



Las fibras ópticas: una revisión de su evolución, estándares y tendencias actuales: Parte I.

Dioen Biosca Rojas, René Yañez de la Rivera

RESUMEN / ABSTRACT

La fibra óptica representa uno de los avances tecnológicos más trascendentales en las telecomunicaciones modernas, habiendo evolucionado desde conceptos teóricos hasta convertirse en el pilar fundamental de la infraestructura de transmisión digital global. Este artículo presenta una revisión sistemática de la evolución histórica, la clasificación técnica y la estandarización de las fibras ópticas, analizando su desarrollo desde las primeras propuestas conceptuales en la década de 1960 hasta los estándares actuales que soportan las redes de próxima generación. Se presenta, en esta parte I inicial, el ecosistema normativo actual, esclareciendo las diferencias y equivalencias entre los estándares internacionales de la UIT-T para redes públicas de telecomunicaciones y las especificaciones de la industria (TIA/EIA, ISO/IEC) predominantes en entornos de centros de datos y redes privadas. Este análisis esclarece el marco regulatorio y técnico que garantiza la interoperabilidad, el desempeño escalable y la correcta selección de medios de transmisión en cada ámbito de aplicación, sentando las bases para la presentación, en la segunda parte de este trabajo, del estallido en la diversificación de la fibra óptica tanto como medio de transmisión como en su uso como dispositivo en incontables aplicaciones.

Palabras claves: Fibras ópticas, estandarización, evolución tecnológica, tendencias en fibra óptica.

ABSTRACT

Optical fiber represents one of the most transformative technological advancements in modern telecommunications, having evolved from theoretical concepts to become the fundamental pillar of global digital transmission infrastructure. This article presents a systematic review of the historical evolution, technical classification, and standardization of optical fibers, analyzing their development from the first conceptual proposals in the 1960s to the current standards supporting next-generation networks. This initial Part I presents the current regulatory ecosystem, clarifying the differences and equivalences between the international ITU-T standards for public telecommunication networks and the industry specifications (TIA/EIA, ISO/IEC) predominant in data center environments and private networks. This analysis clarifies the regulatory and technical framework that guarantees interoperability, scalable performance, and the correct selection of transmission media in each application domain, laying the groundwork for the presentation, in the second part of this work, of the explosion in the diversification of optical fiber both as a transmission medium and as a device in countless applications.

Keywords: Optical fibers, standardization, technological evolution, trends in fiber optics.

Optical Fibers: A Review of Their Evolution, Standards, and Current Trends: Part I.

1. -INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la tecnología de fibra óptica se ha consolidado como el pilar fundamental sobre el que descansan las modernas infraestructuras globales de telecomunicaciones. Desde sus primeras demostraciones experimentales en la década de 1960 hasta los actuales sistemas de transmisión capaces de transportar varios petabits por segundo a través de un solo filamento de vidrio, su evolución ha estado marcada por una sucesión de hitos científicos y tecnológicos que han redefinido los límites de la capacidad, el alcance y la eficiencia de las comunicaciones ópticas. Paralelamente, el vertiginoso avance en el diseño y fabricación de nuevos tipos de fibra, junto con la proliferación de aplicaciones que trascienden el ámbito estrictamente de las telecomunicaciones —desde la instrumentación médica hasta la detección distribuida de fenómenos físicos—, ha hecho necesario un ecosistema normativo robusto y en constante actualización. En este contexto, resulta pertinente ofrecer una revisión estructurada que permita comprender no solo la trayectoria histórica de estos dispositivos, sino también el entramado de estándares que garantizan su interoperabilidad y el panorama actual de las líneas de investigación más prometedoras.

El objetivo de esta primera parte es doble: por un lado, trazar una reseña histórica estructurada del desarrollo de la fibra óptica, identificando las etapas tecnológicas que han marcado su evolución desde los primeros prototipos hasta la actualidad; por otro lado, presentar de manera organizada el complejo ecosistema normativo que regula el campo de las fibras ópticas, con especial énfasis en las recomendaciones ITU-T para redes de operadores y en los estándares aplicables a centros de datos, así como en las relaciones entre los distintos cuerpos de estandarización internacionales.

En aras de ser lo más exhaustivo posible en la presentación de la información y debido al tremendo impacto y desarrollo que ha experimentado la fibra óptica desde su surgimiento, se ha estructurado el presente trabajo en dos partes. Esta primera parte se organiza de la siguiente manera: la sección 2 ofrece una reseña del desarrollo histórico de la fibra óptica, estructurada en cinco etapas que abarcan desde los inicios conceptuales hasta los paradigmas actuales. La sección 3 presenta el marco regulatorio, desglosado en los conjuntos normativos para fibras de operadores de telecomunicaciones (recomendaciones G.652 a G.657) y para fibras utilizadas en centros de datos (categorías OM1 a OS2). La sección 4 explora la relación entre los distintos cuerpos de estandarización internacionales, y finalmente la sección 5 recoge las conclusiones.

La segunda parte del trabajo está dedicada a las tendencias actuales en el desarrollo de las fibras ópticas más modernas, la revisión de los nuevos tipos de fibra que están siendo desarrollados, el estado actual de sus procesos de estandarización así como la presentación de las principales áreas donde se están llevando a cabo los esfuerzos fundamentales de I+D en este campo, tanto para aplicaciones en el área de las telecomunicaciones como muchas otras.

2.- BREVE RESEÑA DEL DESARROLLO DE LA FIBRA OPTICA

Primera etapa o de desarrollo conceptual (1960 – 1970).

La génesis de la fibra óptica como medio de transmisión puede trazarse hasta los trabajos pioneros que establecieron tanto los fundamentos teóricos como las primeras demostraciones experimentales.

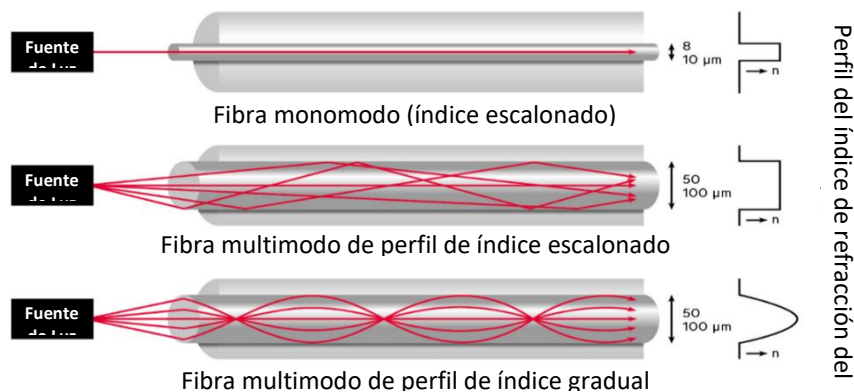


Figura 1.

Clasificaciones iniciales fundamentales de los tipos de fibra óptica que determinan las formas de propagación de la luz en la fibra: Monomodo (únicamente de perfil de índice escalonado), Multimodo de perfil de índice escalonado y gradual.

La invención del láser por Maiman en 1960 [1] proporcionó por primera vez una fuente coherente de radiación óptica, condición esencial para la posterior investigación en transmisión guiada de luz. Sin embargo, el hito fundamental lo constituyó el trabajo de Kao y Hockham en 1966 [2], quienes demostraron teóricamente la viabilidad de utilizar fibras dieléctricas de vidrio como guías de ondas ópticas. En su publicación seminal, identificaron que la principal limitación para la transmisión práctica no eran fenómenos dispersivos, como se creía hasta entonces, sino la absorción producida por impurezas intrínsecas en los materiales vítreos disponibles. Kao y Hockham establecieron que, si se lograba reducir la atenuación por debajo de 20 dB/km, la fibra óptica podría convertirse en un medio viable para telecomunicaciones [2]. Esta predicción se materializó en 1970 cuando investigadores de Corning Glass Works, liderados por Kapron, Keck y Maurer, fabricaron la primera fibra óptica con atenuación inferior a este umbral crítico [3]. Mediante el empleo de sílice fundida de ultra alta pureza (SiO_2) dopada con dióxido de titanio (TiO_2) para crear la estructura núcleo-revestimiento, lograron una atenuación de aproximadamente 17 dB/km a 633 nm, marcando así el inicio de la era experimental de la fibra óptica en telecomunicaciones.

