEEE 802.3ca, etc ofrecen equipos con cada vez menor tiempo de bit lo que se traduce en mejoras en la resolución del RTT y por tanto de la estimación de temperatura.

El estándar G.9807 (XGS-PON) tiene un bit rate simétrico en downstream y upstream de 10Gbits/s, [27] es decir 4 veces mas rápido que el estándar G.984 GPON. Por tanto permitiría mejorar la resolución de sensado. Además se incrementa la distancia máxima entre OLT y ONU. En teoría se podría llevar un registro de la temperatura ambiente de una ciudad de forma periódica con datos reales y sin coste adicional. Estos datos pueden ser valiosos en estudios sobre cambio climático, predicciones de clima, combinar datos como con incremento de contaminación en las ciudad y su efectos sobre la temperatura ambiente de una ciudad o cualquier otra utilidad que se pueda derivar de esta información.

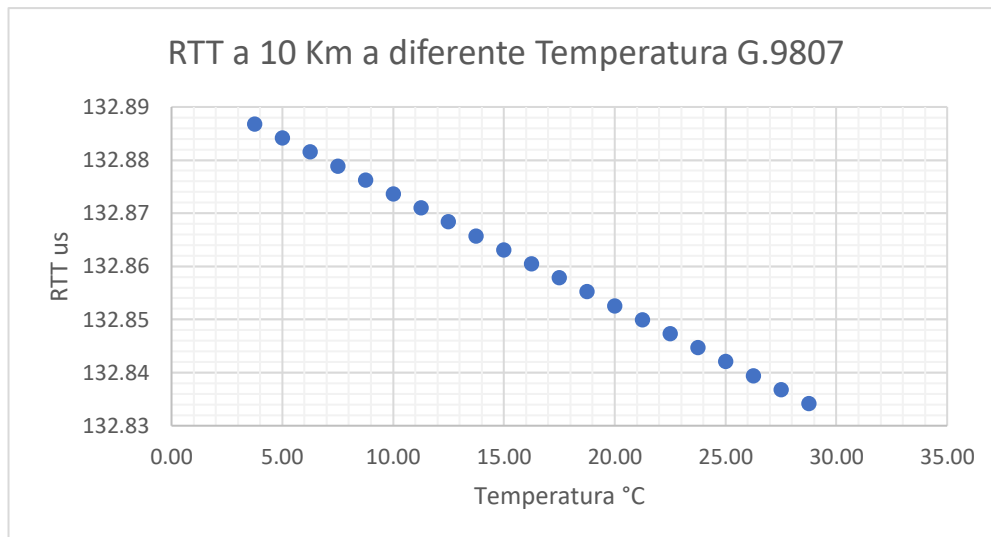


Fig.20. Gráfica de variación del RTT con respecto a la temperatura (Análisis matemático) G.9807

V. CONCLUSIONES

En esta tesina se ha estudiado el potencial de usar la información PLOAM de una red GPON para hacer estimaciones de temperatura.

Los cálculos teóricos y la validación experimental han mostrado que la resolución no es lo suficientemente buena como para considerar que ahora mismo se puede obtener la temperatura ambiente de una ciudad mediante la información que se extrae con los mensajes PLOAM de una red GPON, pero si que se puede medir cambios brusco de temperatura en el rango de varias decenas de grados lo que puede tener su aplicación en entornos industriales o para la detección precoz de incendios.

Para avanzar en la implementación práctica del concepto presentado en esta tesina se considera que se deben avanzar en dos aspectos. Por una parte, es imprescindible realizar cambios pequeños en el sistema operativo de las OLT que permitan obtener datos de rango de una o varias ONUs sin tener que recurrir a desactivar y activarlas para que realicen el proceso completo de activación y de ese modo acceder a los datos del efecto de la temperatura sobre el índice de refracción. También sería importante guardar la información del RTT en los parámetros de configuración de las ONUs y no solo el retardo de ecualización. Por otra parte, los resultados apuntan a que se obtendrían mejores resultados usando los nuevos estándares como G.9807 o G.9804, que al operar a mayor velocidad ofrecen mejor medida del RTT.

