



Análisis del espectro óptico en las comunicaciones por fibra óptica

Robert Pous Grébol
Ingeniero de Telecomunicaciones
Laboratorio de Telecomunicación de PROMAX Electronica S.A.

www.promax.es

Los orígenes. Descubrimiento de los colores

→ 380 - 700 nm

Verano de 1665. Una terrible peste asola la región de Londres. La Universidad de Cambridge se ve obligada a cerrar sus aulas y enviar a estudiantes y profesores a sus casas.

Uno de estos estudiantes es un joven de 22 años, **Isaac Newton**, que va a pasar en su pueblo natal, Woolsthorpe, dos años de vacaciones forzadas.

Las vacaciones más fructíferas de la historia de la ciencia.

A lo largo de estos meses Newton va a concebir, experimentar y desarrollar sus geniales ideas sobre la naturaleza de la luz, la gravitación universal y sobre el método de flujiones.

A principios de **1666**, valiéndose de un prisma y un agujero en la contraventana de su habitación va a demostrar que la luz del sol es una mezcla de colores del espectro.



Isaac Newton (1643 - 1727)

En las redes actuales de fibra óptica se hace cada vez más necesario el análisis espectral en cualquier punto de la red. Los sistemas WDM convierten las fibras ópticas en verdaderas autopistas de información con capacidades de hasta 1Tb/s (1×10^{12} b/s). Esto se ha logrado gracias a un mayor aprovechamiento de la banda espectral de la fibra óptica. Actualmente pueden transmitirse hasta 200 láseres de distinta longitud de onda en una misma fibra. Para el test y mantenimiento de estas redes es fundamental manejar equipos portátiles que trabajen en el dominio de la longitud de onda. Una nueva generación de equipos de medidas ópticas en campo está naciendo.

Descubrimiento del infrarrojo

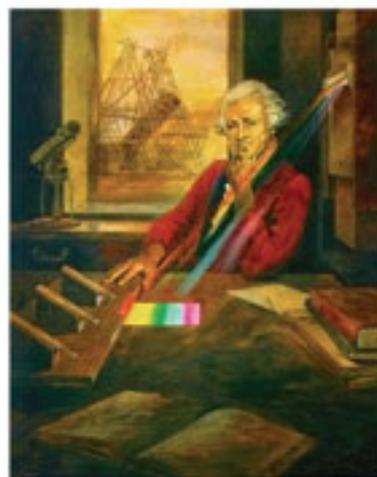
→ 700 - 1 000 000 nm

En 1800 **Sir Frederick William Herschel** dirigió la luz del sol a través de un prisma para crear un espectro y midió la temperatura de cada color.

A la hora de medir la temperatura de la luz de colores violeta, azul, verde, amarillo, naranja y roja, notó que la temperatura de los colores se incrementaba desde la muestra violeta a la parte roja del espectro.

Después de notar este patrón, Herschel decidió medir la temperatura más allá de la porción roja del espectro, en una región aparentemente desprovista de luz del sol. Para su sorpresa, encontró que esta región tenía la temperatura más alta de todas.

Lo que William Herschel había descubierto era una forma de energía más allá de la luz roja. Estos "rayos caloríficos" se renombraron **rayos infrarrojos**.



Frederick William Herschel (1738 - 1822)

"En los 30 años desde que nuestro descubrimiento de la fibra con baja pérdida, más de 300 millones de kilómetros de fibra óptica se han desplegado a nivel mundial. Estas fibras solas pueden manejar más información que todo los miles de millones de kilómetros de cables de cobre instalados durante el último siglo. Serían necesarios 2 toneladas métricas de alambre de cobre para transmitir la información que se puede con un poco más de 1 lb de fibra. En laboratorio hoy, una sola fibra puede transmitir el equivalente de 60 millones de llamadas telefónicas simultáneas."