Durante esta etapa inicial, se desarrollaron dos clasificaciones fundamentales: Por perfil de índice de refracción y por el tipo de material. Por perfil: Las fibras de índice escalonado (*step-index*), implementadas en las primeras demostraciones prácticas, y las fibras de índice gradual (*graded-index*), propuestas teóricamente por Nishizawa entre 1963 y 1964.

Por el material: Las fibras de vidrio multicomponente con alta atenuación (>1000 dB/km) debido a impurezas metálicas e iones OH^- , y las revolucionarias fibras de sílice ultra pura que permitieron alcanzar atenuaciones viables para aplicaciones prácticas.

La fibra óptica convencional se estructura en dos regiones concéntricas: un núcleo (core) de sílice (SiO_2) con un índice de refracción n_1 , y una cubierta o revestimiento (*cladding*) circundante, también de sílice, con un índice de refracción ligeramente menor n_2 ($n_1 > n_2$). Esta diferencia en los índices de refracción es crucial para el fenómeno de guiado que ocurre por reflexión total interna (RTI) en la superficie entre el núcleo y el revestimiento.

Actualmente los dopantes más utilizados para lograr esas diferencias entre los índices de refracción son los siguientes:

Dopantes para Aumentar el Índice del Núcleo:

- Germanio (GeO_2 / Dióxido de germanio): Es el dopante más común y eficaz. Se incorpora al núcleo de la fibra, aumentando su índice de refracción de forma aproximadamente lineal con su concentración. Su principal ventaja es que no introduce picos de absorción significativos en las ventanas de comunicación (1310 nm y 1550 nm) y contribuye favorablemente a las propiedades mecánicas del vidrio.
- Fósforo (P_2O_5 / Pentóxido de fósforo): Puede usarse junto con el GeO_2 . Reduce la temperatura de fusión del vidrio pero puede incrementar ligeramente las pérdidas por OH^- .

Dopantes para Disminuir el Índice del Revestimiento:

- Flúor (F): Es el dopante reductor de índice por excelencia. La incorporación de átomos de flúor en la red de sílice reduce su densidad y, por tanto, su índice de refracción. Permite crear cubiertas con índice bajo sin comprometer la transparencia en el infrarrojo cercano.
- Boro (B_2O_3 / Trióxido de boro): Fue utilizado en las primeras fibras, pero introduce una mayor atenuación en la ventana de 1550 nm y puede afectar la resistencia mecánica. Su uso actual es más limitado.

Segunda etapa o de desarrollo tecnológico inicial (1970 – 1985).

La década de 1970 presenció una aceleración significativa en el desarrollo tecnológico de las fibras ópticas, con mejoras sustanciales en los procesos de fabricación y la diversificación de tipos de fibra. Keck, Maurer y Schultz establecieron en 1973 el límite teórico inferior de atenuación en fibras de sílice, determinado fundamentalmente por la dispersión de Rayleigh [4]. Este trabajo proporcionó un marco teórico para comprender las limitaciones físicas fundamentales y guiar el desarrollo de nuevos materiales y procesos de fabricación.

Durante este período se consolidaron dos familias principales de fibras. Las fibras multimodo (MMF), tanto de perfil de índice escalonado como gradual, dominaron las primeras aplicaciones comerciales. La introducción experimental de fibras multimodo de índice gradual por Olshansky y Keck en 1976 permitió reducir significativamente la dispersión modal, mejorando el ancho de banda disponible para transmisión de datos. Paralelamente, se desarrollaron las fibras monomodo (SMF), con un estudio pionero de Feuer, Gordon y Lin en Bell Labs en 1975 que demostró sus ventajas en capacidad y distancia, aunque presentaban mayores desafíos en fabricación y acoplamiento [5].

La convergencia de estos avances tecnológicos dio origen a los primeros sistemas comerciales de comunicaciones ópticas en 1977, operando inicialmente a 45 Mbps en distancias de pocos kilómetros [5]. Estos sistemas emplearon principalmente fibras multimodo y marcaron el inicio del despliegue real de la tecnología, aunque aún limitado a aplicaciones metropolitanas y de corta distancia. La evolución de los métodos de fabricación, particularmente el desarrollo de procesos de deposición química en fase de vapor (MCVD, VAD, OVD), permitió reducir progresivamente la atenuación hasta alcanzar valores cercanos a 0.5 dB/km a finales de este período.

Tercera etapa o de expansión y normalización (1985 – 2000).

El período comprendido entre 1985 y 2000 representó la transición de la fibra óptica desde una tecnología experimental hasta convertirse en el estándar global para telecomunicaciones de larga distancia. Un factor determinante en esta transformación fue la estandarización formal por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T), que permitió la interoperabilidad global y la fabricación en masa. La Recomendación ITU-T G.652 [22], publicada originalmente en 1988, estableció las especificaciones para la fibra monomodo estándar (SMF) optimizada para operación en la ventana de 1310 nm. Paralelamente, la Recomendación G.653 definió la fibra de dispersión desplazada (DSF) con dispersión cero en 1550 nm, aunque su adopción se vio limitada posteriormente por problemas de no linealidades en sistemas DWDM [6].

La década de 1980 también fue testigo del despliegue pionero de cables submarinos transoceánicos basados en fibra óptica. El sistema TAT-8, por ejemplo, inaugurado en 1988 entre Estados Unidos, Reino Unido y Francia, empleó fibras monomodo G.652 alcanzando una capacidad inicial de 280 Mbps por par de fibras, lo que representó un salto exponencial en capacidad de transmisión intercontinental [7]. Estos despliegues marcaron el inicio de una red troncal global basada en fibra óptica que continúa siendo la columna vertebral de Internet en la actualidad.

El advenimiento de los sistemas de multiplexación por división en longitud de onda (WDM) y particularmente DWDM (Dense WDM) a principios de los años 1990 impulsó tremendamente la capacidad disponible en una sola fibra. Las bases experimentales para estos sistemas fueron establecidas por Iizuka y Kobayashi en 1990, permitiendo el envío de múltiples canales ópticos independientes por una misma fibra [8]. Complementariamente, la incorporación de amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFA), desarrollados a finales de los años ochenta y consolidados en la década de 1990, reemplazó a los repetidores electro-ópticos convencionales, permitiendo amplificar directamente la señal óptica en la ventana de 1550 nm sin conversión eléctrica intermedia [9].

Durante esta etapa se completó la familia de estándares ITU-T con la publicación de G.654 (1993) para fibras de atenuación ultra baja en aplicaciones submarinas, y G.655 (1996) para fibras de dispersión no cero (NZ-DSF) optimizadas para sistemas DWDM. Estas especializaciones reflejaron la creciente diversificación de aplicaciones y requisitos técnicos en redes ópticas modernas.

Cuarta etapa o de especialización y optimización (2000 – 2020).

El siglo XXI ha presenciado una especialización creciente de las fibras ópticas para aplicaciones específicas, acompañada de mejoras continuas en parámetros de rendimiento. La Recomendación ITU-T G.656 (2004) introdujo la fibra de dispersión no cero de banda ancha (*Wideband* NZ-DSF), diseñada específicamente para operación multibanda abarcando las ventanas S, C y L. Esta especialización respondió a la necesidad de maximizar la utilización del espectro óptico disponible en sistemas de alta capacidad. Un desarrollo particularmente significativo fue la estandarización de la Recomendación ITU-T G.657 en 2006, que definió las características de fibras monomodo insensibles a pérdidas por curvatura (*Bend-Insensitive* BI) para redes de acceso FTTx [10]. La evolución de esta recomendación incluyó las variantes G.657.A2 (2009) con radio de curvatura de 7.5 mm y G.657.B3 (2012) con radio de 5 mm, facilitando instalaciones en espacios confinados y contribuyendo decisivamente a la viabilidad económica de despliegues FTTH masivos.

Paralelamente, las mejoras en procesos de fabricación permitieron alcanzar atenuaciones récord en fibras especializadas. La categoría G.654.E (2020) estableció especificaciones para fibras de atenuación ultra baja (≤ 0.155 dB/km) con área efectiva aumentada (≥ 150 μm^2), optimizadas para sistemas coherentes de 400G/800G en enlaces submarinos de próxima generación [11]. Estas mejoras han permitido extender las distancias entre repetidores en sistemas submarinos hasta más de 130 km, reduciendo significativamente el costo total de propiedad de esta infraestructura crítica.

