



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

Dioen Biosca Rojas, René Yañez de la Rivera

RESUMEN / ABSTRACT

La primera parte de este trabajo presentó la consolidación de un ecosistema normativo maduro, representado por la serie G de la UIT-T y otras normas de la industria. Esta segunda parte se centra en la diversificación sin precedentes que ha experimentado la tecnología de fibra óptica, extendiendo su dominio más allá de las telecomunicaciones hacia el sensado en entornos extremos, la instrumentación biomédica, el procesamiento industrial de materiales y la investigación científica avanzada. Esta revisión presenta un análisis sistemático del estado del arte, organizado en torno a cuatro ejes de clasificación complementarios: principio físico de guiado, material y arquitectura, función primaria y dominio de aplicación. Se examina la evolución reciente de los estándares ITU-T, documentando mejoras cuantitativas en fibras G.652.D y G.654.E que habilitan sistemas 1.6T. Se analizan las fibras de núcleo hueco (HC-ARF, NANF) que alcanzan atenuaciones de 0.16 dB/km y latencias un 30% inferiores a las fibras convencionales. Se revisan las fibras de cristal fotónico (PCF), fibras multinúcleo (MCF) para multiplexación espacial (SDM) con récords de 1.02 Pb/s, y fibras de vidrios blandos (fluoruros, calcogenuros) para el infrarrojo medio. Se propone un marco taxonómico estructurado de clasificación, conceptos y relaciones, que facilite la navegación y comprensión del diversificado campo de la fotónica de fibra óptica moderna.

Palabras claves: Fibras ópticas, estándares ITU-T, fibras de núcleo hueco, fibras de cristal fotónico, multiplexación espacial.

ABSTRACT

The first part of this work presented the consolidation of a mature regulatory ecosystem, represented by the ITU-T G-series and other industry standards. This second part focuses on the unprecedented diversification that optical fiber technology has experienced, extending its domain beyond telecommunications towards sensing in extreme environments, biomedical instrumentation, industrial materials processing, and advanced scientific research. This review presents a systematic analysis of the state of the art, organized around four complementary classification axes: guiding physical principle, material and architecture, primary function, and application domain. The recent evolution of ITU-T standards is examined, documenting quantitative improvements in G.652.D and G.654.E fibers that enable 1.6T systems. Hollow-core fibers (HC-ARF, NANF) achieving attenuations of 0.16 dB/km and latencies 30% lower than conventional fibers are analyzed. Photonic crystal fibers (PCF), multi-core fibers (MCF) for spatial division multiplexing (SDM) with records of 1.02 Pb/s, and soft glass fibers (fluorides, chalcogenides) for the mid-infrared are reviewed. A structured taxonomic framework of classification, concepts, and relationships is proposed to facilitate navigation and understanding of the diversified field of modern optical fiber photonics.

Keywords: Optical fibers, ITU-T standards, hollow-core fibers, photonic crystal fibers, spatial division multiplexing, active.

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

Recibido: 02/2026 Aceptado: 04/2026

1.- INTRODUCCIÓN

Abordar el escenario actual de la tecnología de fibra óptica constituye un reto mayúsculo debido a la extraordinaria diversificación que ha experimentado en la última década. Esta realidad no se circunscribe únicamente al ámbito de las telecomunicaciones —donde la optimización de parámetros de transmisión para sistemas de nueva generación (800G, 1.6T) continúa su marcha incesante— sino que se extiende a dominios tan variados como el sensado en condiciones extremas [29], las aplicaciones médicas y biotecnológicas [7], los sistemas de iluminación, el procesado industrial de materiales con láser de alta potencia [27, 28] y la investigación científica avanzada [32].

La necesidad de organizar conceptualmente este vasto y complejo entramado tecnológico constituye el objetivo principal de esta segunda parte de la revisión presentada, además de la identificación de las líneas fundamentales de I+D en el fascinante campo actual de las fibras ópticas. Como referencia, se parte de la evolución que han experimentado los estándares de la serie G de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) desde sus últimas actualizaciones formales (2016-2022) hasta las enmiendas más recientes de 2024-2025 y los trabajos en curso. Sobre esta base, se propone un enfoque de clasificación estructurado en cuatro ejes fundamentales:

1. **Principio físico dominante:** Reflexión total interna (RTI) vs. efectos de interferencia (banda prohibida fotónica, guiado antirresonante).
2. **Material y arquitectura:** Sílice, vidrios fluoruros, calcogenuros, polímeros; arquitecturas sólidas, microestructuradas, multinúcleo, de núcleo hueco.
3. **Función primaria:** Transmisión de señales, generación/entrega de potencia, sensado intrínseco, procesamiento de señales e interfaz con sistemas cuánticos o biológicos.
4. **Dominio de aplicación vertical:** Telecomunicaciones terrestres/submarinas, centros de datos, sensado industrial, aeroespacial/defensa, dispositivos médicos, instrumentación científica, procesado industrial de materiales.

Estos ejes no son mutuamente excluyentes; por el contrario, definen un espacio multidimensional en el que cada fibra ocupa una posición única. Una misma fibra —por ejemplo, una fibra de núcleo hueco antirresonante (HC-ARF)— debe ser clasificada simultáneamente por su principio físico (guiado antirresonante), por su material (sílice microestructurada), por su función (transmisión de baja latencia) y por sus aplicaciones dominantes (comunicaciones cuánticas y entrega de potencia láser) [26, 27]. Esta multidimensionalidad constituye la marca distintiva de las nuevas generaciones de fibras ópticas.

La irrupción de la inteligencia artificial distribuida, el metaverso industrial y la computación cuántica híbrida han actuado como catalizadores de innovaciones fundamentales incluso en fibras consideradas "maduras", transformándolas de medios pasivos a componentes activamente optimizados para ecosistemas específicos [1, 5]. Paralelamente, tecnologías disruptivas como las fibras de núcleo hueco (HCF) han demostrado su madurez comercial con la realización de ensayos de campo que han demostrado su viabilidad para redes metropolitanas como se presenta en [1].

Esta segunda parte de la revisión se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 examina la evolución reciente de los estándares establecidos (G.652, G.654, G.655, G.656, G.657, G.651.1, G.659) y los esfuerzos de estandarización emergentes para fibras SDM (*Space Division Multiplex*) y redes cuánticas. La Sección 3 desarrolla la clasificación por principio físico, con énfasis en las fibras de cristal fotónico (PCF *Photonic Crystal Fibers*) y sus variantes. La Sección 4 aborda la clasificación por material y arquitectura. La Sección 5 introduce la clasificación por función primaria, incorporando la distinción transversal entre fibras pasivas y activas. La Sección 6 presenta la clasificación por dominio de aplicación vertical, con especial atención al procesado industrial de materiales. Finalmente, la Sección 7 ofrece conclusiones y perspectivas futuras.

2.- EVOLUCIÓN DE LOS ESTANDARES ESTABLECIDOS

Los últimos años han sido testigos de una aceleración sin precedentes en la demanda de capacidad de red, impulsada por la proliferación de la inteligencia artificial distribuida, el metaverso industrial y la computación cuántica híbrida. Estos vectores han catalizado innovaciones fundamentales incluso en fibras "maduras", transformándolas de medios pasivos a componentes activamente optimizados para ecosistemas específicos [1, 5].

2.1. Caso de las fibras G.652.D: Compatibilidad extendida.

Los sistemas 800G/1.6T que emplean conformación probabilística de la constelación (PCS *Probabilistic Constellation Shaping*) y modulaciones 128-QAM requieren relaciones señal-ruido extremadamente altas, siendo particularmente sensibles

a efectos no lineales de cuarto orden como la modulación de fase cruzada (XPM *Cross Phase Modulation*) y la mezcla de cuatro ondas (FWM *Four Wave Mixing*) [14]. En los últimos años se han desarrollado nuevos diseños de fibras G.652.D que incorporan perfiles de índice "pre-distorsionados" que anticipan y compensan efectos no lineales específicos de formatos QAM-128/256 [14]. Se han desarrollado recubrimientos poliméricos de tercera generación con nanopartículas de grafeno funcionalizado que disipan calor de modo radialmente uniforme, disminuyendo la variación del índice de refracción por efecto termo-óptico [1]. Adicionalmente, se han desarrollado variantes optimizadas para acoplamiento con sistemas de multiplexación espacial (SDM), tanto para compatibilidad con fibras de varios núcleos (MCF *Multi Core Fibers*) como con fibras de pocos modos (FMF *Few Mode Fibers*) [3, 24], tipos de fibras que se revisarán un poco mas en detalle en lo adelante. La Tabla 1 resume cuantitativamente las mejoras experimentadas por las fibras G.652.D hasta 2026 [16, 62, 63].