Dr. Donald Keck, 1999

El camino hacia la fibra óptica

→ 1 550 nm

Por los años 40 del siglo XIX, el físico suizo Daniel Collodon y el francés Jacques Babinet, demostraron que la luz podía guiarse a lo largo de los chorros de agua de una fuente. John Tyndall popularizó la idea en 1854 en base a un experimento que usaba un chorro de agua fluyendo desde un tanque.

En 1954, Van Heel de Holanda y Hopking presentaron un estudio acerca de un conductor óptico en "Nature". Sus publicaciones **hicieron que la fibra óptica empezara a desarrollarse**. Hacia 1960, ya se habían desarrollado fibras con cubierta de vidrio con pérdidas de 1 dB por metro.

Un **paso fundamental** en la consecución definitiva de las comunicaciones por fibra óptica fue el descubrimiento del láser por Theodore Maiman. En el año 1962 ya se realizaron los primeros láseres semiconductores.

El **gran avance** se produjo en 1970 en Corning Glass Works, cuando Donald Keck, Peter Schultz y Robert Maurer lograron fabricar con éxito una fibra óptica de cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockham habían propuesto.

Poco después, Panish y Hayashi, de los Laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente, y John MacChesney y sus colaboradores, también de los Laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras.

Evolución de la fibra óptica

→ 1 300 nm

La primera prueba se realizó en AT&T en Atlanta en **1976**.

Los equipos de trabajo instalaron dos cables de fibra óptica, cada uno de los cuales medía 630 metros de largo y contenía 144 fibras, tirando de ellos a través de conductos subterráneos estándar, para lo que se requería que los cables pudieran sortear curvas cerradas. El servicio comercial comenzó al año siguiente en Chicago, donde un sistema de fibra óptica transportaba voz, datos y señales de vídeo a través de 2,4 km de cables subterráneos que conectaban dos oficinas de conmutación de la compañía telefónica de Illinois Bell Telephone Company.

Estas primeras generaciones de sistemas podían transmitir luz a varios kilómetros sin repetidor, pero estaban limitadas por una atenuación de aprox. 2 dB/km. Pronto apareció una **segunda generación** de fibra, usando los nuevos láseres de InGaAsP que emitieron a 1.3 μm , donde la atenuación de la fibra era tan baja como 0.5 dB/km, y la dispersión del pulso reducida a 850 nm.

En 1983 MCI, una de las grandes compañías de larga distancia en los Estados Unidos fue la primera en tender una **Red Nacional de Fibra óptica** en los Estados Unidos.

A fines de los años ochenta, los sistemas tendían a operar a mayores longitudes de onda. La fibra de dispersión desplazada (DSF), se introdujo en 1985, y anunció una nueva era en las comunicaciones ópticas. Uniendo el mínimo de atenuación en la ventana de 1,550nm con dispersión cero en la misma longitud de onda, mayores velocidades de datos podrían llevarse a distancias mayores.

En 1978, el total de fibra óptica instalada en el mundo era solamente de 960 km. En 1980, AT&T presentó a la comisión federal de comunicaciones de EE.UU. (Federal Communications Commission) un proyecto de sistema que conectaría las principales ciudades del corredor de Boston a Washington. Cuatro años después, cuando el sistema comenzó a funcionar, su cable de menos de 1 pulgada (2,5 cm) de diámetro, proporcionaba 80.000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. Para entonces, la longitud total de los cables de fibra únicamente en los Estados Unidos alcanzaba **400.000 km**, suficiente para llegar a la Luna.

Pronto, cables similares atravesaron los océanos del mundo. El primer **cable transatlántico** comenzó a funcionar en **1988**, usando un cristal tan transparente que los amplificadores para regenerar las señales débiles se podían colocar a distancias de más de 64 km. Tres años después, otro cable transatlántico duplicó la capacidad del primero. Los cables que cruzan el Pacífico también han entrado en funcionamiento ofreciendo un servicio telefónico fácil para el creciente comercio entre los Estados Unidos y Asia.