Debe tenerse en cuenta que la información obtenida con la aproximación propuesta en esta tesina es de coste cero. No es necesario añadir ningún tipo de hardware y apenas realizar pequeñas modificaciones que apenas afectarían a la tasa binaria experimentada por los usuarios para poder obtener información adicional de las ciudades que podría redundar en una mejor monitorización de las condiciones ambientales y sus variaciones así como implementar un posible sistema automático de predicción de incendios.

REFERENCIAS

- [1] Skolnik and M. I., “Introduction to radar systems /2nd edition/,” *mgh*, 1980, Accessed: Sep. 02, 2022. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980mgh..book.....S/abstract>.
- [2] “Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition - James B. Campbell, Randolph H. Wynne - Google Libros.” https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=NkLmDjSS8TsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Introduction+to+Remote+Sensing+Ed.+Guilford+Press,+2011.&ots=s2Kmv5k_1A&sig=VCgXg_x3yWLSz8-fqBDo_tqm6uo#v=onepage&q=Introduction+to+Remote+Sensing+Ed.+Guilford+Press%2C+2011.&f=false (accessed Sep. 02, 2022).
- [3] A. F. Castro, M. Valcuende, and B. Vidal, “Using microwave near-field reflection measurements as a non-destructive test to determine water penetration depth of concrete,” *NDT E Int.*, vol. 75, pp. 26–32, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.NDTEINT.2015.06.003.
- [4] A. Bockelt, J. Palaci Lopez, and B. Vidal, “All-Fiber Centralized Architecture for Parallel Terahertz Sensors,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 137–144, Jan. 2015, doi: 10.1109/TTHZ.2014.2373313.
- [5] T. Wild, V. Braun, and H. Viswanathan, “Joint Design of Communication and Sensing for beyond 5G and 6G Systems,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 30845–30857, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059488.
- [6] C. Chaccour, M. N. Soorki, W. Saad, M. Bennis, P. Popovski, and M. Debbah, “Seven Defining Features of Terahertz (THz) Wireless Systems: A Fellowship of Communication and Sensing,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 967–993, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3143454.
- [7] C. Paoloni *et al.*, “Sub-THz components for high capacity point to multipoint wireless networks,” *Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, IRMMW-THz*, vol. 2019-September, Sep. 2019, doi: 10.1109/IRMMW-THZ.2019.8874311.
- [8] C. Paoloni *et al.*, “D-band point to multi-point deployment with G-band transport,” *2020 Eur. Conf. Networks Commun. EuCNC 2020*, pp. 84–88, Jun. 2020, doi: 10.1109/EUCNC48522.2020.9200959.
- [9] P. Lu *et al.*, “Distributed optical fiber sensing: Review and perspective,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 6, no. 4, p. 041302, Oct. 2019, doi: 10.1063/1.5113955.
- [10] Z. Zhan *et al.*, “Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables,” *Science (80-.)*, vol. 371, no. 6532, pp. 931–936, Feb. 2021, doi: 10.1126/SCIENCE.ABE6648/SUPPL_FILE/ABE6648_ZHAN_SM.PDF.
- [11] A. C. Modesto, “Fundamentos para sensor distribuido de fibra óptica basado en efecto Brillouin para medición de temperatura y tensión utilizando configuración de encadenamiento por inyección óptica,” 2009, Accessed: Aug. 31, 2022. [Online]. Available: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2260119>.
- [12] “Sensores de fibra óptica.” <https://www.viavisolutions.com/es-es/productos/sensores-de-fibra-optica> (accessed Aug. 31, 2022).
- [13] E. Ip *et al.*, “Distributed fiber sensor network using telecom cables as sensing media: technology advancements and applications [Invited],” *J. Opt. Commun. Networking, Vol. 14, Issue 1*, pp. A61–A68, vol. 14, no. 1, pp. A61–A68, Jan. 2022, doi: 10.1364/JOCN.439175.