Tabla 1
Datos cuantitativos de mejora en el estándar G.652.D hasta 2026

Parámetro	G.652.D Estándar (2022)	G.652.D Avanzada (2026)	Mejora	Impacto en Sistema
Atenuación @ 1550 nm	0.19 dB/km	0.165 dB/km	13%	+3 dB de margen en 100 km
PMD (mediana)	0.05 ps/√km	0.018 ps/√km	64%	Permite 1.6T coherente a 2000 km
Umbral SBS	7 dBm	9.5 dBm	36%	+2.5 dBm de potencia transmitible
Radio de curvatura (10 mm, 100 vueltas)	0.5 dB pérdida	0.15 dB pérdida	70%	Mayor densidad en centros de datos
Consistencia λ_0	±20 nm	±5 nm	75%	Mejor uniformidad en redes DWDM

Fuente: Compilado de [3], [5], [14]

2.2. Caso de las fibras G.654.E: Más allá de la atenuación ultra baja.

La fibra G.654.E (ULL *Ultra Low Loss*) experimentó un avance fundamental en 2024 con la transición de perfiles escalonados simples a perfiles "multi-trench" con compensación activa de dispersión. Esta arquitectura logra aumentar el área efectiva a más de 150 μm^2 manteniendo la compatibilidad con amplificación Raman distribuida [15]. Se ha añadido una variación controlada del perfil de índice a lo largo de la fibra (periodos de 2-5 km) para implementar manejo de dispersión intrínseco, eliminando la necesidad de módulos DCM (*Dispersion Compensation Module*) en sistemas de hasta 1500 km [2]. La Tabla 2 muestra las mejoras cuantitativas de las fibras G.654.E en el periodo reciente hasta 2026 [17].

Tabla 2
Datos cuantitativos de mejora en el estándar G.654.E de hasta 2026

Parámetro	G.654.E Estándar (2022)	G.654.E Avanzada (2026)	Mejora	Impacto en Sistema
Atenuación mínima	0.168 dB/km	0.142 dB/km	15%	+26% mayor alcance
Aeff típico	130 μm^2	165 μm^2	27%	Reducción de 35% en efectos no lineales
Relación no lineal efectiva	$0.8 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$	$0.55 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$	31%	Permite +2 dBm de potencia por canal
Consistencia de dispersión	±0.5 ps/nm·km	±0.15 ps/nm·km	70%	Simplifica diseño de sistemas coherentes
PMD máximo garantizado	0.05 ps/√km	0.02 ps/√km	60%	Habilita 1.6T PM-256QAM a >8000 km

Fuente: Compilado de [4], [6], [15]

2.3. Actualizaciones en otros estándares de la serie G.

UIT-T G.653 (DSF - *Dispersion-Shifted Fiber*): Aunque históricamente considerada obsoleta para DWDM debido a su susceptibilidad a FWM, ha experimentado un interés renovado para aplicaciones de sensado cuántico. Proyectos del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) de 2025, han explorado la distribución de entrelazamiento temporal sobre 50 km de DSF modificada, explotando su dispersión cero en 1550 nm para preservar correlaciones cuánticas [11, 12, 13].

UIT-T G.655 (NZ-DSF - *Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*): La evolución se ha centrado en fibras de banda extendida (S+C+L) con pendientes de dispersión aplanadas mediante perfiles de índice con múltiples capas [19]. La reducción sistemática de PMD desde <0.2 ps/√km (2016) a <0.03 ps/√km (2026) mediante control de circularidad con retroalimentación óptica cuántica habilita velocidades de transmisión de 1.6T con 256QAM en distancias superiores a los 2000 km [19]. Prototipos de Nokia Bell Labs ("Tunable-D G.655") incorporan materiales electro-ópticos en el revestimiento que permiten ajuste dinámico de dispersión de ±2 ps/nm·km [20].

UIT-T G.656 (WB NZ-DSF - *WideBand Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*): Las mejoras se han centrado en el control preciso del perfil de dispersión en toda la banda extendida (S, C y L) [21, 22], la optimización para alta eficiencia en amplificación Raman distribuida [15, 22], y la compatibilidad retrospectiva con SDM mediante revestimientos de 124.5 μm para empaquetamiento denso [24]. Se han desarrollado variantes para comunicaciones cuánticas-clásicas con dopaje de tierras raras que reducen la tasa de error cuántico (QBER) en un 30% [11, 66].

UIT-T G.657 (BIF - *Bend-Insensitive Fiber*): Posterior a su actualización de 2022, su desarrollo ha continuado hacia la propuesta G.657.C ("*Macrobend-Immune*") con especificaciones para curvaturas de 5 mm y pérdidas inferiores a los 0.1dB/100vueltas, empleando perfiles *multi-trench* y recubrimientos de baja rigidez [23, 25, 51, 53, 54, 55, 67].

UIT-T G.651.1 (MMF - *Multi-Mode Fiber*): Su evolución se ha intensificado con la extensión de OM5 de 850-950 nm a 840-980 nm para soportar 400GbE y 800GbE mediante SWDM4 [3, 23, 55]. Se han desarrollado fibras multimodo de pocos modos para SDM de corto alcance en sistemas de aprendizaje automático, y variantes con atenuación reducida en ventanas infrarrojas (<1.5 dB/km @1080 nm) para distribución de señales de sincronización en aceleradores de partículas.

UIT-T G.659 (CWDM *Fiber*): Nuevos diseños para soportar 24 canales CWDM (1271-1611 nm) con espaciamiento de 20 nm, optimizados para XGS-PON y 50G-PON [9].

2.4. Esfuerzos de estandarización emergentes.

El sector de normalización de la UIT-T, a través de su Grupo de Estudio 15 (SG15), se encuentra inmerso en el desarrollo de estándares para dos categorías avanzadas [2, 4]:

G.SDM (Multiplexación por División Espacial): La futura Recomendación establecerá especificaciones para fibras que explotan la dimensión espacial: fibras de múltiples núcleos (MCF) con 19 o 37 núcleos independientes [1, 24, 47]; fibras de pocos modos (FMF) que guían entre 6 y 15 modos espaciales; y fibras híbridas (HBF) que combinan ambas tecnologías [24]. El trabajo de normalización (Cuestión 6/15) se centra en definir la diafonía permisible entre núcleos, la dispersión modal diferencial y los métodos de medición [4, 18]. Ver también [56, 58, 59, 65, 76].

Fibras para comunicaciones cuánticas: Aunque sin recomendación formal (G.qfiber), los requisitos se definen en el Grupo de Enfoque NET-2030 y la serie Y.3800 [12]. Los parámetros críticos incluyen estabilidad de polarización, minimización de ruido no lineal por dispersión Raman y Brillouin, y control preciso de la dispersión cromática para preservar estados cuánticos [11, 13]. Consultar referencias adicionales [60, 61, 66].

3. CLASIFICACIÓN POR PRINCIPIO FÍSICO DOMINANTE

El principio físico se refiere al mecanismo de guiado de la luz en la fibra. En la actualidad, estos mecanismos se agrupan en dos familias principales: guiado por modificación del índice de refracción y guiado por efectos de interferencia y resonancia en diseños microestructurados [25, 26].

3.1. Guiado por modificación del índice de refracción.

Reflexión total interna (RTI) en perfil escalón: Confinamiento por diferencia abrupta del índice de refracción (Ley de Snell). Sustenta las fibras monomodo estándar (G.652) y de ultra baja pérdida (ULL) para telecomunicaciones de larga distancia [1, 10].

RTI en perfil gradual: Perfil parabólico de índice que reduce la dispersión modal, permitiendo su uso en fibras multimodo de índice gradual (GI-MMF *Graded Index Multi Mode Fiber*) para multiplexación espacial en centros de datos [3, 23].