En 1990, los Laboratorios Bell transmiten una señal de **2.5 Gb/s** a través de 7.500 km sin regeneración. El sistema usaba un láser solitón y un amplificador EDFA que permitía a la onda de luz mantener su forma y densidad.

En 1998, los mismos laboratorios Bell transmitieron 100 señales ópticas de 10 Gb/s por una sola fibra de 400 km. En este experimento, gracias a las técnicas **WDM** (*wave-division multiplexing*) que permite combinar múltiples longitudes de onda en una sola señal óptica, se incrementó la capacidad de transmisión de una fibra en un terabit por segundo (10^{12} b/s).

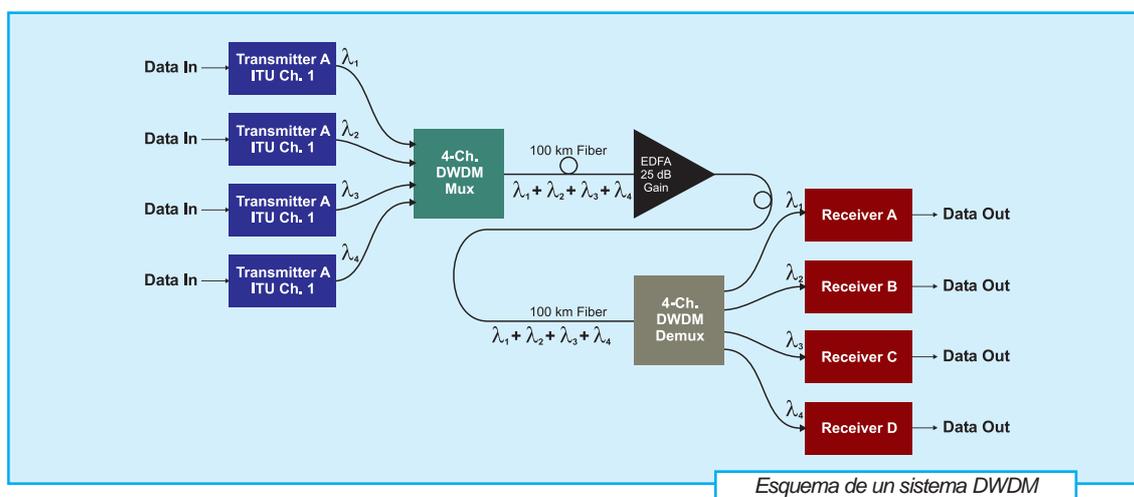
La tecnología DWDM

→ 1 530 - 1 610 nm

En la década de los 90 tuvo lugar un increíble crecimiento de la necesidad de la **capacidad** en las comunicaciones, tanto en términos de velocidad como en cobertura geográfica. La transmisión de **TV digital**, **voz**, **datos**, la **telefonía móvil** y la aparición del fenómeno **Internet** han hecho que el tráfico de la información requiera de medios de elevada capacidad. Las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones se empezaron a aplicar en telefonía de voz, pero actualmente están presentes total o parcialmente en cualquier sistema de comunicación.

