

INFRAESTRUCTURA ÓPTICA

SIN SECRETOS

LA GUÍA REAL DE LAS OPERADORAS TIER-1

(DEL CAMPO AL CORE)



- ✓ **TORNILLOS CORRECTOS**
- ✓ **CONFIGURACIONES REALES**
- ✓ **ESTÁNDARES DE TIER-1**

Wagner R Bomfim

Infraestructura Óptica Sin Secretos

La Guía Real de las Operadoras Tier-1

Del Componente a la Operación -- Arquitectura,
Proveedores y Procedimientos para Redes de
Telecomunicaciones

Hecho para: Ingenieros de Planificación,
Diseñadores OSP, Equipos de Field Engineering,
NOC Nivel 3, Proveedores de Datacenter.

Diferencial: El libro no enseña teoría de fibra óptica. Enseña exactamente qué tornillo usar en el poste de (Vivo, TIM, Claro), cuál es la plantilla de configuración para interoperar un router Cisco ASR9k con una OLT Huawei MA5800, y cuál es el procedimiento de aceptación (ATP) exigido por un hiperescalador (Google/Meta) para el alquiler de fibra oscura.

AMOSTRA / MUESTRA

Sumario Completo

Volumen I: La Capa Física (Infraestructura y Planta Externa)

Capítulo 1: Detalle de Componentes -- La Lista de Materiales (BOM) de una Operadora Tier-1

- 1.1 Fibras Ópticas: G.652.D (SMF-28 Ultra) vs. G.657.A1/A2 (Flexibilidad para FTTH). Especificaciones de atenuación (IL) y reflectancia (ORL) aceptadas por Anatel y grandes operadoras.
- 1.2 Cables: Tipos, construcción y proveedores (Furukawa, Prysmian, Corning).
 - Cables de Tubo Suelto (Loose Tube) con gel vs. cinta seca (dry water-blocking).
 - Cables de Cinta (Ribbon) para alta densidad (3456 fibras).
- 1.3 Conectores y Adaptadores: FC/APC vs. SC/APC vs. LC/UPC. Estándares de pulido. Por qué Claro exige APC en toda planta externa.

- 1.4 Cables de Parcheo (Jumpers): Modo de entrega (simplex, dúplex, fan-out). Especificaciones de tracción y radio de curvatura mínimo.
- 1.5 Cajas de Empalme (CDE/CEOs): Sellado IP68, organización de bandejas.
- 1.6 Ductos y Subterráneo: Conducto de 40mm, 50mm y 100mm. Microductos para blow fiber.

Capítulo 2: Herramientas e Instrumentación de Campo

- 2.1 Fusores: Fujikura 70S (single) vs. Fujikura 90R (mass fusion). Parámetros de calibración y ajuste de arco.
- 2.2 Fuentes y Power Meters: Procedimiento de referenciado (0dB) para medición de pérdida precisa.
- 2.3 OTDR: Configuración de pulso (ancho) y tiempo de promedio para identificar eventos en larga distancia vs. redes PON.
- 2.4 Identificadores de Fibra Viva (Live Fiber Identifiers): Técnica de identificación sin interrupción de tráfico.

Capítulo 3: Procedimientos de Instalación -- Paso a Paso

- 3.1 Apertura de Cable: Técnica de ring-cut para cables de cinta vs. tubo suelto sin dañar fibras.
- 3.2 Organización en Bandejas: Radio de curvatura mínimo (30mm para G.652.D, 15mm para G.657.A2).
- 3.3 Empalmes (Splicing): Tabla de pérdida aceptable (<0.05dB para mismo fabricante, <0.1dB para fabricantes diferentes).
- 3.4 Instalación Aérea (Postes): Altura mínima, mensajero (ACSR), y protocolos de compartición de poste con concesionarias de energía.
- **Volumen II: Arquitectura Activa y Proveedores (Vendors)**
- **Capítulo 4: El Core (Backbone) -- Transporte DWDM**
- 4.1 Arquitectura: ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) de grado flexible (Flex-Grid).