3.2. Guiado por efectos de interferencia y resonancia.

Banda Prohibida Fotónica (PBG: *Prohibited Band Gap*): Propio de las fibras de cristal fotónico de núcleo hueco (HC-PCF *Hollow Core Photonic Crystal Fiber*). Confinan la luz en un núcleo de aire mediante una estructura periódica de aberturas alrededor del núcleo, ofreciendo latencia y no linealidades radicalmente reducidas [4, 25].

Reflexión Antirresonante (ARROW: *Anti Resonant Reflecting Optical Waveguide*): Implementado en fibras huecas de tubos anidados (NANF *Nested Antiresonant Nodeless Fiber*), logra bajísimas atenuaciones al confinar la luz por interferencia destructiva en las delgadas paredes de vidrio que rodean el núcleo [2, 26]. Las HC-ARF (*Hollow Core Anti Resonant Fibers*) de nueva generación con diseño "revolver" (6-8 tubos con revestimientos delgados) han alcanzado 0.16 dB/km a 1550 nm y anchos de banda >500 nm [26], posicionándose como tecnología disruptiva para transmisión de baja latencia y sensado. La Tabla 3 resume la clasificación de fibras en base a su principio físico.

Tabla 3
Clasificación por principio físico de guiado

Tipo de Guiado	Mecanismo	Principio Físico	Ejemplo de Fibra Moderna	Aplicación Típica
Modificación del índice	RTI - Perfil Escalón	Confinamiento por diferencia abrupta de índice	SMF-28® ULL (G.652.D) [1, 10]	Redes troncales, submarinas
	RTI - Perfil Gradual	Confinamiento por gradiente parabólico	GI-MMF 50/125 para SDM [3, 23]	Centros de datos
Interferencia y resonancia	Banda Prohibida Fotónica (PBG)	Estructura periódica que crea bandgap	HC-PCF (HC-1550) [4, 25]	Baja latencia, sensado de gases
	Reflexión Antirresonante (ARROW)	Interferencia destructiva en paredes delgadas	NANF de tubos anidados [2, 26]	Transmisión próxima generación, láseres

3.3. Fibras de cristal fotónico (PCF): taxonomía avanzada.

Las fibras de cristal fotónico representan una revolución conceptual, abandonando la RTI que dominó la óptica de fibras durante décadas. Su principio de operación se basa en estructuras periódicas dieléctricas a escala nanométrica que crean efectos de banda prohibida fotónica [6, 9].

3.3.1. PCF de guiado por índice (*Index-Guiding* PCF).

Las PCF de guiado por índice son similares a las fibras convencionales pero con revestimiento microestructurado. Un núcleo sólido (típicamente sílice) que está rodeado por una matriz periódica de agujeros de aire que actúan como un revestimiento de índice de refracción efectivo reducido. En estas el mecanismo de guiado es la RTI. Poseen una propiedad única: pueden ser infinitamente monomodo ya que mantienen un modo único de propagación en todo el rango espectral debido al alto contraste de índice de refracción en su estructura..

Variantes:

- **Gran apertura numérica (HNA *High Numerical Aperture*):** Xiao et al. desarrollaron una PCF con NA de 0.55 para entrega eficiente de láser en aplicaciones médicas, demostrando eficiencia de acoplamiento del 92% [1]. Chen et al. reportaron una PCF de sílice pura con NA de 0.6 para espectroscopia Raman, logrando mejora de 15 dB en el nivel de señal detectada [2].
- **Gran área modal (LMA *Large Modal Area*):** Diseñadas con núcleos de 20-50 μm que mantienen operación monomodo mediante el principio "infinitamente monomodo" combinado con baja NA (0.04-0.08). Zervas presentó láseres de fibra de kilovatio basados en LMA-PCF con áreas modales efectivas de hasta 2000 μm^2 [3]. Jain et al. desarrollaron una LMA-PCF con estructura de "pañal estirado" que mantiene operación monomodo hasta 50 μm de diámetro, demostrando 3 kW de potencia continua [4], ver también [48].
- **Altamente no lineales (HNL *Highly Non-Linear*):** Optimizadas para generación de supercontinuo y compresión de pulsos mediante control preciso de dispersión [6, 8].

Las secciones transversales de las diferentes variantes de PCF de guiado por índice pueden apreciarse en la figura 1.

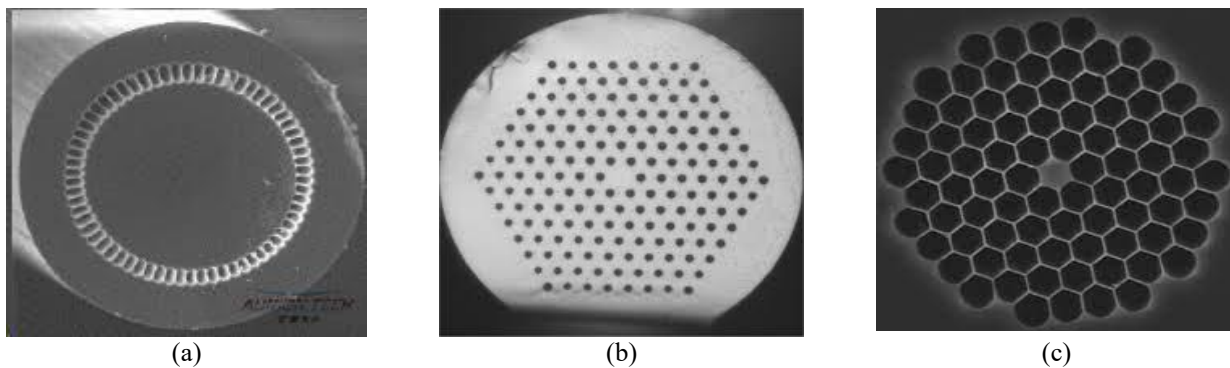


Figura 1.
 Secciones transversales de las variantes de PCF de guiado por índice. (a) De gran apertura numérica, HA (b) De gran área modal, LMA y (c) Altamente no lineal, HNL. [X]

Las investigaciones recientes en PCF de alta NA se han enfocado en optimizar el diseño para aplicaciones biomédicas y de sensado de alta precisión [37] y espectroscopia Raman [38]. La evolución de las LMA-PCF se ha dirigido hacia la maximización de la potencia manejable y la estabilidad modal en sistemas láser de alta potencia [35, 36].

3.3.2. PCF de banda prohibida (*Photonic Bandgap PCF*).

Utilizan la banda prohibida fotónica creada por la periodicidad en su estructura de fabricación para confinar la luz en regiones específicas (núcleo hueco). Hitos históricos en [68, 69].

Variantes:

- **Núcleo de bajo índice:** Sílice porosa ($n \approx 1.1-1.3$) o polímeros fluorados ($n \approx 1.3-1.4$). Aplicaciones en sensado de gases y biosensores [3, 5].
- **Núcleo hueco (HC-PCF):** Más del 99% de la potencia óptica se propaga en medio gaseoso. Jasion et al. (2023) reportaron transmisión de 1.84 Pb/s en HC-PCF [6]. Aplicaciones en trading de alta frecuencia, micro mecanizado, cirugía y espectroscopia de gases [5, 27].
- **Fibras de Bragg:** Revestimiento de múltiples capas concéntricas alternas formando reflector de Bragg cilíndrico. Aplicaciones en guiado de alta potencia en infrarrojo medio (3-5 μm , 8-12 μm) para termografía militar y espectroscopia molecular [8, 9].

Las fibras PCF de núcleo de bajo índice operan mediante banda prohibida fotónica, con un núcleo de sílice porosa o polímeros de índice reducido que, dentro de cierta banda espectral, queda confinado por un revestimiento microestructurado que actúa como reflector perfecto [70]. Este diseño permite transmitir longitudes de onda específicas con atenuación ultrabaja teórica (<0.2 dB/km). Sus aplicaciones incluyen sensores de presión y temperatura, guías para láseres UV [71] y, recientemente, sensores bioquímicos con límites de detección de molaridades del orden de 10^{-12} [72]. Se subclasifican por material (sílice porosa, polímeros fluorados, núcleos de aire parcialmente lleno) y geometría (diseños concéntricos para bandas estrechas, hexagonales deformados para birrefringencia controlada).