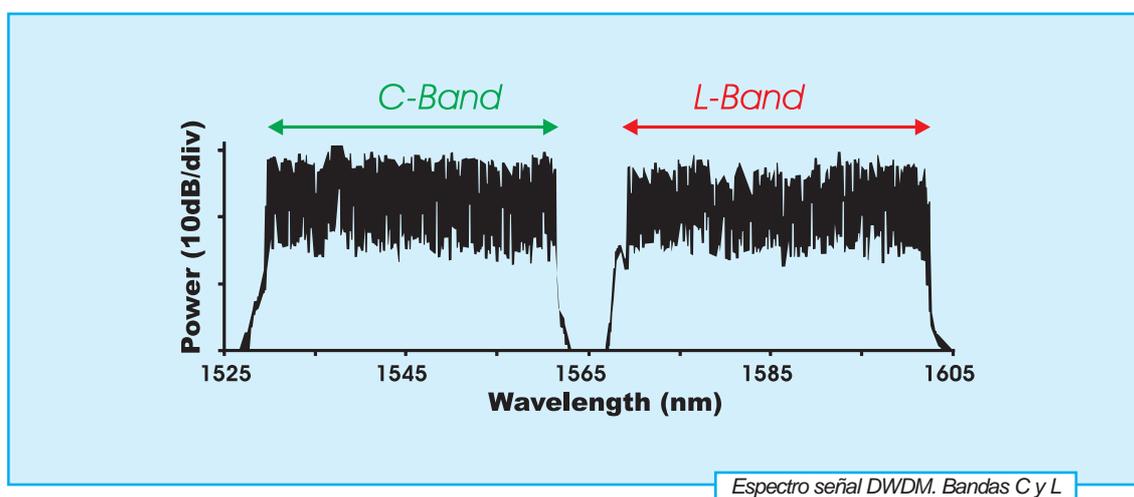
No obstante, el índice de crecimiento en la capacidad de transmisión exigido por estos nuevos servicios es exponencial y la única tecnología que actualmente puede afrontar este crecimiento es el multiplexado denso en longitud de onda DWDM.

Estos sistemas están basados en la capacidad de la fibra en transportar diferentes longitudes de onda (colores) simultáneamente sin mutua interferencia. Cada longitud de onda representa un canal óptico dentro de la fibra.



El desarrollo de la industria de la fibra de dispersión no nula (**NZDSF**) es una respuesta directa a los efectos no lineales de la propagación. Se cambia la longitud de onda de dispersión cero fuera de la ventana de operación, introduciendo así una cantidad pequeña pero finita de dispersión para lograr reducir los efectos no lineales en DWDM

Los primeros cables NZDSF disponibles comercialmente con una gran área eficaz aparecen en 1998. Aumentando el área eficaz del modo de campo dentro de la fibra reduciendo los efectos no lineales que pueden producirse. Los beneficios técnicos son inmediatos: la capacidad del manejo de la potencia es más alta, la relación señal / ruido es mayor y el espacio entre amplificadores es mayor también.



La tecnología CWDM

→ 1 250 - 1 625 nm

La transmisión por **CWDM** (coarse wavelength division multiplex) está ganando popularidad en aplicaciones tales como acceso metropolitano 10 GbE, CATV, FTTH-PON, y otros sistemas de corto alcance punto a punto con servicios transparentes, utilizando protocolos tales como ESCON, FICON, Fiber Channel y Gigabit y Fast Ethernet.

La técnica de multiplexado CWDM consta de 18 longitudes de onda definidas en el intervalo 1270 a 1 610 nm con un espaciado de 20 nm.

El multiplexado por división aproximada de longitud de onda (CWDM), una tecnología WDM, se caracteriza por un **espaciado más amplio** de canales que la división densa de longitud de onda (DWDM). Los sistemas CWDM son más rentables para las aplicaciones de redes metropolitanas.

El plan de longitudes de onda descrito en la nueva Recomendación UIT-T G.694.2 tiene un espaciado de canales de **20 nm** para dar cabida a láseres de gran anchura espectral y/o derivas térmicas considerables. Este espaciado amplio de canales se basa en consideraciones económicas relacionadas con el costo de los láseres y filtros, que varían según dicho espaciado. Para dar cabida a numerosos canales en cada fibra, el plan de longitudes de onda acordado abarca la mayoría de las bandas de menos de 1.300 nm a más de 1.600 nm del espectro de fibras ópticas monomodo, recientemente aprobadas.