- 4.2 Proveedores:
- **Nokia (Alcatel-Lucent):** Familia 1830 PSS (Photonic Service Switch). Configuración de supervisión (GCC/SCC) y amplificadores ópticos (EDFA/Raman).
- **Cisco:** Plataforma NCS 2000. Interoperabilidad con transponders de terceros.
- **Huawei:** Plataforma OSN 9800. Procedimientos de seguridad para evitar backdoors en redes críticas (estándar OTAN/ABIN).
- 4.3 Transponders y Muxponders: 100G/400G/800G. Modulación (QPSK, 16QAM). FEC (Forward Error Correction) -- cómo ganar 2dB de budget ajustando el FEC.
- **Capítulo 5: Acceso (FTTH) -- Arquitectura GPON/XGS-PON**
- 5.1 Estándares: G.984 (GPON) vs. G.9807 (XGS-PON). Split ratio (1:64 vs 1:128).
- 5.2 OLTs (Optical Line Terminal):

- **Huawei MA5800-X17/X15:** Configuración de DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) y VLAN mapping.
- **Nokia (Alcatel) 7360 ISAM**
FX: Configuración de perfiles de tráfico para residencial vs. empresarial.
- **ZTE C300/C600:** Procedimientos de desbloqueo de puerto PON.
- 5.3 ONTs/ONUs: Provisionamiento vía OMCI. Estándares de RF overlay para TV (CATV).
- **Volumen III: Operación, Configuración y Aceptación**
- **Capítulo 6: Configuración de Routers de Borde (Edge)**
- 6.1 **Juniper MX Series (MX204, MX10003):** Configuración de BGP para intercambio de tráfico con IXPs (PTT.br, FTS).
- 6.2 **Cisco ASR 9000 Series:** Configuración de IOS-XR, políticas de QoS para diferenciar tráfico de video (Netflix/YouTube) de datos.

- **6.3 MikroTik para Proveedores Regionales: CHR (Cloud Hosted Router) y CCR1072. Rompiendo mitos: cuándo reemplaza a un Cisco o Nokia (y cuándo no).**
- **Capítulo 7: Pruebas de Aceptación (ATP -- Acceptance Test Procedure)**
 - 7.1 Prueba de Continuidad y Pérdida (ILM): Método de 3 jumpers (A/B/C). Tolerancias.
 - 7.2 Reflectometría (OTDR): Análisis de eventos -- cómo interpretar un "gainer" (evento negativo) y cuándo indica un empalme mal ejecutado o mismatch de modo de campo.
 - 7.3 Prueba de Dispersión Cromática (CD) y Dispersión por Modo de Polarización (PMD): Obligatorio para enlaces superiores a 100G.
 - 7.4 Prueba de Stress (Pulling): Certificación de que la fibra soportó la instalación sin microcurvaturas.
- **Capítulo 8: Seguridad y Buenas Prácticas para Operadoras**

- 8.1 Grounding y Puesta a Tierra: Esquemas de puesta a tierra en cables con alambre de acero (SWA). Protección contra rayos en cajas de empalme.
- 8.2 Gestión de Espacio en Ductos: Regla del 40% (NBR 14565).
- 8.3 Documentación y GIS: Estándar de nomenclatura de fibras (F.O. XX-YY-ZZ). Integración con sistemas de inventario (Netcracker, OSS de operadoras).

¡Buena lectura!!!

Volumen I: La Capa Física (Infraestructura y Planta Externa)

Capítulo 1: Detalle de Componentes -- La Lista de Materiales (BOM) de una Operadora Tier-1

1.1 Fibras Ópticas: Fundamentos, Tipos, Especificaciones y Criterios de Selección

1.1.1 Qué es una fibra óptica y por qué revolucionó las telecomunicaciones

Para entender la elección de los componentes, es necesario primero comprender qué es una fibra óptica y por qué se convirtió en el medio de

transmisión predominante en el mundo. Una fibra óptica es un filamento de vidrio de altísima pureza, compuesto esencialmente de sílice, con un diámetro aproximado de 125 micrómetros. Para que se haga una idea, un cabello humano tiene entre 50 y 100 micrómetros de diámetro. La fibra óptica es, por lo tanto, más fina que un cabello, pero tiene la capacidad de transportar información a velocidades que superan los 800 gigabits por segundo en un solo canal, y decenas de terabits por segundo cuando múltiples canales se combinan en sistemas DWDM.