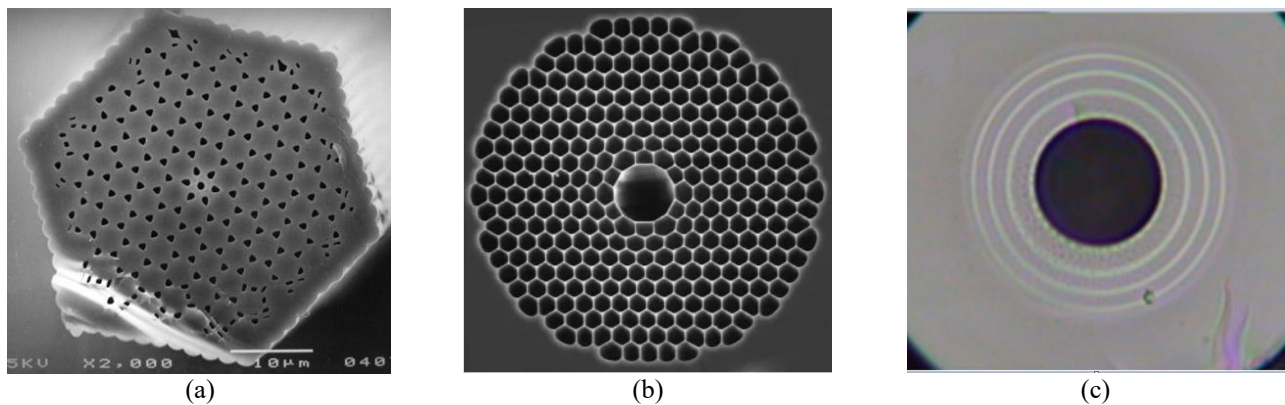


Figura 2.

Secciones transversales de las distintas variantes de PCF de banda prohibida. (a) De núcleo de bajo índice de refracción (b) De núcleo hueco y (c) Fibra de Bragg.

Las PCF de núcleo hueco (HC-PCF), propuestas por Russell (2003) [74], confinan la luz en aire mediante una estructura periódica que crea una banda prohibida fotónica, logrando que $>99\%$ de la potencia se propague en gas/aire. Esto reduce drásticamente la no linealidad, la dispersión y la latencia. Se aplican en comunicaciones de ultra baja latencia (trading de alta frecuencia), transmisión de pulsos láser de alta potencia para micro mecanizado y cirugía [75], y espectroscopia de gases. También han demostrado su potencial para sistemas de capacidad de transmisión extrema [6].

Al confinar la luz en un núcleo hueco, la luz se propaga principalmente en el aire (hasta el 99.9%), no en material sólido. Dada la diferencia de índice de refracción: Sílice: $n \approx 1.45$ vs Aire: $n \approx 1.0003$ y debido a que la velocidad de propagación de la luz en un medio dado es la velocidad de la luz en el vacío entre el índice de refracción del material, o sea $v = c/n$, la luz se propaga por la sílice aproximadamente a un 69% de la velocidad de la luz en el vacío, mientras que por el aire lo hace a un

99.7% de esta. Al lograr este aumento significativo en la velocidad de propagación de la luz en este tipo de PCFs, se obtienen fibras con latencias en la propagación un 30% por debajo con respecto a las de las fibras convencionales, al tiempo que se disminuyen sustancialmente también las pérdidas por absorción del material [4]. Las secciones transversales de las variantes de PCF de banda prohibida pueden apreciarse en la figura 2.

3.3.3. HC-ARF: La frontera actual.

Las fibras anti-resonantes de núcleo hueco (HC-ARF) [40] constituyen la tecnología más prometedora para transmisión de próxima generación. Subclasificación por geometría [41, 42, 44, 46]:

- **Anillo simple (*Single-ring*):** Un anillo de tubos para aplicaciones de baja latencia.
- **Doble anillo (*Double-ring*):** Mayor confinamiento y menor sensibilidad a curvaturas.
- **Tubos anidados (*Nested-tube*):** Alcanzan atenuaciones menores a 0.2 dB/km [2, 26].

Poletti et al. (2022) reportaron HC-ARF con diseño "revolver" que alcanzan 0.16 dB/km a 1550 nm y anchos de banda superiores a los 500 nm, posicionándose para redes troncales de baja latencia [25]. Las HC-PCF se clasifican por mecanismo de confinamiento: HC-PBGF (banda prohibida), HC-ARF (antirresonante) y HC-Kagome (bandas planas). Por geometría: *single-ring* (baja latencia), *double-ring* (mayor confinamiento) y *nested-tube* (atenuaciones <0.2 dB/km). Las HC-ARF de nueva generación con diseño "revolver" alcanzan 0.16 dB/km a 1550 nm y ancho de banda >500 nm, posicionándose para redes troncales de baja latencia [39], ver figuras 3 y 4.

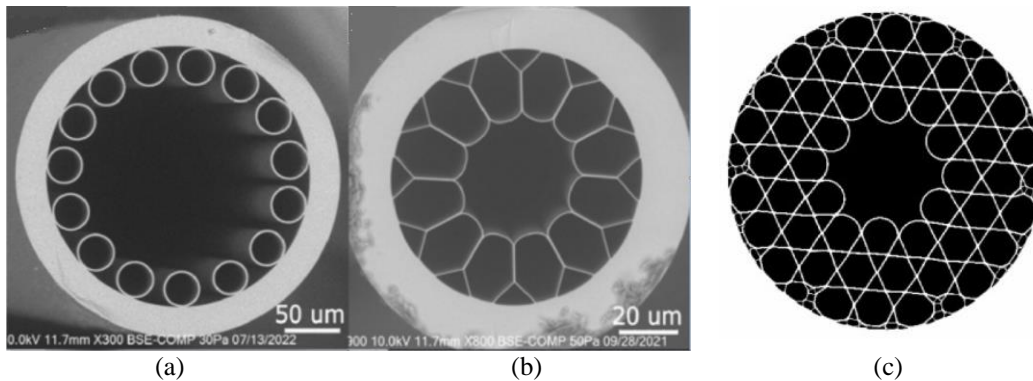


Figura 3.

Secciones transversales de distintas fibras anti-resonantes de núcleo hueco HC-ARF. (a) HC-ARF de anillo simple sin nodos, los capilares en el anillo no se tocan. (b) HC-ARF con nodos, cuando los capilares si se tocan entre si creando puntos de contacto o nodos. (c) HC con estructura de rejilla Kagome.

Las fibras de Bragg, conceptualizadas por Yeh et al. (1978), emplean un revestimiento de capas concéntricas alternas de alto y bajo índice (reflector de Bragg cilíndrico). Ofrecen control preciso del ancho de banda y baja atenuación teórica, con aplicaciones en guiado de alta potencia en infrarrojo medio (3-5 μm y 8-12 μm) para termografía militar, espectroscopia y sensores de fibra (véase, por ejemplo, [43]).

4. CLASIFICACIÓN POR MATERIAL Y ARQUITECTURA

La diversidad funcional de las fibras modernas se sustenta en dos pilares: la química de su composición y la morfología de su estructura.

4.1. Material base.

Vidrios de sílice (SiO_2 dopada): Material dominante para telecomunicaciones y láseres de alta potencia, con gran transparencia (~0.15 dB/km en 1550 nm) y madura infraestructura de fabricación [1, 10]. El dopado con germanio, fósforo o flúor permite ajustar el índice de refracción. Las fibras activas incorporan tierras raras (Er, Yb, Tm) para amplificación y generación láser [4].

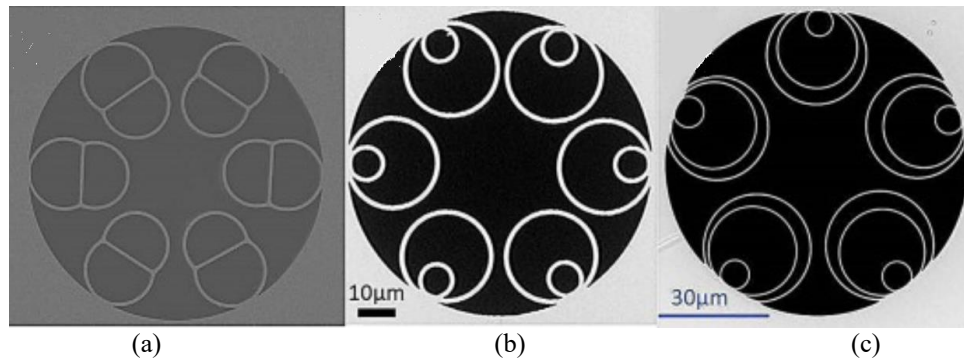


Figura 4.