Los sistemas CWDM admiten distancias de transmisión de hasta **50 km** y no usan amplificación óptica. Entre esas distancias, la tecnología CWDM puede admitir diversas topologías: anillos con distribuidor (hubbed ring), punto a punto y redes ópticas pasivas. Además, se adapta correctamente a las aplicaciones de redes metropolitanas (por ejemplo, anillos locales CWDM que conectan oficinas centrales con los principales anillos exprés metropolitanos DWDM) y a las aplicaciones relativas al acceso, como los anillos de acceso y las redes ópticas pasivas.

Los sistemas CWDM pueden utilizarse como una plataforma integrada para numerosos clientes, servicios y protocolos destinados a clientes comerciales. Los canales en CWDM pueden tener diferentes velocidades binarias. Esta técnica se adapta más fácilmente a las variaciones de la demanda de tráfico ya que con ella se pueden añadir canales en los sistemas y liberarlos de éstos.

CWDM puede ser una alternativa de bajo costo a los sistemas dense wavelength division multiplexing (DWDM) para transporte óptico en cortas distancias (menos de 50 km) desde las instalaciones de las empresas al troncal metropolitano de los proveedores de servicio.

El precio de un transceptor DWDM es típicamente de cuatro a cinco veces más caro que su contrapartida de CWDM.

Medidas en redes ópticas

→ 1 250 - 1 650 nm

La prioridad para los operadores de telecomunicación de todo el mundo es **rentabilizar las redes ópticas ya existentes**. Para ello el primer paso es **aumentar su capacidad**. Los sistemas DWDM actuales, pueden incrementar en varios órdenes de magnitud la capacidad de una fibra ya existente.

En contrapartida una de las **mayores limitaciones** para este tipo de sistemas es el **coste** de los equipos de medida necesarios en el proceso de puesta en marcha y en el propio mantenimiento de la red. Cuando varias longitudes de onda comparten una misma fibra, los medidores de potencia óptica no aportan información acerca de la señal compuesta que se transmite, puesto que las medidas no son selectivas en longitud de onda.

Para la medida y monitorización de sistemas WDM se requiere caracterizar componentes y realizar medidas en puntos de la red en función de la longitud de onda. Los **analizadores de espectro ópticos** se convierten en los protagonistas de cualquier test de este tipo de sistemas.

Estos equipos son imprescindibles tanto en el proceso de fabricación e instalación de componentes de red (multiplexores, filtros, conmutadores, amplificadores, etc.) así como en los procesos de mantenimiento de la propia red.

Las medidas básicas en el dominio de la frecuencia requeridas en los sistemas WDM son:

- Medida de potencia de canal
- Medida de la longitud de onda central del canal
- Medida del espaciado entre señales
- Medida de la relación señal ruido OSNR
- Potencia total de la señal óptica.



El analizador de espectros

Para analizar las portadoras individuales se requiere de analizadores de espectros ópticos **con resoluciones por debajo de 1 nm**. En las instalaciones más avanzadas, la separación entre portadoras va de 0.8 nm (100 GHz de espaciado de canal) a 0.2 nm (25 GHz).

Estas medidas basadas en un análisis espectral óptico de alta resolución y también alta precisión han poder realizarse **en cualquier punto de la red**. Por todo ello el equipo de medida, y más concretamente, el analizador de espectros (OSA) dirigido a aplicaciones en redes WDM debe ser un equipo **portátil**, robusto, de fácil y rápido manejo y precio moderado. No hay que olvidar que hasta la llegada de los sistemas WDM, los analizadores de espectros eran equipos básicamente **de laboratorio, no portátiles** y de elevado coste. Los sistemas WDM exigen multitud de medidas ópticas en campo y los analizadores ópticos de laboratorio no son apropiados para medidas en el exterior.

Otra prestación necesaria en los equipos de medida dirigidos a redes WDM es la de poseer **procedimientos de medidas especializados** que facilite y a la vez agilice el trabajo del personal técnico. El equipo **PROLITE-60**, desarrollado por la empresa PROMAX Electronica SA, está dotado de algoritmos dedicados a cada aplicación.