Puede decirse que hasta esta etapa se considera el desarrollo de las fibras ópticas que pueden referirse como clásicas, cuyas estructuras, salvando ligeras variaciones que podrían producirse en las dimensiones de las fibras ópticas plásticas, caen en alguna de las clasificaciones mostradas en la figura 2.

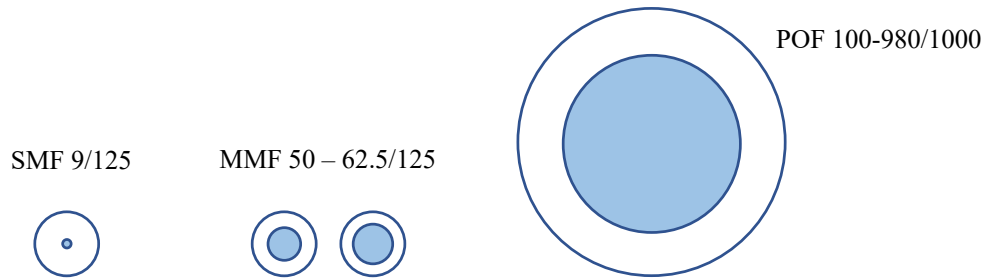


Figura 2.

Secciones transversales típicas de las fibras ópticas clásicas. SMF (*Single Mode Fiber*), MMF (*Multi Mode Fiber*), POF (*Plastic Optical Fiber*)

Las fibras ópticas monomodo o SMF (*Single Mode Fibers*) caracterizadas por un núcleo de $9\mu\text{m}$ y un revestimiento de $125\mu\text{m}$, comúnmente referidas como SMF 9/125. Los dos tipos de fibra multimodo o MMF (*Multi Mode Fibers*) que con el mismo revestimiento de $125\mu\text{m}$ pueden encontrarse con núcleos tanto de 50 como de $62.5\mu\text{m}$. En la literatura pueden citarse como MMF 50/125 o 62.5/125. Por último, las fibras ópticas plásticas POF (*Plastic Optical Fibers*) que, aunque pueden encontrarse con diferentes tamaños de núcleo, es usual que posean revestimientos de $1000\mu\text{m}$ y diámetros de núcleo entre 100 y $980\mu\text{m}$.

Quinta Etapa (2020–Presente): Etapa de funcionalización y nuevos paradigmas.

En esta etapa la evolución de la fibra óptica entra en una fase disruptiva. Esta quinta etapa no se define por la optimización incremental de los parámetros de la fibra monomodo estándar, sino por un rediseño radical de la guía de ondas para habilitar funcionalidades específicas y abordar límites fundamentales de la física y la teoría de la información. El objetivo ha trascendido el mero transporte de datos a mayor capacidad, para convertir a la fibra en un componente activo y funcional dentro de sistemas que operan bajo nuevos paradigmas, como la comunicación cuántica y la multiplexación espacial [12].

Un pilar de esta etapa es la adopción de principios de guiado más allá de la reflexión total interna. Las fibras de cristal fotónico (PCF), particularmente las fibras huecas antiresonantes (HC-ARF), confinan la luz en un núcleo de aire mediante un revestimiento microestructurado [13]. Este diseño, perfeccionado en diseños "nodeless" [14], reduce drásticamente la atenuación y la dispersión, y permite una atenuación baja en ventanas espectrales específicas (e.g., alrededor de $2\mu\text{m}$), abriendo perspectivas para comunicaciones de alta potencia y sensores de nueva generación [15]. Paralelamente, la demanda de seguridad incondicional ha impulsado el desarrollo de fibras especializadas para comunicaciones cuánticas (QKD). Estos sistemas, basados en la transmisión de estados cuánticos frágiles (fotones individuales) [16], requieren fibras con birrefringencia mínima y controlada para preservar la polarización, y una atenuación excepcionalmente baja para maximizar el alcance de la distribución de entrelazamiento cuántico, como se ha demostrado en redes sobre fibra instalada [17].

El segundo gran eje es la multiplexación por división espacial (SDM), una respuesta directa al límite de capacidad de Shannon que enfrentan los sistemas de un solo núcleo. Esto se materializa en dos arquitecturas: las fibras multinúcleo (MCF), que integran múltiples núcleos monomodo independientes en una sola cubierta, y las fibras de pocos modos (FMF), diseñadas para propagar un número limitado de modos espaciales de manera controlada [18]. La investigación se centra en minimizar el acoplamiento entre núcleos o el retardo diferencial entre modos (DMGD) [19], mientras se demuestran enlaces de alta capacidad y larga distancia que validan su potencial [21]. Estos avances representan un cambio de paradigma desde la multiplexación en un único grado de libertad (longitud de onda) hacia la explotación de múltiples dimensiones espaciales.

Esta etapa se caracteriza también por la necesidad del diseño simultáneo físico-sistema y el inicio de su normalización. El desarrollo de la fibra es inseparable del diseño del transceptor (por ejemplo, utilizando procesamiento MIMO masivo para FMF) y del protocolo (como en QKD). Asimismo, la publicación de recomendaciones como la ITU-T G.654.2 (2020) para fibras de atenuación ultra baja y la actividad en comités de estandarización para fibras multinúcleo evidencian la transición de estas tecnologías desde el laboratorio hacia la infraestructura práctica [20]. En conclusión, la quinta etapa consolida a la fibra óptica como un campo de innovación fundamental, donde la micro y nanoestructura del material se ingenia para soportar no solo las telecomunicaciones del futuro, sino también los cimientos de la computación cuántica distribuida, el sensado avanzado y la metrología de última generación.

3.- MARCO REGULATORIO ASOCIADO A LAS FIBRAS OPTICAS

3.1.- ECOSISTEMA NORMATIVO

El ámbito regulatorio en el entorno de los sistemas de fibra óptica vincula varias organizaciones y cuerpos de estandarización, cuyas referencias pueden ser causa de confusión en ocasiones debido a la gran variedad de normas y formas de hacer referencia a cada uno de sus documentos. Las instituciones de más relevancia de jurisdicción global son las siguientes:

- La Unión Internacional de Telecomunicaciones o UIT (ITU, *International Telecommunication Union*)
- La Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*)
- La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*)

En la práctica internacional, existe una división natural de dominios: los operadores de telecomunicaciones se rigen por los estándares de la UIT (ITU-T), que definen los requisitos de los sistemas para redes públicas. Los centros de datos y entornos empresariales operan bajo el marco de la ISO/IEC, específicamente bajo la norma ISO/IEC 11801, que establece las clasificaciones OM (*Optical Multimode*) y OS (*Optical Singlemode*) para cableado estructurado. Mientras tanto, la metrología, fabricación y especificación de productos recae en los estándares de la IEC, que proporcionan los métodos de prueba y las especificaciones técnicas fundamentales. Esta trilogía, aunque aparentemente superpuesta, funciona de manera complementaria: la IEC define el “qué”, la UIT define el “para qué” en redes públicas y la ISO/IEC define el “cómo usarlo” en instalaciones.

3.2.- CONJUNTO DE NORMAS PARA LAS FIBRAS DE OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES

Como se mencionaba anteriormente, dentro de esta clasificación caen los estándares especificados por la UIT, los cuales se presentan de forma resumida en la tabla 1.

G.652: Fibra Monomodo de Dispersión No Desplazada (Standard Single-Mode Fiber - SSMF).

La Recomendación ITU-T G.652 constituye la base de la infraestructura de fibra óptica global, definiendo la fibra monomodo estándar de dispersión no desplazada. Su evolución desde las subclases A y B hasta la D refleja la respuesta a las crecientes exigencias de los sistemas de transmisión. Las versiones iniciales, G.652.A y B, establecían la atenuación máxima en 0.5 dB/km en 1310 y 1550 nm, siendo la diferencia clave el factor de Dispersión del Modo de Polarización (PMD), reducido de 0.5 a 0.2 ps/√km en la versión B para habilitar sistemas de 10 Gb/s a mayor distancia. La G.652.C introdujo la capacidad de operar con baja atenuación (≤ 0.4 dB/km) en la ventana de 1383 nm, habilitando el uso económico de sistemas CWDM. La subclase actual, G.652.D, consolida todas las mejoras: atenuación ultra baja en el espectro completo de 1260 a 1625 nm (incluyendo la banda E), bajo PMD y compatibilidad con las anteriores, convirtiéndola en el caballo de batalla universal para redes de acceso (FTTH/GPON), transporte metropolitano y redes dorsales o backbones nacionales, soportando desde sistemas PON hasta DWDM de 400G [22].