- [14] G. Bolognini, M. A. Soto, and F. Di Pasquale, "Fiber-optic distributed sensor based on hybrid raman and brillouin scattering employing multiwavelength Fabry-Pérot lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 20, pp. 1523–1525, 2009, doi: 10.1109/LPT.2009.2028899.
- [15] Y. Yan *et al.*, "Distributed Optical Fiber Sensing Assisted by Optical Communication Techniques," *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 12, pp. 3654–3670, Jun. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3057670.
- [16] T. Kasajima, K. Uno, and F. Takei, "A signal correction technique for Raman-scattering based temperature sensing using optical fibers," *Proc. Int. Conf. Sens. Technol. ICST*, pp. 258–262, 2011, doi: 10.1109/ICSENST.2011.6136977.
- [17] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Characterization of Brillouin scattering in plastic optical fibers for sensing applications," pp. 1631–1631, Nov. 2016, doi: 10.1109/PIERS.2016.7734736.
- [18] M. Holik, T. Horvath, and V. Oujezsky, "Application for GPON Frame Analysis," *Electron. 2019, Vol. 8, Page 700*, vol. 8, no. 6, p. 700, Jun. 2019, doi: 10.3390/ELECTRONICS8060700.
- [19] "Passive Optical Networks: Principles and Practice - Google Libros." [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=DSO5CVBuhKEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=passive+optical+network+principles+and+practice&ots=rRmVCUUuH5&sig=4wymUynMSHfM6yTUw1D9BUqKTVY#v=onepage&q=passive optical network principles and practice&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=DSO5CVBuhKEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=passive+optical+network+principles+and+practice&ots=rRmVCUUuH5&sig=4wymUynMSHfM6yTUw1D9BUqKTVY#v=onepage&q=passive+optical+network+principles+and+practice&f=false) (accessed Aug. 31, 2022).
- [20] "G.984.3 : Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa de convergencia de transmisión." <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/es> (accessed Aug. 31, 2022).
- [21] T. Horvath, M. Jurcik, V. Oujezsky, and V. Skorpil, "GPON analyzer-Frame parser module," *2019 42nd Int. Conf. Telecommun. Signal Process. TSP 2019*, pp. 748–752, Jul. 2019, doi: 10.1109/TSP.2019.8768882.
- [22] and J. V. Paul-Edouard Dupouy, Matthias Büchner, Philippe Paquier, Gérard Tréneç, "Interferometric measurement of the temperature dependence of an index of refraction: application to fused silica," *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 4, 2010.
- [23] W. Wang, Y. Yu, Y. Geng, and X. Li, "Measurements of thermo-optic coefficient of standard single mode fiber in large temperature range," *Int. Conf. Opt. Instruments Technol. Opt. Sens. Appl.*, vol. 9620, pp. 234–239, Aug. 2015, doi: 10.1117/12.2193091.
- [24] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, "Temperature-Dependent sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical fiber glasses," *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1338–1342, 1994, doi: 10.1109/50.317500.
- [25] T. Horvath, P. Munster, M. Jurcik, L. Koci, and M. Filka, "Timing measurement and simulation of the activation process in gigabit passive optical networks," *Opt. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp. 459–471, 2015, doi: 10.5277/OA150403.
- [26] T. Horvath, P. Munster, V. Oujezsky, and J. Vojtech, "Activation Process of ONU in EPON/GPON Networks," *2018 41st Int. Conf. Telecommun. Signal Process. TSP 2018*, Aug. 2018, doi: 10.1109/TSP.2018.8441216.
- [27] "G.987.1 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Requisitos generales." <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1/es> (accessed Aug. 31, 2022).