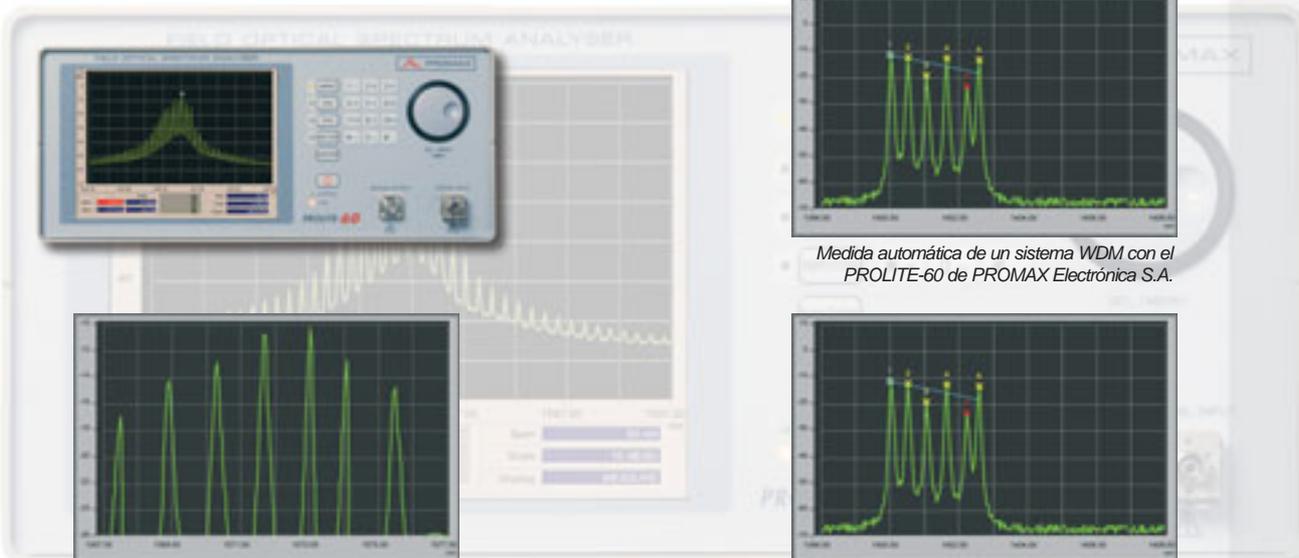
Medidas de campo con el PROLITE-60 de PROMAX Electronica S.A.

Partiendo de la filosofía de un analizador de espectro básico, el equipo permite realizar medidas automáticas en todos los ámbitos de aplicación, tanto en el análisis de la señal WDM **en cualquier punto de la red** como la caracterización de componentes de la red: Filtros, amplificadores, multiplexores, láseres DFB, láseres FB y LEDs.

Analizador de espectros óptico PROLITE-60 de PROMAX

El **PROLITE-60** es el primer analizador de espectros óptico verdaderamente **portátil**, robusto y con funcionamiento a baterías disponible a un costo verdaderamente interesante.

El **PROLITE-60** es también adecuado para otras muchas aplicaciones tales como reflectometría, análisis de composición de materiales, sensores de fibra, caracterización de dispositivos de redes fotónicas (conmutadores, acopladores, filtros, etc.).



Espectro de un sistema WDM medido con el PROLITE-60 de PROMAX Electronica S.A.

Medida automática de un sistema WDM con el PROLITE-60 de PROMAX Electronica S.A.

Medida de un amplificador óptico con el PROLITE-60 de PROMAX Electronica S.A.

Conclusion

El aumento de la capacidad de transmisión es imparable, de hecho siempre ha sido así a lo largo de la historia, pero en la actualidad se ha disparado vertiginosamente.