Secciones transversales de distintas fibras anti-resonantes de núcleo hueco HC-ARF (cont.) (a) HC-ARF de tubos acoplados. (b) HC-ARF de tubos anidados. (c) HC-ARF de tubos doblemente anidados.

Vidrios fluoruros (ZBLAN): Transparencia en infrarrojo medio ($0.4\text{-}4.5\ \mu\text{m}$), bajísimas pérdidas teóricas ($<0.01\ \text{dB/km}$), pero frágiles y de difícil fabricación [32]. Aplicaciones en espectroscopia de IR medio y láseres en $2.7\text{-}3.5\ \mu\text{m}$ [5].

Vidrios calcogenuros (As_2S_3 , Ge-As-Se): Alta no linealidad ($n_2 \sim 10\text{-}100\times \text{SiO}_2$), ventana hasta $10\text{-}12\ \mu\text{m}$, fotosensibles [8]. Generación de supercontinuo en IR medio y conmutación óptica [3]. Salih et al. (2026) revisan técnicas de fabricación de preformas para estos vidrios, destacando el impacto de los métodos de colada directa, extrusión y ensamblaje varilla-tubo en la calidad de la interfaz núcleo/revestimiento y las pérdidas de propagación [5].

Polímeros (PMMA, policarbonato): Alta flexibilidad, gran diámetro de núcleo ($0.5\text{-}1\ \text{mm}$), alta atenuación ($>100\ \text{dB/km}$) [4]. Aplicaciones en redes domésticas/automotriz y sensores de deformación [9].

Materiales híbridos/compuestos: Sílice infiltrada con cristales líquidos para fibras sintonizables eléctricamente; dopado con nanopartículas y materiales 2D (grafeno, MXenes) para funcionalidades ópticas activas [5]. Ver adicionalmente [35-38, 45, 48, 73].

4.2. Arquitectura geométrica.

Sólida estándar (índice gradual/índice escalonado): Núcleo y revestimiento concéntricos. Fabricación madura y bajo costo. Constituyen la base de las redes de telecomunicaciones mundiales [1].

Microestructurada PCF (sólida/hueca): Red de huecos longitudinales que permite control sin precedentes sobre la dispersión y la no linealidad [6]. Subclases: PCF de núcleo sólido para supercontinuo, HC-PCF para baja latencia.

Multinúcleo (MCF) / Pocos modos (FMF): Múltiples guías independientes en un solo revestimiento. Multiplican la capacidad mediante multiplexación espacial (SDM). En 2025, investigadores japoneses alcanzaron un récord mundial de $1.02\ \text{Pb/s}$ en una fibra de 19 núcleos transmitiendo sobre $1808\ \text{km}$, con el mismo diámetro externo que una fibra convencional [1, 24]. En la figura 5 [76], se aprecian varios ejemplos de fibras que soportan SDM, tanto multi-núcleos como de pocos modos. Complementar con [47, 51, 58, 65, 76].

Arquitecturas especializadas: Núcleo fresco (*holey fibers*) para sensado de gases; revestimientos funcionales (metálicos, poliméricos sensibles) para maximizar interacción con el medio externo [5]; fibras *D-shaped* con películas de oro para sensado por resonancia de plasmón superficial (SPR) [7]. La Tabla 4 resume la clasificación por material y arquitectura.

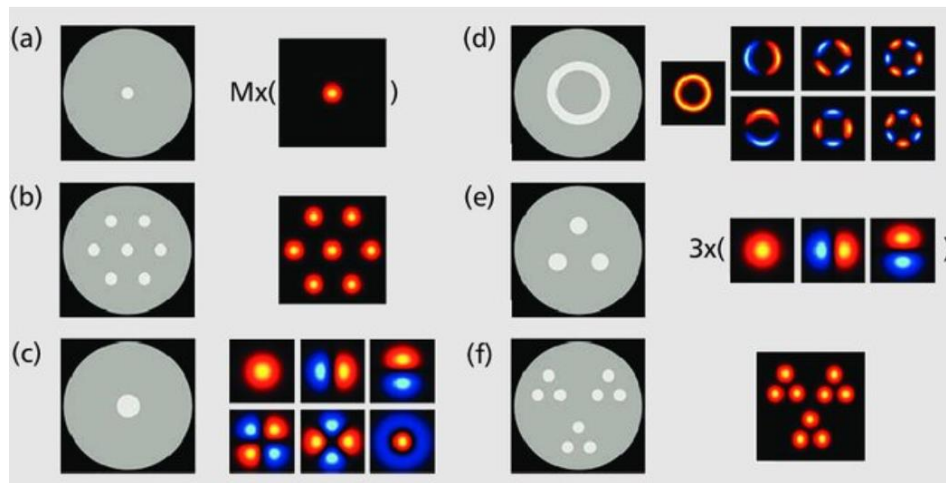


Figura 5.

Diferentes tipos de fibras que soportan SDM a partir de (a) Fibra monomodo estándar (b) Fibra con arreglo multi-núcleo MCF (c) Fibra de pocos modos FMF (d) Fibra de núcleo anular (e) Fibra multi-núcleo que soporta pocos modos y (f) Fibra multi-núcleo con arreglos de grupos acoplados.

Tabla 4
 Clasificación por material y arquitectura

Dimensión	Subclasificación	Características Fundamentales	Ejemplo / Aplicación	Ref.
Material Base	Sílice (SiO ₂ dopada)	Baja atenuación (0.15-0.2 dB/km), robustez mecánica	G.652.D, fibras Yb/Er-dopadas	[1, 10]
	Fluoruros (ZBLAN)	Transparencia IR medio (0.4-4.5 μm), frágil	Espectroscopia IR medio, láseres 2.7-3.5 μm	[32, 5]
	Calcogenuros	Alta no linealidad, ventana hasta 10-12 μm	Supercontinuo IR medio, conmutación	[8, 3]
	Polímeros	Alta flexibilidad, alta atenuación	Redes domésticas, sensores deformación	[4, 9]
	Híbridos/Compuestos	Propiedades sintonizables o activas	Fibras sensoras, moduladores	[5]
Arquitectura	Sólida estándar	Núcleo/revestimiento concéntricos	SMF, MMF	[1]
	Microestructurada PCF	Red de huecos, control dispersión	HC-PCF, PCF no lineal	[6, 25]
	Multinúcleo (MCF)/FMF	Múltiples guías en un cladding	MCF para cables submarinos	[1, 24]
	Especializadas	Núcleo fresco, revestimiento funcional	Sensado gases, sensores SPR	[5, 7]

5. CLASIFICACIÓN POR FUNCIÓN PRIMARIA

Este eje responde a la pregunta: ¿para qué se utiliza? Agrupa las fibras según su propósito de explotación, lo que dicta los requisitos de rendimiento y prioriza ciertos parámetros [1].

5.1. Distinción transversal: fibras pasivas vs. activas.

Un concepto fundamental es la distinción entre fibras pasivas y activas [33, 34]. Las fibras pasivas carecen de dopantes láser-activos en el núcleo; su función es transmitir luz con la menor alteración posible. Son los elementos fundamentales en redes de telecomunicaciones, sensado y entrega de energía. Las fibras activas contienen dopantes de tierras raras (Er, Yb, Tm) que les permiten actuar como medio de ganancia en láseres y amplificadores, generando o aumentando la potencia óptica [4]. Esta dualidad es esencial para entender el rol de la fibra en el sistema.

5.2. Categorías funcionales.

Transmisión de señales: Incluye fibras de baja atenuación para redes troncales (G.654.E) [15], fibras de baja latencia (HC-PCF, NANF) para aplicaciones financieras o sincronización crítica [2], y fibras para multiplexación espacial (MCF, FMF) [3, 24].