La historia de la fibra óptica se remonta a la década de 1960, cuando los investigadores Charles Kao y George Hockham, trabajando en los laboratorios de Standard Telecommunication Laboratories en Inglaterra, demostraron que la pérdida de señal en fibras de vidrio podía reducirse a niveles prácticos para las telecomunicaciones. Antes de sus descubrimientos, las fibras de vidrio existentes tenían pérdidas superiores a 1000 decibelios por kilómetro, lo que las hacía inútiles para cualquier aplicación práctica más allá de unos pocos metros. Kao y Hockham propusieron que la pérdida era causada por impurezas en el vidrio, principalmente iones de hierro, cobre e hidroxilo, y que la

eliminación de estas impurezas podría reducir la pérdida a unos 20 decibelios por kilómetro. En 1970, Corning Glass Works, en los Estados Unidos, produjo la primera fibra óptica con pérdida inferior a 20 decibelios por kilómetro, inaugurando la era de las comunicaciones ópticas. Charles Kao recibió el Premio Nobel de Física en 2009 por sus contribuciones fundamentales.

La fibra óptica moderna está compuesta por tres capas concéntricas, cada una con una función específica. El núcleo es la región central, por donde la luz efectivamente viaja. Tiene un diámetro de 8 a 10 micrómetros para fibras monomodo, o 50 a 62,5 micrómetros para fibras multimodo, y está hecho de vidrio de sílice dopada con germanio para aumentar su índice de refracción. El revestimiento (cladding) envuelve al núcleo y tiene un diámetro de 125 micrómetros. Está hecho de sílice pura o dopada con flúor para tener un índice de refracción ligeramente menor que el del núcleo. La diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento es lo que confina la luz en el núcleo por reflexión total. Cuando la luz intenta salir del núcleo hacia el revestimiento, encuentra una barrera de índice de refracción y es reflejada de vuelta al núcleo. Este principio, conocido como

reflexión total interna, es el mismo que hace que un rayo de luz se propague a través de un chorro de agua de una fuente luminosa. El recubrimiento primario es la capa externa, hecha de acrílico o poliéster, que protege el vidrio contra la humedad, la abrasión y los impactos mecánicos. Tiene un diámetro de 250 micrómetros y se retira solo en el momento del empalme o conexión. La fibra desnuda, sin el recubrimiento primario, no puede ser tocada con las manos porque la oleosidad de la piel causa microfisuras que pueden llevar a la fractura.

1.1.2 Por qué existen diferentes tipos de fibra óptica

La evolución de las redes de telecomunicaciones trajo diferentes necesidades que un solo tipo de fibra no podía satisfacer. Las principales variables que diferencian los tipos de fibra son la dispersión cromática, la dispersión por modo de polarización, la atenuación y la sensibilidad a curvaturas. Cada aplicación --- ya sea un backbone submarino de 10.000 kilómetros, una red metropolitana de 80 kilómetros, o una red de acceso FTTH de pocos kilómetros --- impone requisitos diferentes.

La dispersión cromática es el fenómeno donde diferentes longitudes de onda de luz viajan a velocidades ligeramente diferentes en la fibra. Esto ocurre porque el índice de refracción del vidrio varía con la longitud de onda. En sistemas de alta velocidad, como 100G y 400G, la dispersión cromática puede hacer que los bits se dispersen en el tiempo y se superpongan unos con otros, causando errores. El parámetro que mide la dispersión cromática es el coeficiente de dispersión, expresado en picosegundos por nanómetro por kilómetro. Cuanto menor es este coeficiente, mayor es la distancia que la señal puede recorrer sin necesidad de compensación.

La atenuación es la pérdida de potencia de la señal a medida que la luz recorre la fibra. Es causada por absorción y dispersión. La absorción ocurre cuando la luz interactúa con impurezas en el vidrio, como iones de hidroxilo que causan un pico de absorción en 1380 nanómetros. La dispersión Rayleigh es un fenómeno fundamental donde la luz es dispersada por fluctuaciones en la densidad del vidrio, y es la principal fuente de atenuación en longitudes de onda de interés para telecomunicaciones. La atenuación disminuye a medida que la longitud de onda aumenta, hasta unos 1600 nanómetros,

donde la absorción por vibraciones moleculares de la sílice comienza a dominar.

La sensibilidad a curvaturas es la tendencia de la fibra a perder señal cuando se curva. En fibras estándar, una curvatura pronunciada hace que parte de la luz que debería estar confinada en el núcleo escape al revestimiento y se pierda. Las fibras insensibles a la curvatura, como la G.657, se desarrollaron específicamente para aplicaciones donde el espacio es reducido, como dentro de residencias y cajas de empalme estrechas.