G.653: Fibra de Dispersión Desplazada (Dispersion-Shifted Fiber - DSF).

La Recomendación ITU-T G.653 representa un intento histórico de optimización que posteriormente reveló una limitación fundamental. Diseñada a finales de los años 80, esta fibra desplaza el punto de dispersión cromática nula a la longitud de onda de 1550 nm, coincidiendo con la ventana de mínima atenuación. Esto la hacía ideal para sistemas mono canal de alta velocidad (en aquel momento 2.5 y 10 Gb/s) de larga distancia, eliminando la necesidad de complejos módulos de compensación de dispersión. Sin embargo, esta misma característica resultó ser su perdición: la dispersión nula en la banda de operación potencia severamente el efecto de mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), un fenómeno no lineal que genera interferencia cruzada inaceptable en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM). Por consiguiente, aunque se desplegó en redes troncales como las de NTT en Japón a principios de los 90, la G.653 quedó rápidamente obsoleta con la llegada del DWDM comercial y fue reemplazada por la familia G.655. Su legado es un caso de estudio sobre la importancia de anticipar futuros paradigmas de multiplexación en el diseño de fibras [23].

Tabla 1
Relación de estándares UIT y sus variantes para redes de operadores de Telecomunicaciones

Estándar & Subclase	Nombre Común	Característica Principal / Diferencia	Rango de Aplicación Principal	Vigencia / Estado
G.652.A	SSMF (Standard)	PMD ≤ 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$, base.	Redes heredadas SDH/SONET ≤ 2.5 Gb/s.	Obsoleta. No se instala nuevo.
G.652.B	SSMF (Low PMD)	PMD ≤ 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$.	Sistemas 10 Gb/s a larga distancia (años 2000).	Limitada. En redes existentes.
G.652.C	SSMF (Low Water Peak)	Baja atenuación en ventana de 1383 nm.	Sistemas CWDM de bajo costo en redes de acceso/metro.	Vigente, pero absorbida por la D.
G.652.D	SSMF (Ultra Low Loss)	Atenuación baja (≤ 0.4 dB/km) en todo el espectro 1260-1625 nm. Bajo PMD.	Estándar universal actual: FTTH (GPON/XGS-PON), backbone, DWDM de 100G+.	Vigente y predominante.
G.653	DSF	Dispersión cero desplazada a ~ 1550 nm.	Sistemas monocal de larga distancia de los años 90. Inviabile para DWDM denso.	Técnicamente obsoleta. Lección histórica
G.654.A	ULLF (Small Aeff)	Fibra de corte desplazado. Aeff pequeña ($\sim 60\text{-}70 \mu\text{m}^2$).	Cables submarinos de primera generación (ej. TAT-12/13).	En desuso para nuevos proyectos.
G.654.B	ULLF (Medium Aeff)	Aeff media ($\sim 70\text{-}90 \mu\text{m}^2$).	Cables submarinos de media distancia (ej. APCN-2).	En desuso para nuevos proyectos.
G.654.C	ULLF (Large Aeff)	Aeff grande ($\sim 90\text{-}110 \mu\text{m}^2$).	Cables submarinos de transición a mayor capacidad (ej. SEA-ME-WE 4).	Vigente en cables existentes.
G.654.E	ULLF (Ultra Large Aeff)	Aeff muy grande ($110\text{-}130 \mu\text{m}^2$). Atenuación ultrabaja.	Submarinos de nueva generación (MAREA, Dunant) y enlaces terrestres de distancia extrema (>400 km).	Vigente y de vanguardia.
G.655.A/B	NZ-DSF (Gen. 1)	Dispersión no nula baja. Rangos y pendientes específicas.	Primeros sistemas DWDM denso (32-64 canales).	Vigente en redes legacy. Poco nuevo despliegue.
G.655.C/D/E	NZ-DSF (Gen. 2)	Dispersión optimizada para banda C y/o L extendida.	DWDM de alta densidad en bandas C+L (hasta 192 canales). Backbone de alta capacidad.	Vigente en rutas troncales DWDM específicas.
G.656	Wideband NZ-DSF	Dispersión no nula garantizada en banda ancha (1460-1625 nm).	Sistemas DWDM multibanda (S+C+L) experimentales y de capacidad extrema.	Vigente, pero nicho. Baja adopción comercial.
G.657.A1	BIF (Bend-Insensitive)	Compatibilidad total con G.652. Radio de curvatura mínimo: 10 mm.	Distribución FTTH en ductos y postes. Primera generación de fibra <i>bend-insensitive</i> .	Vigente.
G.657.A2	BIF (Bend-Insensitive)	Compatibilidad total con G.652. Radio de curvatura mínimo: 7.5 mm.	Estándar actual para drop FTTH e interior de edificios (MDU).	Vigente y ampliamente desplegada.
G.657.B2	BIF (Bend-Optimized)	Compatibilidad limitada (1310-1625 nm). Radio: 15 mm.	Aplicaciones con curvaturas extremas donde la compatibilidad total no es crítica.	Vigente, nicho.
G.657.B3	BIF (Bend-Optimized)	Compatibilidad limitada (1310-1625 nm). Radio: 10 mm.	Aplicaciones de espacio ultra-restringido (ej. electrónica militar, sensores).	Vigente, nicho especializado.

Leyenda y notas:

SSMF:	<i>Standard Single-Mode Fiber.</i>
DSF:	<i>Dispersion-Shifted Fiber.</i>
ULLF:	<i>Ultra-Low Loss Fiber.</i>
NZ-DSF:	<i>Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber.</i>
BIF:	<i>Bend-Insensitive Fiber.</i>
PMD:	<i>Polarization Mode Dispersion.</i>
Aeff:	<i>Effective Mode Area.</i>
Vigencia:	"Predominante" indica el estándar de elección para nuevos despliegues en su categoría.

G.654: Fibra de Atenuación Ultrabaja con Corte Desplazado (Cut-off Shifted Fiber).

La Recomendación ITU-T G.654 especifica fibras especializadas cuyo diseño prioriza la minimización de la atenuación de señal en la ventana de 1550 nm, a expensas de otras características. Organizada en categorías de la A a la E según el área de modo efectivo (Aeff), su principal aplicación ha sido y es el ámbito submarino. Las categorías A, B y C, con Aeff creciente (de ~ 60 a $110 \mu\text{m}^2$) y atenuación típica ≤ 0.22 dB/km, equiparon cables transoceánicos como el TAT-12/13 y el SEA-ME-WE 4, maximizando la distancia entre amplificadores. La categoría G.654.E, definida más recientemente, representa un salto cuantitativo: combina un Aeff muy grande ($110\text{-}130 \mu\text{m}^2$) con una atenuación máxima reducida a 0.168 dB/km. Esta combinación minimiza simultáneamente las pérdidas lineales y los efectos no lineales (como la dispersión estimulada de

Brillouin), permitiendo longitudes de vanos (spans: distancia entre nodos repetidores) ópticos superiores a 70 km y potencias de lanzamiento más altas. Es el estándar crítico en cables de última generación como MAREA y Dunant, que transportan cientos de terabits por segundo, y comienza a usarse en enlaces terrestres de distancia extrema (>400 km) donde la infraestructura de repetidores es inviable o costosa [24].

G.655: Fibra de Dispersión No Nula (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber - NZ-DSF).

La Recomendación ITU-T G.655 surgió como la solución directa a la limitación de la G.653 para DWDM. Define fibras con dispersión cromática pequeña pero no nula en la banda de 1550 nm (típicamente entre 0.1 y 10 ps/(nm·km)), suficiente para suprimir el FWM mientras se mantiene la dispersión acumulada manejable para la compensación electrónica en sistemas coherentes. Sus subclases (A, B, C, D, E) se diferencian principalmente por el rango y pendiente de dispersión especificados, optimizándose progresivamente para un mayor número de canales DWDM. Mientras que las primeras versiones (G.655.A/B) soportaban decenas de canales en la banda C, las más avanzadas (G.655.D/E) están diseñadas para operación en las bandas C y L extendidas (1530-1625 nm) con más de 96 canales. Estas fibras fueron el pilar de las redes troncales DWDM de alta capacidad durante las décadas de 2000 y 2010, encontrando aplicación en backbones nacionales de operadores. Aunque en redes metropolitanas nuevas compete con la versátil G.652.D, la G.655 mantiene su nicho en rutas de larga distancia con densidades espectrales extremas [25].