El ritmo de crecimiento de la capacidad de transmisión se multiplica por diez cada cuatro años. Esto significa que **dentro de ocho años la capacidad de transmisión requerida por las redes troncales podría superar los 100 Tb/s.**

Actualmente, en el ámbito experimental, se están llevando a cabo ensayos de sistemas de enlaces ópticos a decenas de Tb/s a distancias de miles de km utilizando láseres solitones, fibras especiales que reducen los efectos no lineales, nuevos amplificadores ópticos y por supuesto técnicas WDM (**ultraDWDM**). El análisis espectral para estos sistemas es ya un requisito tan necesario como lo es para otros medios de transmisión como el coaxial o el aéreo que utilizan frecuencias de UHF o microondas.

Como hemos visto en el artículo, las primeras transmisiones en F.O. utilizaban luz a **850 nm**, luego se pasaron a **1300nm** y posteriormente a **1550nm** buscando mínimas pérdidas en la transmisión. Los sistemas WDM actuales trabajan en banda **C** y **L** (1530-1610 nm) pero ya se están desarrollando fibras que trabajen en cuarta ventana (1625 nm).

La tendencia, forzada por la necesidad de aumentar al máximo la capacidad de transmisión, es la de utilizar cada vez mayor parte del espectro óptico. En este sentido ya se están fabricando fibras ópticas que minimizan las pérdidas debidas a la absorción de las moléculas de agua en el entorno de 1470 nm de manera que también sea posible utilizar esta banda (quinta ventana).

De hecho en la actualidad la banda utilizada por las fibras ópticas está creciendo para poder cubrir las exigencias de aumento de la capacidad de transmisión. Muy posiblemente en un futuro habrá que saltar a zonas del espectro electromagnético con mucha mayor capacidad de transmisión, hacia las longitudes de onda **inferiores a la luz visible** (ultravioleta, rayos X..), lo cual permitiría dar un salto astronómico en cuanto a la capacidad de transmisión. Las fibras actuales no permiten la transmisión de estas longitudes de onda puesto que las pérdidas serían altísimas a estas longitudes. Quizás en el futuro se descubran nuevos materiales que puedan conducir esa radiación.