1.1.3 Fibra G.652.D: la columna vertebral de las redes de backbone

La fibra G.652.D es, con mucho, el tipo más ampliamente implantado en el mundo para redes de backbone, metropolitanas y para la mayoría de las aplicaciones de larga distancia. Está definida por la recomendación ITU-T G.652, que establece las características de una fibra monomodo de dispersión no desplazada. La letra D al final indica la versión más reciente, que elimina el pico de absorción en 1380 nanómetros, permitiendo la utilización de todo el espectro de 1260 a 1625 nanómetros.

Las características técnicas de la fibra G.652.D son rigurosamente especificadas por los fabricantes y verificadas por las operadoras en el momento de la adquisición. El diámetro del núcleo es de 8,2 a 9,5 micrómetros, con un valor típico de 9,2 micrómetros. El diámetro del revestimiento es de 125 ± 1 micrómetro. El diámetro del recubrimiento primario es de 245 ± 10 micrómetros. La atenuación máxima en 1310 nanómetros es de 0,35 decibelios por kilómetro, y en 1550 nanómetros es de 0,25 decibelios por kilómetro. El coeficiente de dispersión cromática en 1550 nanómetros es de aproximadamente 17 picosegundos por nanómetro por kilómetro. La longitud de onda de dispersión cero, donde la dispersión cromática se anula, está en 1310 nanómetros.

Lo que hace a la G.652.D tan versátil es la combinación de baja atenuación en 1550 nanómetros, que es la ventana de operación de los amplificadores EDFA, con una dispersión cromática moderada que puede ser compensada electrónicamente en sistemas modernos. Además, la eliminación del pico de absorción en 1380 nanómetros permite la utilización de sistemas CWDM en la banda S, entre 1460 y 1530

nanómetros, para aplicaciones de menor costo donde el DWDM es excesivo.

Los proveedores aprobados por las operadoras brasileñas para fibra G.652.D son Corning, con su producto SMF-28 Ultra; Furukawa, con el producto LWP; y Prysmian, con el producto E-SMF. Cada uno de estos productos cumple con la recomendación G.652.D, pero hay pequeñas diferencias en el diámetro de campo modal que afectan la pérdida de empalme cuando se empalman fibras de diferentes proveedores.

El diámetro de campo modal, o MFD, es una medida del diámetro efectivo del modo de luz que viaja por el núcleo. Es ligeramente mayor que el núcleo físico, porque parte de la luz se propaga en el revestimiento. Para la G.652.D, el MFD típico en 1310 nanómetros es de 9,2 micrómetros, con una tolerancia de más o menos 0,4 micrómetro.

Cuando se empalman fibras de diferentes proveedores, si una tiene un MFD de 8,8 micrómetros y la otra de 9,6 micrómetros, la incompatibilidad causa una pérdida por mismatch de hasta 0,3 decibelios. Por eso operadoras como TIM estandarizan un único proveedor por proyecto

y mantienen existencias de cables de reserva del mismo lote de producción.

1.1.4 Fibra G.657.A2: la fibra insensible a la curvatura para FTTH

La fibra G.657 se desarrolló específicamente para satisfacer las necesidades de las redes de acceso FTTH, donde las fibras se instalan en espacios reducidos dentro de residencias, columnas de edificios y cajas de empalme congestionadas. La recomendación ITU-T G.657 define fibras monomodo con sensibilidad reducida a curvaturas, permitiendo radios de curvatura mucho menores que los de la G.652.D.

La G.657 se divide en dos categorías principales. La G.657.A1 permite un radio de curvatura de 10 milímetros, y es esencialmente una G.652.D con mejor rendimiento en curvatura. La G.657.A2 permite un radio de curvatura de 7,5 milímetros, y es la más indicada para aplicaciones donde el espacio es extremadamente reducido. También existe la G.657.B3, que permite un radio de curvatura de 5 milímetros, utilizada en aplicaciones especiales como cables de entrada residencial que necesitan sortear esquinas de paredes.

La fibra G.657.A2, comercializada como ClearCurve por Corning y EliteBend por Furukawa, mantiene las mismas características de atenuación de la G.652.D, pero con una tolerancia mucho mayor a curvaturas. Mientras que la G.652.D comienza a perder señal de forma significativa cuando se curva con un radio inferior a 30 milímetros, la G.657.A2 mantiene la pérdida por debajo de 0,1 decibel incluso con un radio de 15 milímetros, y puede curvarse hasta 7,5 milímetros en situaciones temporales sin daño permanente.