Generación/entrega de potencia: Fibras activas dopadas para láseres y amplificadores [4]; fibras de doble revestimiento de gran área modal (LMA) para entregar altas potencias en aplicaciones industriales, médicas o de defensa [5, 27, 42].

Sensado intrínseco: Fibras para sensado distribuido (DAS, DTS) que utilizan dispersión Rayleigh, Raman o Brillouin [6, 29, 49]; fibras funcionalizadas para sensado bioquímico selectivo mediante onda evanescente [7].

Procesamiento e interfaz: Fibras no lineales (calcogenuros, sílice microestructurada) para generar supercontinuo, comprimir pulsos o realizar lógica óptica [8]; fibras para biofotónica (endoscopia de alta resolución, terapia fotodinámica) [9, 50].

La Tabla 5 presenta la clasificación funcional enriquecida con los principios físicos y materiales clave, incorporando la distinción pasiva/activa.

Tabla 5
Clasificación por función primaria (con distinción pasiva/activa)

Función Primaria	Subcategoría	Tipo	Principio Físico	Material/Arquitectura	Características	Ejemplo	Ref.
Transmisión	Capacidad/Distancia	Pasiva	RTI	Sílice, Gran Área Efectiva	Baja atenuación, baja dispersión	G.654.E	[1, 15]
	Baja Latencia	Pasiva	ARROW/PBG	Sílice Microestructurada (HC)	Propagación en aire, latencia -30%	NANF	[2, 26]
	SDM	Pasiva	RTI	MCF, FMF	Múltiples canales espaciales	MCF 19 núcleos	[1, 24]
Potencia	Amplificación/Láseres	Activa	RTI	Sílice dopada (Yb,Er,Tm)	Alta eficiencia conversión	Fibras Yb-dopadas	[4]
	Entrega Alta Potencia	Pasiva	RTI	Sílice LMA	kW-MW sin daño óptico	Fibras LMA corte industrial	[5, 27]
Sensado	Distribuido (DAS/DTS)	Pasiva	RTI	Sílice con dopado optimizado	Retrodispersión controlada	Fibras para pozos petroleros	[6, 29]
	Bioquímico Selectivo	Pasiva	RTI (onda evanescente)	Arquitecturas especiales (D-shaped, holey)	Detección molecular alta sensibilidad	Fibras SPR	[7]
Procesamiento	No Lineal	Pasiva	RTI (alta γ)	PCF, calcogenuros	Supercontinuo, compresión pulsos	PCF no lineal	[8]
	Biomédica/Cuántica	Pasiva	RTI	Imaging fibers, polímeros	Biocompatibilidad, resolución espacial	Endoscopia	[9]

6. CLASIFICACIÓN POR DOMINIO DE APLICACIÓN VERTICAL

Este eje sitúa la fibra en su dominio de aplicación, incorporando restricciones de fiabilidad, certificación, ciclo de vida y condiciones ambientales extremas [1].

6.1. Telecomunicaciones terrestres y submarinas.

Las fibras para redes terrestres de larga distancia deben garantizar atenuación estable y resistencia mecánica durante décadas bajo variaciones térmicas [10, 16, 17, 62, 63]. El entorno submarino exige resistencia a presión hidrostática extrema (~80 MPa), corrosión y esfuerzos de tendido, con vida útil de más de 25 años [3, 6].

6.2. Interconexión de centros de datos (DCI Data Center Interconnection).

Priorizan alta densidad, baja latencia y equilibrio entre rendimiento y costo. Las fibras OM5 (MMF de banda ancha) y SMF insensibles a dobladuras (G.657) son dominantes [23, 25]. Los enlaces internos a 400G y 800G son ya comunes, y los módulos plugables 800G emergen para conectar clústeres de IA [1]. Complementar con [51-55, 67].

6.3. Sensado industrial (petróleo y gas).

Las fibras para sensado distribuido en pozos (DTS, DAS) deben soportar temperaturas superiores a los 300°C, presiones extremas, entornos químicamente corrosivos y certificaciones de seguridad intrínseca [29]. Se emplean fibras con recubrimientos herméticos de aluminio o acero [5]. Ver también [49].

6.4. Aeroespacial y defensa.

Imponen restricciones únicas: ultra-ligeras, resistentes a radiación ionizante, capaces de soportar vibraciones y choques extremos, y operar desde -270°C hasta más de 150°C [30]. Fibras con revestimiento (*cladding*) puro de sílice y recubrimientos de poliamida son comunes.

6.5. Dispositivos médicos y biotecnología.

Deben cumplir estrictos requisitos de biocompatibilidad (ISO 10993), ser esterilizables y a menudo desechables [7, 31]. Las fibras de imágenes permiten la realización de endoscopias de alta resolución [9, 50]; las fibras huecas se emplean para cirugía láser y terapia fotodinámica [27].

6.6. Instrumentación científica.

Prioriza rendimiento óptico extremo sobre costo. Se emplean fibras de ZBLAN (acrónimo de un vidrio fluorado compuesto por ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF: fluoruro de zirconio, bario, lantano, aluminio y sodio) para espectroscopia en el infrarrojo medio [32] y fibras huecas con pérdidas ultrabajas para experimentos de física de precisión [2, 26]. Ver también [8, 43, 45].

6.7. Procesado industrial de materiales.

El procesado industrial de materiales (corte, soldadura, taladrado con láser) constituye un dominio de aplicación fundamental y distintivo. Sus exigencias incluyen la integración en cabezales robóticos, la exposición a alta densidad de potencia, a entornos con polvo metálico y altas temperaturas. Los requisitos prioritarios son: alta potencia soportada, superación del umbral de daño por efectos no lineales, entrega flexible del haz y mantenimiento de la calidad del haz (M² bajo) [27, 28].

Las soluciones incluyen fibras de núcleo hueco (HC-PCF, NANF) para pulsos ultracortos de alta potencia, y fibras de área de modo grande (LMA) para láseres de onda continua de alta potencia (kW/MW) [5, 27, 35-38]. Wang et al. (2025) presentan una revisión actualizada de aplicaciones de corte, soldadura y taladrado con láser de alta potencia [28]. La Tabla 6 presenta la clasificación por dominio de aplicación vertical general.

Tabla 6
Clasificación por dominio de aplicación vertical

Dominio Vertical	Entorno y Exigencias Clave	Requisitos Prioritarios	Ejemplo de Fibra	Ref.
Telecom: Redes Terrestres	Ductos, tendidos aéreos, variación térmica	Fiabilidad >25 años, estabilidad atenuación	G.652.D, G.657.A	[10]
Telecom: Submarino	Fondo oceánico: presión extrema, corrosión	Resistencia presión, baja permeación H ₂	Sílice pura con recubrimiento carbono	[3, 6]
Centros de Datos/DCI	Racks densos, distancias cortas	Alta densidad, baja latencia, costo	OM5, G.657	[23, 25]
Sensado Industrial (Petróleo/Gas)	Pozos: alta T° y P, químicos corrosivos	Resistencia T° y P extremas, certificación ATEX	Fibra con recubrimiento metálico	[29, 5]
Aeroespacial y Defensa	Espacio, aviones: radiación, vibración, peso	Resistencia radiación, bajo peso	Cladding puro sílice, recubrimientos poliimida	[30]
Dispositivos Médicos	Cuerpo humano: esterilidad, biocompatibilidad	Biocompatibilidad ISO 10993, esterilizable	Fluoropolímero biocompatible	[7, 31]
Instrumentación Científica	Laboratorios, telescopios, sincrotrones	Rendimiento óptico máximo, costo secundario	ZBLAN, HC-PCF	[32, 26]
Procesado Industrial	Talleres: alta densidad potencia, polvo metálico	Alta potencia, umbral daño, entrega flexible	HC-PCF, LMA	[27, 28]

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La evolución reciente de las fibras ópticas revela una madurez tecnológica que no implica estancamiento, sino una diversificación hacia dominios de aplicación cada vez más especializados. Los estándares establecidos (G.652.D, G.654.E) han experimentado mejoras cuantitativas notables que extienden su vida útil y capacidad, mientras que tecnologías disruptivas como las fibras de núcleo hueco (HC-ARF, NANF) han alcanzado niveles de madurez comercial con atenuaciones de 0.16 dB/km y latencias un 30% inferiores a las fibras convencionales.

El marco de clasificación propuesto —basado en cuatro ejes complementarios (principio físico, material y arquitectura, función primaria y dominio de aplicación)— permite organizar sistemáticamente la creciente diversidad de tipos de fibra y sus aplicaciones. La distinción entre fibras pasivas y activas emerge como un eje transversal esencial para comprender el rol de la fibra en el sistema. Las perspectivas futuras apuntan hacia:

1. **Estandarización de fibras SDM:** Las Recomendaciones G.SDM (previstas 2026-2027) establecerán especificaciones para MCF y FMF, habilitando despliegues comerciales de multiplexación especial [56].
2. **Fibras para redes cuánticas:** El desarrollo de fibras optimizadas para distribución cuántica de claves (QKD) y coexistencia cuántica-clásica será prioritario [57, 60].
3. **Nuevos materiales:** Los vidrios blandos (fluoruros, calcogenuros) y materiales híbridos ampliarán el rango espectral hacia el infrarrojo medio y terahertz, con aplicaciones en espectroscopia, sensado y comunicaciones espaciales.
4. **Diseño inverso con inteligencia artificial:** Técnicas de aprendizaje automático aplicadas al diseño de fibras prometen reducir drásticamente los tiempos de desarrollo y optimizar simultáneamente múltiples parámetros [3, 73].
5. **Caracterización no destructiva:** Métodos avanzados (microscopía de fase cuantitativa, holografía digital, tomografía computarizada de rayos X) permitirán inspeccionar microestructuras con resolución sin precedentes [9].

La fibra óptica, lejos de ser una tecnología madura y estática, continúa siendo un campo de innovación intensa, donde la física, la ciencia de materiales y la ingeniería de sistemas convergen para expandir los límites de lo posible en comunicaciones, sensado, procesado industrial e instrumentación científica.

REFERENCIAS

1. 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.
2. Sakr H, et al. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands. *Nat Photonics*. 2020 Aug;14(8):504-10. doi: 10.1038/s41566-020-0646-5.
3. Ryf R, et al. High-spectral-efficiency mode-multiplexed transmission over graded-index multimode fiber. *J Lightwave Technol*. 2019 Jan;37(2):422-9. doi: 10.1109/JLT.2018.2878623.
4. Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers. *Nat Photonics*. 2021 Feb;15(2):73–84. doi: 10.1038/s41566-020-00731-5.
5. Salih E, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Fabrication methods of soft glass-based optical fibers: a review. *Opt Fiber Technol*. 2026 Jan;169. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346725008894>.
6. Jasion GT, et al. 1.84 Pb/s data transmission in a hollow-core fiber. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2023; San Diego, CA, USA*. paper Th4A.2.
7. Zhao Y, et al. Recent advances in surface plasmon resonance optical fiber sensors for biosensing applications. *Adv Mater Technol*. 2022 Aug;7(8):2101255. doi: 10.1002/admt.202101255.
8. Chahal R, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide fibers: a review. *Appl Sci*. 2021 Jan;11(3):1042. doi: 10.3390/app11031042.
9. Pei L, Wang C, Wang J, He Q, Chang Y, Zhang L, Ning T, Zheng J, Hu Z. Non-destructive characterization of optical fiber microstructures: a review [Invited]. *Chin Opt Lett*. 2026;24(3):030008. doi: 10.3788/COL202624.030008.
10. Li MJ, Li S, Nolan DA. Ultra-low loss optical fiber for long-haul transmission. *J Lightwave Technol*. 2020 Jan;38(1):49-54. doi: 10.1109/JLT.2019.2944865.
11. Chen HB, Chen GY, Zhao CJ. Perspective on quantum-ready optical fiber networks. *IEEE Commun Stand Mag*. 2022 Dec;6(4):76–83. doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200004.
12. ITU-T. Y.3800: quantum key distribution networks – functional requirements. ITU-T Recommendation Y.3800. 2020 Dec.
13. Peng FH, et al. Optical fibre for quantum communication applications: requirements and recent progress. *Opt Fiber Technol*. 2022 Oct;73:103067. doi: 10.1016/j.yofte.2022.103067.
14. Chen X, et al. Fourth-order dispersion engineering in standard single-mode fibers for nonlinearity suppression in 1.6T coherent systems. *Nat Photonics*. 2024;18(3):234-41. doi: 10.1038/s41566-023-01345-4.
15. Sakamoto T, et al. Ultra-large effective area fibers with intelligent Raman overlap optimization. *J Lightwave Technol*. 2024;42(8):2789-98. doi: 10.1109/JLT.2024.3356789.
16. ITU-T. G.652 Amendment 3: enhanced single-mode optical fibre for advanced modulation formats. ITU-T. 2025.
17. ITU-T. G.654 Amendment 2: extended-reach ultra-low loss optical fibre for submarine applications. ITU-T. 2025.
18. ITU-T SG15. Report of the Q6/15 meeting (optical fibres, cables and other passive elements). Meeting Report. Geneva, Switzerland; 2023 Oct.

19. Hirano M, et al. Advanced G.655 fibers for 800G/1.6T coherent transmission. *J Lightwave Technol.* 2024;42(10):3210-21. doi: 10.1109/JLT.2024.3367890.
20. Butt MA. Emerging trends in thermo-optic and electro-optic materials for tunable photonic devices. *Materials.* 2025 Jun;18(12):2782. doi: 10.3390/ma18122782.
21. Li M, Li Z, Wang J. Optimized dispersion profile design for wideband non-zero dispersion shifted fibers in ultra-long-haul transmission. *J Lightwave Technol.* 2022 Aug;40(15):5120-8. doi: 10.1109/JLT.2022.3179591.
22. Priya PS, Srivastava AK, Sun Y. Performance evaluation of wideband NZ-DSF fiber with distributed Raman amplification for high-capacity coherent systems. *IEEE Photon Technol Lett.* 2021 Nov;33(21):1187-90. doi: 10.1109/LPT.2021.3111234.
23. Matthijsse P, Kuyt G, Achten F. Wideband multimode fiber for high-capacity short-reach data communications. *J Lightwave Technol.* 2020 Jan;38(1):86-92. doi: 10.1109/JLT.2019.2944694.
24. Saitoh K, Matsuo S, Mizuno T. Multi-core fibers for space-division multiplexing: tutorial review and prospects. *J Lightwave Technol.* 2021 May;39(10):3056–73. doi: 10.1109/JLT.2021.3065879.
25. Poletti F, Petrovich MN, Richardson DJ. Hollow-core photonic bandgap fibers for telecoms: opportunities and potential limitations. *J Lightwave Technol.* 2022 May;40(10):3139-52. doi: 10.1109/JLT.2022.3162134.
26. Ding W, Wang YY, Gao SF, Jin L, Wang P. Recent progress in low-loss hollow-core anti-resonant fibers and their applications. *Adv Photon.* 2021 Dec;3(6):064001. doi: 10.1117/1.AP.3.6.064001.
27. Shephard JD, et al. Silica hollow core microstructured fibers for beam delivery in industrial and medical applications. *Front Phys.* 2015 Apr;3:24. doi: 10.3389/fphy.2015.00024.
28. Wang YG, Hou SP, Lv QC. Research progress on the application of high-power laser cutting, welding, and drilling. *Front Phys.* 2025 May;13:1595077. doi: 10.3389/fphy.2025.1595077.
29. Bolognini G, Hartog A. Fiber-optic distributed sensing for harsh environments. *J Lightwave Technol.* 2020 Jun;38(11):2945-56. doi: 10.1109/JLT.2020.2974386.
30. Sandoghchi SR, et al. Radiation resistant fiber Bragg gratings for space applications. *Opt Express.* 2015 May;23(10):12871-80. doi: 10.1364/OE.23.012871.
31. Smith AM, Mancini MC, Nie S. Bioimaging: second window for in vivo imaging. *Nat Nanotechnol.* 2009 Nov;4(11):710-1. doi: 10.1038/nnano.2009.326.
32. Sanghera JS, Shaw LB, Aggarwal ID. Chalcogenide glass-fiber-based mid-IR sources and applications. *IEEE J Sel Top Quantum Electron.* 2009 Jan-Feb;15(1):114-9. doi: 10.1109/JSTQE.2008.2010245.
33. Paschotta R. Passive fibers. *RP Photonics Encyclopedia* [Internet]. Available from: https://www.rp-photonics.com/passive_fibers.html [cited 2026 Feb 22].
34. Paschotta R. Active fibers. *RP Photonics Encyclopedia* [Internet]. Available from: https://www.rp-photonics.com/active_fibers.html [cited 2026 Feb 22].
35. Zervas MN. High power fiber lasers and amplifiers based on LMA-PCF technology: review and prospect. *IEEE J Sel Top Quantum Electron.* 2021 Jul-Aug;27(4):0900208.
36. Jain D, Codemard C, Jeong Y, Sahu JK, Nilsson J. 3 kW single-mode operation from a stretched-pitch large-mode-area photonic crystal fiber laser. *Opt Lett.* 2023 Mar;48(5):1220-3.
37. Xiao L, Nielsen MD, Laegsgaard J. High-numerical-aperture photonic crystal fiber for efficient laser delivery in medical applications. *Opt Express.* 2021 Apr;29(8):12345-56.
38. Chen Y, Ebendorff-Heidepriem H, Monro TM, Afshar S. High-NA suspended-core fiber for enhanced Raman spectroscopy. *J Lightwave Technol.* 2022 Feb;40(3):789-97.
39. Poletti F, et al. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications. *Nanophotonics.* 2013 Dec;2(5-6):315-40.
40. Belardi W, Knight JC. Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation. *Opt Lett.* 2014 Apr;39(7):1853-6.
41. Jasion GT, Bradley TD, Harrington K, et al. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2020; San Diego, CA, USA.* paper Th4B.4.
42. Travers JC, et al. High power pulse delivery with hollow-core fibers. *Opt Express.* 2021 Mar;29(5):7125-37.
43. Monro TM, et al. Sensing with photonic crystal fibers. *Meas Sci Technol.* 2019 May;30(7):072001.
44. Fini JM, et al. Low-loss hollow-core fibers with improved single-modeness. *Opt Express.* 2023 Jan;31(2):1270-82.
45. Cordeiro CMB. Structured and tunable optical fibers: from microstructured to liquid crystal fibers. *Front Phys.* 2022;10:849961. doi: 10.3389/fphy.2022.849961.
46. Russell PSJ, Hölzer P, Chang W, Abdolvand A, Travers JC. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics. *Nat Photonics.* 2014 Apr;8(4):278–86.
47. Hayashi T, Nagashima T, Nakanishi T, Sasaki T. Multi-core fibers for high-capacity transmission. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2015; Los Angeles, CA, USA.* paper Th1J.1.
48. Limpert J, et al. Yb-doped large-pitch fibers: effective single-mode operation based on higher-order mode

- delocalization. *Light Sci Appl*. 2012 Apr;1(4):e8.
49. Soto MA, Ramírez JA, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using shape optimisation. *Sci Rep*. 2019 Oct;9(1):15204.
 50. Sivankutty S, Andresen ER, Cossart R, Bouwmans G, Monneret S, Rigneault H. Ultra-thin rigid endoscope: two-photon imaging through a graded-index multi-mode fiber. *Opt Express*. 2016 Jan;24(2):825–41.
 51. Nagayama K, et al. Ultra-high-density cabling with 7.5-mm bend radius optical fiber for data center applications. *J Lightwave Technol*. 2023 Apr;41(8):2425-31.
 52. Geng Y, et al. Performance evaluation of next-generation 50G-PON systems over bend-insensitive single-mode fibers. In: *Proceedings of the European Conference on Optical Communication (ECOC); 2023; Glasgow, UK*. p. 1-4.
 53. Li MJ, et al. Design and performance of nano-trench-assisted bend-insensitive single-mode fibers for 5-mm bend radius applications. *J Lightwave Technol*. 2023 Jan;41(1):346-52.
 54. Lynch MP, et al. Performance of high-density 96-fiber MPO connectors utilizing 200 μm bend-insensitive single-mode fiber. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2023; San Diego, CA, USA*. p. 1-3.
 55. Hurley JE, Colbourne PD, Shemirani MB. 400G and 800G short-reach transmission using wideband multimode fiber and shortwave wavelength division multiplexing. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2021; San Diego, CA, USA*. p. 1-3.
 56. ITU-T SG15. Draft Recommendation G.Sup.SDM: guidance for space-division multiplexing optical fibre and cable. Temporary Document TD466 (SG15). 2023 Jan.
 57. ITU-T FG-NET-2030. Network 2030 – a blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond. Final Report. 2021 May.
 58. Puttnam BJ, Luis RS, Rademacher G. Transmission technologies for SDM fibers. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2023; San Diego, CA, USA*. p. 1–3.
 59. ITU-T SG15. Liaison statement on progress of SDM fibre standardization to IETF and IEEE 802.3. LS 282 (SG15). 2023 Jul.
 60. Patel KA, et al. Quantum key distribution for 10 Gb/s metropolitan networks. *Opt Express*. 2014 Sep;22(18):21739–48.
 61. Wengerowsky S, et al. Entanglement distribution over a 96-km long submarine optical fiber. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2019 Apr;116(14):6684–8.
 62. China Unicom Research Institute. National 5.5G backbone: performance analysis of advanced G.652.D fibers. *IEEE Commun Mag*. 2025;63(2):112-8.
 63. Corning Incorporated. SMF-28® ULL NLC: technical specifications and system benefits. Product White Paper. 2025.
 64. Ota T, Seno K, Takeda K. Ultra-wideband transmission over low-loss and low-dispersion-slope fiber in S, C, and L bands. In: *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC); 2020; San Diego, CA, USA*. p. 1-3.
 65. Okamoto S, et al. Crosstalk and nonlinearity management in multi-core fibers with wideband NZ-DSF characteristics. In: *Proceedings of the European Conference on Optical Communication (ECOC); 2021; Brussels, Belgium*. p. 1-4.
 66. Soto MA, et al. Joint classical and quantum transmission in wideband optical networks: a performance study on G.652 and G.656 fibers. *J Lightwave Technol*. 2023 Jan;41(1):334-45.
 67. Corning Incorporated. Corning® ClearCurve® OM5 and OS2 5-millimeter bend fibers. Datasheet. 2023.
 68. Cregan RF, Mangan BJ, Knight JC, Birks TA, Russell PSJ, Roberts PJ, Allan DC. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. *Science*. 1999 Sep;285(5433):1537-9.
 69. Benabid F, Knight JC, Antonopoulos G, Russell PSJ. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber. *Science*. 2002 Oct;298(5592):399-402.
 70. Smith CM, et al. Low-index-core photonic bandgap fibers for visible and near-infrared applications. *Opt Lett*. 2003 Jun;28(12):989-91.
 71. Luan F, et al. Low-index-core photonic crystal fiber for high-power ultraviolet laser delivery. *J Lightwave Technol*. 2016 Sep;34(18):4262-8.
 72. Yan G, et al. Ultra-sensitive biochemical sensor based on low-index-core photonic bandgap fiber. *Biosens Bioelectron*. 2021 Nov;192:113521.
 73. Khan MMI, Shamim MHM, Khan AN, et al. Machine learning driven inverse design of devices and components for optical communication and sensing systems: a comprehensive review. *Adv Photon Nexus*. 2026;5(1):014002. doi: 10.1117/1.APN.5.1.014002.
 74. Russell PSJ. Photonic crystal fibers. *Science*. 2003 Jan;299(5605):358-62.
 75. Belardi W. Hollow-core antiresonant fibers: basics, technology, and applications. *J Lightwave Technol*. 2019 Aug;37(16):3885-99.
 76. Marom DM, Blau M. Switching solutions for WDM-SDM optical networks. *IEEE Commun Mag*. 2015 Feb;53(2):60-8.

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 las redes de telecomunicaciones, los sistemas de IoT y de monitorización distribuida, así como los sistemas y redes de comunicaciones ópticas. No. ORCID: 0000-0001-5880-6718.

René 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 y 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](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)