G.656: Fibra de Dispersión No Nula de Banda Ancha.

La Recomendación ITU-T G.656 es una evolución especializada de la G.655, diseñada para soportar sistemas DWDM que operen simultáneamente en múltiples bandas de transmisión (S, C y L). Su característica definitoria es mantener un valor mínimo de dispersión cromática (≥ 2 ps/(nm·km)) a lo largo de un rango espectral muy amplio, de 1460 a 1625 nm. Este diseño garantiza la supresión de efectos no lineales como el FWM en todo el espectro utilizable por los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) y los amplificadores Raman. Aunque técnicamente superior en capacidad espectral potencial, su adopción comercial ha sido limitada debido a la complejidad y costo asociados con los sistemas de amplificación y gestión de canales multibanda. Su aplicación se ha circunscrito principalmente a proyectos de investigación y demostración de capacidad récord, como el proyecto europeo STARDUST, y a enlaces puntuales de capacidad extrema donde se justifica la complejidad adicional. Representa la especialización máxima para maximizar el ancho de banda por fibra [26].

G.657: Fibra Insensible a la Curvatura (Bend-Insensitive Single-Mode Fiber).

La Recomendación ITU-T G.657 responde al desafío práctico de los despliegues masivos en redes de acceso (FTTH) y en entornos de instalación restrictivos. Su innovación radica en un diseño de perfil de índice de refracción que incorpora un "trench" (zanja) de bajo índice alrededor del núcleo, confinando fuertemente el modo óptico y reduciendo drásticamente las pérdidas por macrocurvatura. Se divide en dos familias principales: la clase A (subclases A1 y A2), totalmente compatible con las fibras G.652 y con radios de curvatura mínimos de 10 y 7.5 mm respectivamente; y la clase B (subclases B2 y B3), con mayor resistencia a la curvatura (radios de 15 y 10 mm) pero compatibilidad espectral limitada, generalmente restringida a las ventanas de 1310, 1550 y 1625 nm. La G.657.A2 se ha convertido en el estándar de facto para los cables "drop" y la instalación interior en despliegues FTTH globales, donde las curvaturas cerradas en cajas de empalme y ductos son inevitables. Esta recomendación es un claro ejemplo de cómo la estandarización evoluciona para resolver problemas de ingeniería de despliegue, más que de transmisión pura [27].

3.3.- CONJUNTO DE NORMAS PARA LAS FIBRAS OPTICAS USADAS EN CENTROS DE DATOS

En el entorno de los centros de datos, basado en la norma ISO/IEC 11801 [28] y la IEEE 802.3 (Ethernet) [29], la tabla 2 resume la relación de capacidades para los estándares OM1 a OM5 y OS2.

OM1: La base heredada del cableado multimodo.

La clasificación OM1, definida en el estándar internacional de cableado estructurado ISO/IEC 11801, especifica fibra óptica MMF 62.5/125. Su característica principal es un ancho de banda modal overfilled (OFL) de al menos 200 MHz·km a 850 nm. Desarrollada en la década de 1980, OM1 aprovechaba la mayor capacidad de captación de luz de su núcleo más grande, compatible con los primeros emisores LED económicos. Fue el pilar de las primeras redes de área local (LAN) basadas en FDDI y Fast Ethernet (100BASE-FX), encontrando aplicación masiva en backbones o redes dorsales verticales de edificios corporativos y campus universitarios durante los años 90 y principios de los 2000. Sin embargo, su limitado ancho de banda la hace prácticamente inútil para velocidades de 10 Gb/s, soportando esta velocidad solo hasta 33 metros. En la actualidad,

OM1 se considera técnicamente obsoleta para nuevos despliegues. Su vigencia se limita a la extensión de la vida útil de instalaciones heredadas donde solo se requiere 1 Gb/s, y su reemplazo por fibras de 50 micras es una recomendación estándar en cualquier proyecto de modernización [28, 29].

Tabla 2
Denominaciones y capacidades asociadas a los estándares de fibra empleados en centros de datos

Clase	Norma IEC Base	Distancia Máxima por Aplicación Ethernet (Práctica Típica)
OM1 (62.5/125µm)	IEC 60793-2-10 A1b	<ul style="list-style-type: none"> • 1GbE (1000BASE-SX): Hasta 275 m • 10GbE (10GBASE-SX): Solo 33 m (prácticamente no usado) • Aplicaciones Legacy: Fast Ethernet, Fibre Channel 1G/2G
OM2 (50/125µm)	IEC 60793-2-10 A1a.1	<ul style="list-style-type: none"> • 1GbE (1000BASE-SX): Hasta 550 m • 10GbE (10GBASE-SX): Hasta 82 m • Fibre Channel: 4GFC hasta 380 m, 8GFC hasta 150 m
OM3 (50/125µm Laser Optimized)	IEC 60793-2-10 A1a.2	<ul style="list-style-type: none"> • 10GbE (10GBASE-SR): Hasta 300 m • 40GbE (40GBASE-SR4): Hasta 100 m • 100GbE (100GBASE-SR4): Hasta 100 m • 25GbE (25GBASE-SR): Hasta 100 m • Fibre Channel: 16GFC hasta 100 m, 32GFC hasta 100 m
OM4 (50/125µm Enhanced)	IEC 60793-2-10 A1a.3	<ul style="list-style-type: none"> • 10GbE (10GBASE-SR): Hasta 400 m • 40GbE (40GBASE-SR4): Hasta 150 m • 100GbE (100GBASE-SR4): Hasta 150 m • 25GbE (25GBASE-SR): Hasta 150 m • Fibre Channel: 32GFC hasta 125 m, 128GFC hasta 100 m
OM5 (50/125µm Wideband)	IEC 60793-2-10 A1a.4	<ul style="list-style-type: none"> • 10/40/100GbE: Mismas distancias que OM4 • SWDM (Short Wavelength Division Multiplexing): <ul style="list-style-type: none"> - 40GbE (40GBASE-SWDM4): Hasta 240 m - 100GbE (100GBASE-SWDM4): Hasta 75 m • Soporta multiplexación en 4 longitudes de onda (850-950 nm)
OS2	IEC 60793-2-50 B1.3 (Equivalente a ITU-T G.652.D)	<ul style="list-style-type: none"> • 1GbE (1000BASE-LX): Hasta 5 km (10 km con fibra especial) • 10GbE (10GBASE-LR): Hasta 10 km • 25GbE (25GBASE-LR): Hasta 10 km • 40GbE (40GBASE-LR4): Hasta 10 km • 100GbE (100GBASE-LR4): Hasta 10 km • 400GbE (400GBASE-LR8): Hasta 10 km • 800GbE (800GBASE-DR): Hasta 500 m (en 800GBASE-DR)

OM2: La transición hacia el núcleo de 50 micras.

La clase OM2 representa la primera estandarización generalizada de la fibra MMF 50/125 dentro de ISO/IEC 11801. Con un ancho de banda OFL mínimo de 500 MHz·km a 850 nm, ofrecía un rendimiento mejorado sobre OM1, permitiendo mayores distancias para aplicaciones de 1Gb/s (hasta 550 m) y soportando 10Gb/s hasta distancias limitadas de 82 metros. Su adopción, aunque significativa, fue un paso intermedio. La fibra OM2 estaba optimizada para fuentes LED, no para los láseres VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*) que emergieron como el estándar para Ethernet de 1Gb/s y superiores. Su principal aplicación histórica fue en redes corporativas y de campus que requerían mayor distancia que OM1 para servicios de 1Gb/s a fines de los años 90. Hoy, al igual que OM1, OM2 está en desuso para nuevas instalaciones. No cumple con los requisitos de ancho de banda modal efectivo (EMB) para las aplicaciones modernas de 10GbE a distancias prácticas y ha sido completamente superada por OM3 y OM4 [28, 30].

OM3: La fibra optimizada para láser y la era del 10GbE.