El mecanismo que permite esta insensibilidad a curvaturas es una modificación en el perfil de índice de refracción. En la G.652.D, el índice de refracción del núcleo es uniforme y el revestimiento es uniforme, formando un escalón. En la G.657.A2, hay un anillo de bajo índice alrededor del núcleo que crea una barrera adicional a la fuga de luz cuando la fibra se curva. Este anillo, llamado trench o zanja, confina la luz incluso en curvaturas pronunciadas.

La aplicación de la G.657.A2 en las redes de las operadoras sigue una regla práctica establecida por Vivo: todo cable aéreo, todo jumper interno, todo cordón que será manipulado con frecuencia y

toda fibra que será instalada dentro de edificios debe utilizar fibra G.657.A2. Mientras que los cables enterrados y los cables en ductos, que no sufren curvaturas pronunciadas durante la operación, pueden utilizar G.652.D, que tiene un costo alrededor de un 30 por ciento menor.

1.1.5 Especificaciones de atenuación y reflectancia: lo que Anatel y las operadoras exigen

La atenuación es la pérdida de potencia de la señal a medida que la luz recorre la fibra. Se expresa en decibelios por kilómetro, y es la especificación más básica para cualquier proyecto de red. Anatel no establece límites directos para la atenuación en redes privadas, pero las operadoras incorporan en sus proyectos los valores definidos por las normas ITU-T y por los fabricantes.

Para fibra G.652.D, la atenuación máxima en 1310 nanómetros es de 0,35 decibelios por kilómetro, y en 1550 nanómetros es de 0,25 decibelios por kilómetro. Estos son los valores garantizados por los fabricantes en la entrega. Durante la vida útil de la fibra, la atenuación puede aumentar debido al envejecimiento, la exposición al hidrógeno o daños mecánicos. Por eso las operadoras exigen un margen de seguridad: en los proyectos, utilizan

valores de 0,30 decibelios por kilómetro en 1310 nanómetros y 0,22 decibelios por kilómetro en 1550 nanómetros para calcular el budget óptico, dejando una reserva para el envejecimiento.

La reflectancia, o pérdida de retorno óptica, es la cantidad de luz que se refleja de vuelta a la fuente en cada punto de conexión o empalme. En sistemas de alta potencia como redes PON y DWDM, la reflectancia es crítica porque la luz reflejada regresa al láser e interfiere en su funcionamiento, causando inestabilidades que pueden afectar a toda la red. La pérdida de retorno se expresa en decibelios, y cuanto mayor sea el valor, mejor.

Para conectores con pulido APC, la pérdida de retorno típica es superior a 50 decibelios. Para conectores con pulido UPC, es superior a 40 decibelios. Anatel no establece límites, pero las operadoras imponen sus propios estándares en sus manuales de ingeniería. Claro, por ejemplo, exige que todos los conectores en planta externa tengan una pérdida de retorno superior a 50 decibelios, lo que solo se alcanza con pulido APC. Los conectores internos, en equipos activos, pueden tener una

pérdida de retorno superior a 40 decibelios con pulido UPC.

1.1.6 Procedimiento de recepción e inspección de fibras: paso a paso

Cuando un lote de cables de fibra llega al almacén de la operadora, se ejecuta un riguroso procedimiento de inspección antes de que los cables sean aceptados y almacenados. Este procedimiento varía entre operadoras, pero el estándar de TIM, documentado en su manual de suministros, es un ejemplo de lo que se practica en el sector.

El primer paso es la verificación documental. El ingeniero responsable de la recepción comprueba si la factura corresponde al pedido de compra: cantidad de bobinas, tipo de fibra, número de fibras por cable y longitud de cada bobina. A continuación, verifica si cada bobina viene acompañada del certificado de fábrica, que es un documento que contiene los resultados de las pruebas realizadas por el fabricante.

El certificado de fábrica debe contener, como mínimo: el número de lote de fabricación; el tipo de fibra según ITU-T; la atenuación medida en

1310, 1383, 1550 y 1625 nanómetros; la longitud de onda de corte; el diámetro de campo modal; el coeficiente de dispersión cromática; el coeficiente de dispersión por modo de polarización; y el resultado de la prueba de tensión. La prueba de tensión, o proof test, es un proceso de fábrica donde la fibra se somete a una tracción de 100 kpsi, alrededor de 700 megapascales, para garantizar que no hay fisuras latentes. Si el certificado de fábrica está ausente o incompleto, la bobina debe ser rechazada inmediatamente.

El segundo paso es la inspección visual de las bobinas. El ingeniero examina cada bobina en busca de daños en el transporte. La cubierta externa del cable no debe tener abolladuras, cortes o deformaciones que indiquen impacto. Los extremos del cable deben estar sellados con capuchones térmicos o cintas de protección. Si la cubierta está dañada o los extremos no están sellados, la bobina debe ser devuelta porque la humedad puede haber penetrado y comprometido las fibras internas. La humedad causa dos problemas: primero, el agua puede congelarse en climas fríos, expandiéndose y dañando la fibra; segundo, el agua reacciona con el recubrimiento

primario, liberando hidrógeno que aumenta la atenuación en 1383 y 1550 nanómetros.

El tercer paso es el muestreo para prueba de continuidad. El ingeniero selecciona una bobina de cada lote para la prueba de continuidad con OTDR. La prueba consiste en empalmar un pigtail en uno de los extremos del cable y realizar un barrido OTDR de principio a fin. La atenuación medida debe estar dentro de los valores especificados en el certificado de fábrica, con una tolerancia del 10 por ciento. Si la atenuación está por encima de lo especificado, todo el lote puede ser rechazado o sometido a pruebas adicionales.

El cuarto paso es el almacenamiento. Las bobinas aprobadas se almacenan en un lugar seco, cubierto y con temperatura controlada entre 10 y 40 grados Celsius. Las bobinas se colocan en palés de madera para evitar el contacto con el suelo, y se protegen de la luz solar directa, que puede degradar el recubrimiento primario. Cada bobina recibe una etiqueta de identificación con el número de pedido de compra, el número de lote, la cantidad de fibras y la longitud.

1.2 Cables Ópticos: Tipos, Construcción, Proveedores y Criterios de Selección

1.2.1 La evolución de los cables ópticos y por qué existen diferentes construcciones

El cable óptico es la estructura que transforma la fibra frágil en un producto robusto capaz de ser instalado en ductos, enterrado en el suelo o suspendido en postes. La evolución de los cables ópticos acompañó la evolución de las redes: desde las primeras redes de larga distancia con cables de tubo suelto y gel, hasta las redes de alta densidad con cables de cinta, y las redes de acceso con cables de cinta seca y microductos.

La función del cable es proteger las fibras contra tres tipos de agresión: mecánica, ambiental y química. La agresión mecánica incluye tracción durante la instalación, compresión por otros cables o por vehículos en ductos subterráneos, e impacto. La agresión ambiental incluye humedad, variaciones de temperatura y radiación ultravioleta. La agresión química incluye contacto con disolventes, aceites y productos químicos presentes en el suelo.

Cada tipo de construcción de cable está optimizado para un conjunto específico de agresiones y para un método de instalación. El cable de tubo suelto con gel es el más versátil y el

más utilizado en backbone enterrado, porque el gel protege las fibras contra la humedad y permite que se muevan libremente dentro del tubo cuando el cable es traccionado. El cable de cinta se utiliza en alta densidad porque maximiza la cantidad de fibras en un diámetro de cable dado. El cable de cinta seca elimina el gel para reducir el tiempo de preparación en campo. El cable ADSS se utiliza en instalaciones aéreas porque es totalmente dieléctrico, evitando riesgos eléctricos.

1.2.2 Cable de tubo suelto con gel: construcción detallada, aplicaciones y procedimientos

El cable de tubo suelto con gel es la construcción más antigua y aún la más utilizada para backbone enterrado y ductos urbanos. Su construcción es una obra de ingeniería que combina múltiples capas de protección para garantizar la integridad de las fibras durante décadas.

En el centro del cable está el elemento central de resistencia, o CSM. Este elemento es una varilla de acero o fibra de vidrio que soporta la tracción durante la instalación. En cables que no pueden contener metales, como los ADSS, el elemento central es de fibra de vidrio o aramida. El diámetro

del elemento central varía según la capacidad del cable, típicamente entre 2 y 5 milímetros.

Alrededor del elemento central, se trenzan helicoidalmente los tubos sueltos. Cada tubo es un tubo de plástico, generalmente PBT o polibutileno tereftalato, con un diámetro interno de 1,5 a 2,5 milímetros. Dentro de cada tubo, se insertan de 12 a 36 fibras, dependiendo del proyecto. Las fibras están sueltas dentro del tubo, sin fijación, y el espacio vacío se llena con un gel tixotrópico. Este gel tiene propiedades reológicas especiales: en reposo, se comporta como un sólido, manteniendo las fibras inmóviles; cuando se somete a esfuerzos mecánicos, como la tracción durante la instalación, se licua, permitiendo que las fibras se muevan y evitando que la fuerza se transfiera a ellas.

El número de tubos varía según la capacidad del cable. Un cable de 144 fibras puede tener 6 tubos de 24 fibras cada uno, o 12 tubos de 12 fibras cada uno. Los tubos se identifican por colores, siguiendo un estándar internacional: azul, naranja, verde, marrón, gris, blanco, rojo, negro, amarillo, violeta, rosa y azul claro. La secuencia de colores se repite según sea necesario.

Sobre los tubos trenzados, se aplican capas de cinta de poliéster o polipropileno que mantienen la estructura unida y proporcionan protección adicional. A continuación, si el cable es blindado, se aplica una armadura de cinta de acero corrugada. La armadura es una cinta de acero con un espesor de 0,15 a 0,25 milímetros, enrollada en espiral alrededor del núcleo. La armadura protege contra roedores, que pueden roer la cubierta externa de plástico, y contra impactos. En cables que se instalarán en ductos compartidos con cables de energía, la armadura también sirve como puesta a tierra.

La cubierta externa es de polietileno de alta densidad, o HDPE, con un espesor de 1,5 a 3 milímetros. El HDPE es resistente a la abrasión, a la radiación ultravioleta y a la mayoría de los productos químicos presentes en el suelo. El color de la cubierta externa varía según la aplicación: negro para cables enterrados o en ductos; amarillo para cables aéreos ADSS; verde para cables de acceso FTTH.

El procedimiento de apertura de un cable de tubo suelto con gel es una operación que exige precisión y paciencia. El técnico utiliza un cortador de anillo,

como el Miller L-8677, ajustando la profundidad de la hoja para cortar solo la cubierta externa sin alcanzar los tubos internos. El cortador se gira alrededor del cable en dos puntos separados por unos 50 centímetros. A continuación, se realiza un corte longitudinal entre los dos anillos, y la cubierta externa se retira con un extractor de cubierta. Si hay armadura, se utiliza el cortador de armadura RA-2, girándolo alrededor de la armadura para cortarla en espiral. La armadura se retira con un alicate de punta fina, teniendo mucho cuidado de que los bordes cortantes no entren en contacto con los tubos.

Con la cubierta externa y la armadura retiradas, los tubos sueltos quedan expuestos. El técnico identifica cada tubo por el color de la cinta de identificación o por el serigrafiado en la propia cubierta del tubo. El elemento central de resistencia se corta a unos 5 centímetros del punto de entrada en la caja de empalme. Este elemento se fijará al perno de la caja de empalme para transferir la tracción del cable a la caja.

La limpieza del gel es la etapa más tediosa y la más crítica. El técnico utiliza paños desechables que no suelten pelusa, humedecidos en isopropanol al 99

por ciento. El paño se pasa a lo largo del tubo en un solo sentido, desde la base hacia la punta, eliminando todo el gel visible. Nunca se debe pasar el paño en movimiento de vaivén, porque eso depositaría el gel de nuevo en la superficie. Después de la limpieza externa, el técnico utiliza un removedor de recubrimiento de anillo para retirar unos 5 centímetros del tubo en el extremo, exponiendo las fibras con su recubrimiento primario de 250 micrómetros. Las fibras se limpian nuevamente con un paño de isopropanol para eliminar cualquier residuo de gel que pueda haberse adherido al recubrimiento primario.

1.2.3 Cable de tubo suelto con cinta seca: la alternativa sin gel

En los últimos años, las operadoras han migrado hacia cables de tubo suelto con cinta seca, especialmente para aplicaciones donde la agilidad de instalación es crítica. Esta construcción fue desarrollada por Corning a finales de los años 1990 y perfeccionada por otros fabricantes desde entonces.

En la construcción con cinta seca, el gel se sustituye por hilos superabsorbentes y cintas de poliéster