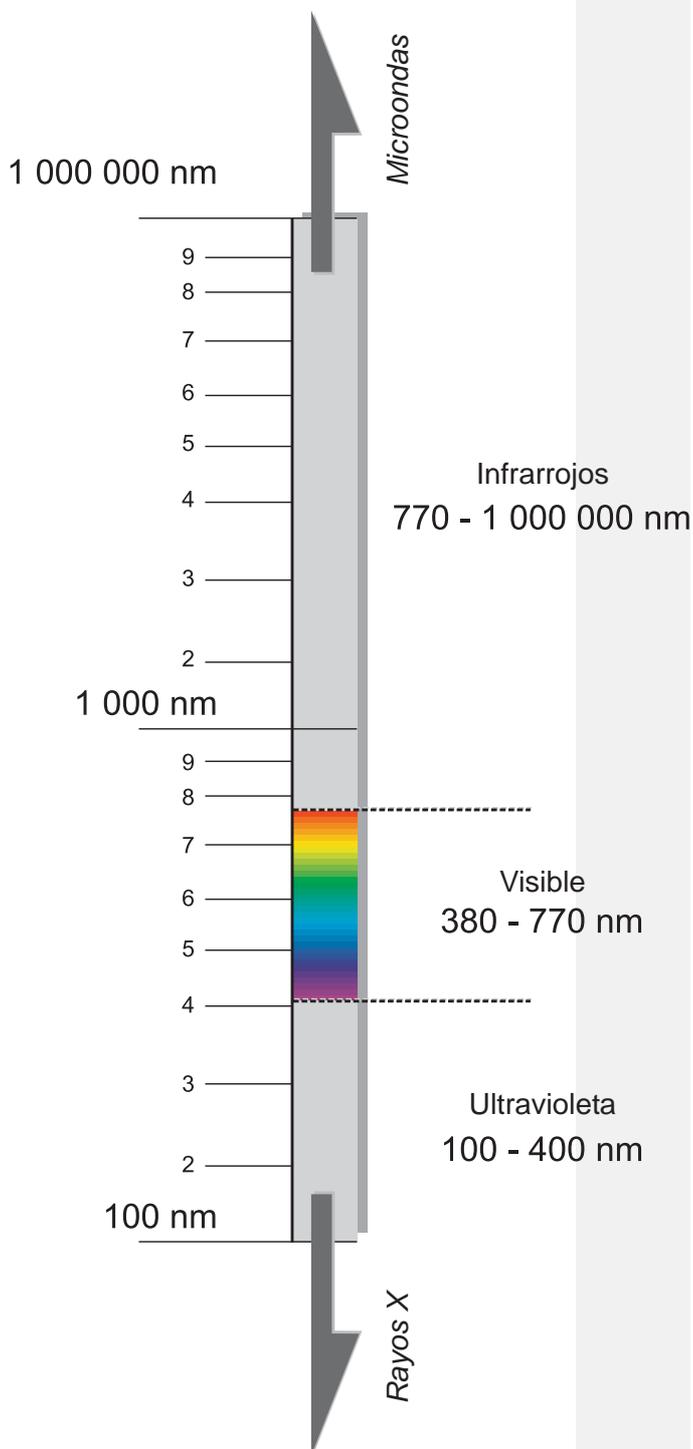
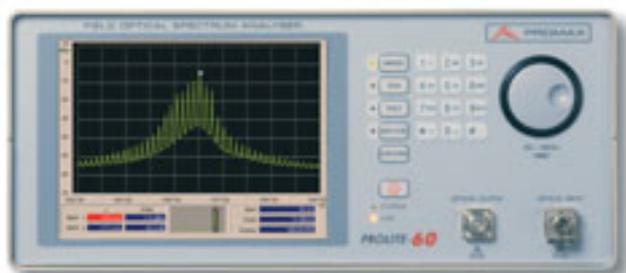


Diagrama del espectro óptico



El **PROLITE-60** es el primer analizador de espectros óptico realmente portátil, resistente y operado con baterías disponible en el mercado a un precio atractivo. Es adecuado para muchas aplicaciones. La primera y quizás la más interesante hoy en día es la comprobación de sistemas de telecomunicación WDM/CWDM pero con las varias opciones y accesorios disponibles sirve también para reflectometría, análisis de materiales, sensores de fibra óptica, comprobación de dispositivos fotónicos tales como filtros, atenuadores, acopladores, aisladores y otros componentes ópticos.

ESPECIFICACIONES	PROLITE-60
Longitud de Onda Margen de longitudes de onda Span Resolución óptica Precisión Estabilidad	De 1250 nm a 1650 nm De 400 nm a 10 nm 0,150 nm ± 0,8 nm ± 0,2 nm
Potencia Margen dinámico Precisión Planitud Estabilidad Relación señal ruido óptica (OSNR) selectivo a 1550 nm Hasta 25 GHz (± 0,2 nm) Hasta 50 GHz (± 0,4 nm) Hasta 100 GHz (± 0,8 nm)	De -60 dBm a 10 dBm ± 1 dB ± 0,5 dB ± 0,2 nm 18 dB 25 dB 30 dB
Dependencia de polarización	<1dB
Duración de ciclo	5 s
Conector óptico estándar	FC/PC
Monitor	TFT color de 6,4"
Alimentación Tensión de alimentación Duración de la batería	100-240 V AC 3 h aprox.
Características mecánicas Dimensiones Peso	294 A.x 126 Al. x 274 Pr. 5,7 k
Fuente de banda ancha (opcional)	Fuente de luz SLED de 1550 nm (Otras alternativas, consultar)
Conector óptico universal (opcional)	SC, FC, E-2000, ST, DIN