La clase OM3 marcó un cambio de paradigma al definir la primera fibra MMF 50/125 optimizada para operación con láser (VCSEL). Su especificación clave es un ancho de banda modal efectivo (EMB) mínimo de 2000 MHz·km a 850 nm. Esta optimización permitió que el estándar 10GBASE-SR alcanzara los 300 metros, una distancia práctica para la mayoría de los diseños de centros de datos y campus. OM3 se convirtió en el caballo de batalla de la industria durante la década de 2010, habilitando la transición masiva a 10GbE en los servidores y al uplink de 40GbE (via 40GBASE-SR4) hasta 100 metros. Su aplicación principal fue y sigue siendo en centros de datos empresariales en interconexiones rack-a-rack y dentro de un mismo pasillo. Aunque sigue vigente y operativa en millones de instalaciones, para nuevos proyectos suele preferirse OM4 debido a su mayor margen de distancia y vigencia a futuro, especialmente para velocidades de 40 y 100 Gb/s [28, 31].

OM4: La mejora para 40GbE y 100GbE de corto alcance.

La clase OM4 es una evolución directa de OM3, diseñada para proporcionar un mayor margen de rendimiento y soportar las siguientes generaciones de Ethernet de alta velocidad. Se caracteriza por un EMB mínimo de 4700 MHz·km a 850 nm, más del doble que OM3. Este aumento de ancho de banda extiende las distancias máximas para aplicaciones críticas: 400 metros para 10GBASE-SR y, lo más importante, 150 metros para 40GBASE-SR4 y 100GBASE-SR4. Esta distancia de 150 metros se alinea con los límites comunes de los diseños de los centros de datos grandes y proporciona una flexibilidad de diseño significativa. OM4 se estableció rápidamente como el estándar de facto para nuevos despliegues en centros de datos a mediados de la década de 2010, especialmente para arquitecturas spine-leaf que requieren saltos de múltiples conmutadores (switches). Su aplicación es universal en entornos donde se prevé o se requiere 40/100/400 Gb Ethernet sobre MMF en el futuro previsible. Sigue plenamente vigente y es ampliamente recomendada para nuevas infraestructuras, ofreciendo el mejor equilibrio entre costo incremental y capacidad extendida frente a OM3 [28, 32].

OM5: La fibra de banda ancha para multiplexación por longitud de onda.

La clase OM5, también denominada *Wideband Multimode Fiber* (WBMMF), representa la innovación más reciente en el ámbito multimodo, estandarizada para habilitar la multiplexación por división de longitud de onda corta (SWDM). A diferencia de sus predecesoras, OM5 no solo se especifica por su EMB a 850 nm (≥ 4700 MHz·km, igual que OM4), sino que también define requisitos de ancho de banda en longitudes de onda adicionales dentro del rango de 850 a 953 nm. Esta característica permite transmitir múltiples señales a diferentes longitudes de onda (por ejemplo, cuatro canales de 25 Gb/s) sobre un solo par de fibras, multiplicando efectivamente la capacidad. Su aplicación principal está dirigida a reducir la cantidad de fibras y conectores necesarios para alcanzar velocidades de 40, 100 y 400 Gb/s en distancias superiores a las soportadas por OM4 para estas aplicaciones (por ejemplo, 40GBASE-SWDM4 hasta 240m). Si bien su adopción ha sido más lenta debido a la necesidad de transceptores SWDM especializados y a un costo superior, OM5 es una tecnología vigente y estratégica para grandes centros de datos que buscan maximizar la utilización de su infraestructura de fibra y prepararse para futuras ampliaciones de capacidad [28, 12].

OS2: El Estándar Universal para Fibra Monomodo en Cableado Estructurado.

La clasificación OS2 (*Optical Singlemode 2*) define el único estándar contemporáneo para fibra monomodo dentro de ISO/IEC 11801, correspondiente técnicamente a la fibra ITU-T G.652.D o IEC 60793-2-50 B1.3. Su especificación clave es una atenuación máxima de 0.4 dB/km en todo el rango espectral de 1260 a 1625 nm, incluyendo la ventana de la banda E. Esta baja atenuación, combinada con una dispersión cromática manejable y un bajo PMD, la hace adecuada para cualquier aplicación de velocidad y distancia. OS2 es el estándar indiscutido para aplicaciones de larga distancia y alto ancho de banda: interconexión entre edificios en un campus, dorsales metropolitanos, interconexión de centros de datos (DCI, *Data Center Interconnection*) y redes de acceso de operadores (FTTx). A diferencia de las fibras multimodo, su rendimiento no está limitado por el ancho de banda modal, lo que la hace a prueba de futuro para velocidades que van desde 1Gb/s hasta 800Gb/s y más, limitadas solo por la tecnología de los transceptores. OS2 es plenamente vigente y es la elección obligatoria para cualquier enlace que exceda las distancias de la fibra multimodo (generalmente >500 m) o que requiera la máxima garantía de capacidad futura, siendo el componente fundamental de la capa física de las redes de telecomunicaciones globales [22,28, 33,34].

La clasificación OS1 (*Optical Singlemode 1*), definida en ediciones tempranas del estándar ISO/IEC 11801, ha quedado obsoleta en la práctica moderna debido a la evolución tecnológica y a la redefinición de los requisitos de desempeño en las redes ópticas. Su especificación original, que limitaba la atenuación máxima a 1.0dB/km en las longitudes de onda de operación (1310 nm y 1550 nm), correspondía a las fibras monomodo descritas por la Recomendación ITU-T G.652.A y G.652.B. Estas fibras, fabricadas con procesos de síntesis de sílice de los años 80 y 90, presentaban niveles de atenuación inherentemente más altos y un perfil de dispersión cromática menos optimizado. Con el perfeccionamiento de las técnicas de Fabricación por Deposición de Vapor Modificado (MCVD) y la Deposición de Vapor en Fase de Plasma (PCVD), se logró producir fibras con una pureza radicalmente superior, reduciendo la atenuación a valores cercanos al límite teórico de Rayleigh (~ 0.17 dB/km en 1550 nm). Esto condujo a la estandarización de la fibra G.652.D por parte de la ITU-T, la cual prescribe una atenuación máxima de 0.4 dB/km en el rango espectral extendido de 1260 a 1625 nm, incluyendo la ventana de la banda E. En respuesta a este avance, el estándar ISO/IEC 11801 consolidó la nueva clasificación OS2, diseñada específicamente para englobar las fibras que cumplen con los exigentes parámetros de la G.652.D. En la actualidad, la especificación OS2 / G.652.D / IEC B1.3 constituye el estándar de facto universal para fibra monomodo en aplicaciones de telecomunicaciones y cableado estructurado, relegando a OS1 a un estado puramente histórico y teórico.

4.- RELACION ENTRE NORMAS DE LOS CUERPOS DE ESTANDARIZACION INTERNACIONALES

El ecosistema de la estandarización de la fibra óptica opera en tres capas complementarias y jerárquicas:

Capa de Especificación del Producto (IEC/ISO): En la base, las normas IEC 60793 e IEC 60794 (publicadas conjuntamente con ISO) establecen los requisitos fundamentales de fabricación, las propiedades materiales y los métodos de ensayo para las fibras y cables. Son la condición necesaria para la existencia del producto.

Capa de Clasificación para Aplicación (ISO/IEC-TIA): Sobre ella, estándares como ISO/IEC 11801 y TIA-568 traducen esas especificaciones técnicas en clases de rendimiento (OM/OS) comprensibles para el mercado, vinculándolas a las distancias y velocidades de las aplicaciones de red. Son el lenguaje común entre fabricantes, instaladores y usuarios finales.

Capa de Sistemas de Telecomunicaciones (UIT-T): En la cúspide, las Recomendaciones UIT-T de las series G definen los requisitos de rendimiento para la integración de estos componentes en redes públicas de transporte y acceso. Tienen un estatus cuasi-regulatorio y su cumplimiento es obligatorio para la interoperabilidad en redes de operadores.

Un fabricante, por tanto, se guía primariamente por la IEC para diseñar y producir, pero debe validar y comercializar su producto según las clasificaciones de la ISO y, críticamente, asegurar su cumplimiento con la UIT-T si su destino es la red pública. Esta trilogía garantiza que un cable de fibra óptica sea técnicamente sólido, comercialmente viable y compatible con la infraestructura global.

Teniendo en cuenta estos aspectos, es posible definir una serie de equivalencias entre los distintos estándares, aunque es importante aclarar que no es una equivalencia 1:1 en el sentido estricto sino relaciones técnicas y funcionales establecidas por referencias cruzadas entre los organismos de estandarización. Si hay un caso específico de correspondencia completa y directa para la fibra G.652.D como se aprecia en la tabla 3.

La única relación de equivalencia completa y directa entre los tres organismos es la existente entre los estándares G.652.D, el IEC 60793-2-50 B1.3 y el ISO/IEC 11801 OS2.

Las fibras especializadas (G.654, G.655, G.656), no tienen clasificación ISO/IEC porque están fuera del alcance del cableado estructurado genérico (ISO/IEC 11801), que se centra en las redes de distribución en edificios y campus.

Para fibra multimodo, no existe una equivalencia directa con UIT-T en la práctica del mercado. La relación es, por ejemplo para las fibras OM4:

1. IEC define el producto físico (A1a.3).
2. ISO/IEC 11801 crea una clase de aplicación (OM4) basada en ese producto.
3. ITU-T G.651.1 ofrece una caracterización técnica paralela (M4) que es usada casi exclusivamente en contextos de especificación técnica profunda, no en diseño de cableado.

Mientras que las fibras multimodo de banda ancha (WBMMF) están plenamente estandarizadas a nivel de producto y aplicación por la IEC (A1a.4) y ISO/IEC (OM5), respectivamente, la correspondiente recomendación del sector de las telecomunicaciones, la ITU-T G.651.2, aún no ha sido publicada oficialmente. Este desfase ilustra la dinámica diferente de los organismos de normalización: mientras que ISO/IEC e IEC pueden responder rápidamente a las necesidades del mercado de componentes y cableado, la UIT-T, al enfocarse en la interoperabilidad de sistemas de telecomunicaciones, puede tener ciclos de estandarización más largos para tecnologías emergentes. En la práctica, las fibras OM5 se despliegan comercialmente bajo el paraguas de los estándares ISO/IEC e IEC, a la espera de una eventual homologación UIT-T.

La tabla 3 demuestra que el ecosistema de estandarización opera bajo un principio de división de responsabilidades y referencias cruzadas, no de duplicación. Para fines prácticos de especificación:

- Un fabricante diseña y prueba según IEC 60793.
- Un operador de telecomunicaciones adquiere e instala según UIT-T G.65x.
- Un diseñador de infraestructura (centros de datos, edificios) especifica según ISO/IEC 11801 (OMx/OS2).

La correspondencia G.652.D / OS2 / IEC B1.3 es la excepción que confirma la regla, mostrando una perfecta alineación para el caso más universal. Para todas las demás fibras, la "equivalencia" debe entenderse como una relación de cumplimiento en cascada, donde un estándar define el producto, otro califica su uso en sistemas de red, y un tercero clasifica su aplicación en proyectos de cableado.

Tabla 3
Correspondencias entre normas de los diferentes cuerpos de estandarización internacionales

Rec. UIT-T	ISO/IEC 11801 (Clase de Aplicación)	IEC 60793 (Especificación de Producto)	Característica Técnica Definitoria	Tipo de Correspondencia
G.652.A	OS1 (obsoleta)	B1.1 (con PMD ≤ 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	Atenuación ≤ 0.5 dB/km en 1310/1550 nm.	Referencia Histórica: OS1 se basaba en G.652.A/B.
G.652.B	(No clasificado)	B1.1 (con PMD ≤ 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	PMD reducido (≤ 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$). Mejorado para 10Gb/s.	Especificación IEC detallada.
G.652.C	(No clasificado)	B1.3 (con baja atenuación @ 1383 nm)	Atenuación ≤ 0.4 dB/km en la ventana de 1383 nm.	El producto IEC B1.3 cumple con los requisitos de G.652.C.
G.652.D	OS2	B1.3 (con atenuación ≤ 0.4 dB/km en 1260-1625 nm)	Atenuación ultrabaja en todo el espectro (1260-1625 nm). Bajo PMD.	Correspondencia Técnica Completa: G.652.D \equiv OS2 \leftarrow B1.3. Es la única triada con equivalencia funcional total [22,28,34].
G.654.E	*(No aplica - fuera de alcance de 11801)*	B1.2 / Especificación personalizada para ULL	Atenuación ≤ 0.168 dB/km @ 1550 nm. Área de modo grande ($>110 \mu\text{m}^2$).	IEC define la categoría de atenuación (B1.2), ITU define los parámetros de sistema para G.654.E.
G.655 (Todas)	*(No aplica - fuera de alcance de 11801)*	B4	Dispersión no nula en 1550 nm para suprimir FWM en DWDM.	La categoría B4 de la IEC engloba los requisitos de producto para las fibras NZ-DSF de la serie G.655.
G.657.A1	"Fibra de baja curvatura" (Clasificación genérica)	B6_a1	Radio de curvatura mínimo: 10 mm. Compatibilidad total con G.652.	Equivalencia de Especificación: G.657.A1 \equiv B6_a1 [27, 35].
G.657.A2	"Fibra de baja curvatura" (Clasificación genérica)	B6_a2	Radio de curvatura mínimo: 7.5 mm. Compatibilidad total con G.652.	Equivalencia de Especificación: G.657.A2 \equiv B6_a2 [27, 35].
(No aplicable)	OM1 (62.5/125 μm)	A1b	Ancho de banda OFL ≥ 200 MHz \cdot km @ 850 nm.	OM1 es una clasificación de aplicación para el producto A1b de la IEC.
(No aplicable)	OM2 (50/125 μm)	A1a.1	Ancho de banda OFL ≥ 500 MHz \cdot km @ 850 nm.	OM2 es una clasificación de aplicación para el producto A1a.1 de la IEC.
G.651.1 (Categoría M3)	OM3 (50/125 μm LO)	A1a.2	Ancho de banda EMB (láser) ≥ 2000 MHz \cdot km @ 850 nm.	Correspondencia aproximada: G.651.1 M3 \approx OM3 \leftarrow A1a.2. La IEC define el producto, ITU lo caracteriza, ISO lo clasifica [36, 37].
G.651.1 (Categoría M4)	OM4 (50/125 μm LO)	A1a.3	Ancho de banda EMB (láser) ≥ 4700 MHz \cdot km @ 850 nm.	Correspondencia aproximada: G.651.1 M4 \approx OM4 \leftarrow A1a.3 [36, 37].
G.651.2 (Propuesta)	OM5 (WBMMF)	A1a.4	Ancho de banda EMB especificado en múltiples longitudes de onda (850-950 nm) para SWDM.	Correspondencia conceptual: G.651.2 (prop.) \approx OM5 \leftarrow A1a.4 [37, 38].

5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una revisión sistemática de la evolución histórica, la clasificación técnica y el marco regulatorio de las fibras ópticas, estableciendo una base fundamental para comprender su estado actual y tendencias futuras.

La trayectoria de la fibra óptica, desde su conceptualización en la década de 1960 hasta su consolidación como columna vertebral de las telecomunicaciones globales, puede estructurarse en cinco etapas claramente diferenciadas. La primera etapa (1960-1970) marcada por los fundamentos teóricos de Kao y Hockham y la demostración práctica de Corning, que establecieron la viabilidad de la transmisión óptica de baja atenuación. La segunda etapa (1970-1985) donde se produjo la diversificación tecnológica entre fibras monomodo y multimodo, y el surgimiento de los primeros sistemas comerciales. La tercera etapa (1985-2000) que representó la expansión global y normalización, con la estandarización UIT-T y el despliegue de cables submarinos transoceánicos que conectaron continentes. La cuarta etapa (2000-2020) que se caracterizó por la especialización y optimización para aplicaciones específicas, dando lugar a familias de fibras como las insensibles a la curvatura (G.657) y las de atenuación ultra baja (G.654.E). Finalmente, la quinta etapa (2020-presente) que introduce paradigmas disruptivos como las fibras de cristal fotónico, la multiplexación espacial y las aplicaciones en comunicaciones cuánticas, estableciendo las tendencias actuales de investigación en este campo.

El desarrollo y adopción masiva de la tecnología de fibra óptica ha estado intrínsecamente ligado a la creación de un robusto ecosistema de estandarización. Este ecosistema opera en tres capas complementarias y jerárquicas: (1) la capa de especificación del producto (IEC/ISO 60793), que define los requisitos fundamentales de fabricación y métodos de ensayo; (2) la capa de clasificación para aplicación (ISO/IEC 11801, TIA-568), que traduce especificaciones técnicas en clases de rendimiento comprensibles para el mercado (OM/OS); y (3) la capa de sistemas de telecomunicaciones (Recomendaciones UIT-T serie G), que establece los requisitos para la integración en redes públicas. La única equivalencia completa entre estos organismos se da para la fibra monomodo universal: G.652.D (UIT-T) \equiv OS2 (ISO/IEC) \equiv B1.3 (IEC), demostrando una perfecta alineación para el caso más extendido. Para las demás fibras, la relación es de cumplimiento en cascada y referencia cruzada, no de duplicación.

La revisión evidencia una correlación directa entre las características técnicas de las fibras y sus dominios de aplicación. Las fibras monomodo estandarizadas por la UIT-T (G.652 a G.657) dominan las redes de transporte de operadores, dorsales de larga distancia y acceso FTTH, donde la capacidad, distancia y bajo costo total de propiedad son críticos. Las fibras multimodo clasificadas por ISO/IEC (OM1 a OM5) encuentran su nicho en centros de datos y redes de área local de corto alcance, donde la facilidad de instalación y el costo inicial son prioritarios. Más allá de las telecomunicaciones, fibras especializadas (de cristal fotónico, con recubrimientos funcionales, de plástico) habilitan aplicaciones emergentes en sensado distribuido, instrumentación médica, iluminación y procesamiento industrial con láser, demostrando la versatilidad de la tecnología de guiado de luz.

Esta primera parte ha sentado las bases históricas, técnicas y regulatorias necesarias para comprender el estado del arte. La Parte II de este trabajo se dedicará a explorar en profundidad las tendencias actuales y futuras en el desarrollo de fibras ópticas. Se analizarán los nuevos tipos de fibra en investigación y desarrollo, como las fibras multinúcleo (MCF), las fibras de pocos modos (FMF), las fibras huecas antiresonantes (HC-ARF) y las diseñadas para comunicaciones cuánticas (QKD). Asimismo, se examinará el estado de sus procesos de estandarización y se presentarán las principales áreas de esfuerzo en I+D, tanto para continuar impulsando el crecimiento de las redes de telecomunicaciones como para expandir sus fronteras de aplicación en otras áreas. El recorrido histórico y normativo presentado aquí constituye por tanto una base conceptual indispensable abordar el estado actual de la tecnología de fibras ópticas.

REFERENCIAS

1. Maiman TH. Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*. 1960 Aug;187(4736):493-4.
2. Kao KC, Hockham GA. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proc IEE*. 1966 Jul;113(7):1151-8.
3. Kapron FP, Keck DB, Maurer RD. Radiation losses in glass optical waveguides. *Appl Phys Lett*. 1970 Nov;17(10):423-5.
4. Keck DB, Maurer RD, Schultz PC. On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides. *Appl Phys Lett*. 1973 Apr;22(7):307-9.
5. Runge PK, Trischitta PR. The SL undersea lightwave system. *IEEE J Sel Areas Commun*. 1984 Sep;2(6):784-93.
6. Chraplyvy AR. Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities. *J Lightwave Technol*. 1990 Oct;8(10):1548-57.
7. Sanferrare RJ. Undersea lightwave systems. *IEEE Commun Mag*. 1987 May;25(5):24-31.
8. Iizuka K, Kobayashi T. Wavelength division multiplexing transmission systems. *IEEE J Sel Areas Commun*. 1990 Aug;8(6):1021-30.
9. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*. New York: Wiley; 1994.
10. Sillard P, et al. Bend-insensitive fibers for FTTH applications. *Opt Fiber Technol*. 2011 Oct;17(5):453-60.
11. Miyamoto Y, et al. Advanced optical fiber for long-haul submarine transmission systems. *J Lightwave Technol*. 2016 Jan;34(2):443-52.
12. Winzer PJ, Neilson DT, Chraplyvy AR. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Opt. Express*. 2018 Sep;26(18):24190-239. doi: 10.1364/OE.26.024190.
13. Russell PSJ. Photonic-crystal fibers. *J Lightwave Technol*. 2006 Dec;24(12):4729-49.
14. Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber. *Opt Express*. 2014 Oct;22(20):23807-28.
15. Mangan BJ, et al. Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2004; Los Angeles, CA, USA*.
16. Lo HK, Curty M, Tamaki K. Secure quantum key distribution. *Nature Photon*. 2014 Aug;8(8):595-604.
17. Wengerowsky S, et al. An entanglement-based network over installed fibre. *Science*. 2022 Apr;376(6590):203-7.
18. Richardson DJ, Fini JM, Nelson LE. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photon*. 2013 May;7(5):354-

62.

19. Sillard P, et al. Low-differential-mode-group-delay 9-LP-mode fiber. *J Lightwave Technol.* 2016 Jan;34(2):425-30.
20. ITU-T. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable for the 1300 nm wavelength region. ITU-T Recommendation G.654.2. 2020 Nov.
21. Shibahara K, et al. High-capacity space-division multiplexing transmission over multimode and multicore fibers for long-haul applications. *J Lightwave Technol.* 2020 Jan;38(1):195-203.
22. ITU-T. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. ITU-T Recommendation G.652. 2022 Dec.
23. ITU-T. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. ITU-T Recommendation G.653. 2010 Nov.
24. ITU-T. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable. ITU-T Recommendation G.654. 2020 Nov.
25. ITU-T. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. ITU-T Recommendation G.655. 2016 Nov.
26. ITU-T. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport. ITU-T Recommendation G.656. 2010 Oct.
27. ITU-T. Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network. ITU-T Recommendation G.657. 2016 Nov.
28. ISO/IEC. Information technology — Generic cabling for customer premises. ISO/IEC 11801-1:2017. 2017.
29. IEEE 802.3 Working Group. IEEE standard for Ethernet. IEEE Std 802.3-2022. 2022;1-7029.
30. Hecht J. Understanding fiber optics. 5th ed. Pearson; 2015. p. 345-50.
31. TIA. Optical fiber cabling component standard. ANSI/TIA-568.3-E. 2021.
32. IEEE 802.3 Working Group. IEEE standard for Ethernet — Section 3: media access control parameters, physical layers, and management parameters for 10 Gb/s operation. IEEE Std 802.3ae-2002. 2002.
33. Bickham SR, et al. Advanced multimode fibers for short-reach optical interconnects. *J Lightwave Technol.* 2018 Jan;36(2):417-23.
34. IEC. Optical fibres — Part 2-50: product specifications — sectional specification for class B single-mode fibres. IEC 60793-2-50:2018. 2018.
35. IEC. Optical fibres — Part 2-50: product specifications — sectional specification for class B single-mode fibres — bending-loss insensitive single-mode optical fibres. IEC 60793-2-50:2018, Annex B. 2018.
36. ITU-T. Characteristics of a 50/125 μm multimode optical fibre and cable. ITU-T Recommendation G.651.1. 2007 Nov.
37. IEC. Optical fibres — Part 2-10: product specifications — sectional specification for category A1 multimode fibres. IEC 60793-2-10:2019. 2019.
38. ISO/IEC. Information technology — Generic cabling for customer premises — Part 1: general requirements — Amendment 1. ISO/IEC 11801-1:2017/Amd 1:2020. 2020.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de la Institución o las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Durante la realización del presente trabajo ambos autores han compartido por igual las responsabilidades de conceptualización, investigación, la validación, así como la redacción del borrador original y la revisión y edición del mismo.

AUTORES

Dioen Biosca Rojas, Profesor titular, doctor en ciencias técnicas, es profesor adjunto del Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE y especialista superior en redes de transporte IP y DWDM de la empresa COPAL, en la Habana, Cuba, dioen.biosca_rojas.ext@nokia.com. Sus principales intereses de investigación son la simulación de sistemas y redes de telecomunicaciones, los sistemas de IoT y monitorización remota distribuida así como los sistemas y redes de comunicaciones ópticas. No. ORCID: 0000-0001-5880-6718.

Rene Yañez de la Rivera, Profesor titular, doctor en ciencias técnicas, es profesor adjunto del Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE y de la Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saiz Montes de Oca”, en la Habana, Cuba, ryanez@tele.cujae.edu.cu. Sus principales intereses de investigación son los sistemas de procesamiento de señales así como las redes de telecomunicaciones en general, con particular incidencia en las redes ópticas. No. ORCID: 0000-0002-4045-4512.



Esta revista se publica bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional