

MATERIA
Fibras Ópticas e Comunicacións

TITULACIÓN
Máster en Física

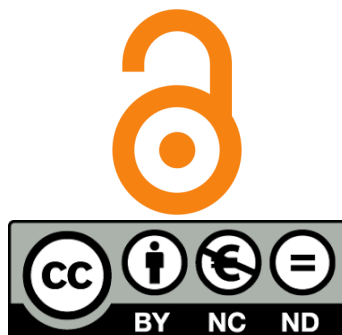
unidade
didáctica
1

Introducción ás comunicacións ópticas

Ana Isabel Gómez Varela
Raúl de la Fuente Carballo
Elena López Lago

Área de Óptica
Departamento de Física Aplicada
Facultade de Física

unidadesdidácticas
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



Esta obra atópase baixo unha licenza internacional Creative Commons BY-NC-ND 4.0. Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-ND 4.0 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.gl>

© Universidade de Santiago de Compostela, 2022

Deseño e maquetación

J. M. Gairí

Edita

Edicións USC

usc.gal/publicacions

ISBN

978-84-19679-08-6

DOI

<https://dx.doi.org/10.15304/9788419679086>

MATERIA: Fibras ópticas e comunicacións

TITULACIÓN: Máster en Física

PROGRAMA XERAL DO CURSO

BLOQUE I: FUNDAMENTOS DE COMUNICACIÓNS ÓPTICAS

Unidade 1. Introdución ás comunicacións ópticas

As comunicacións por fibra óptica no ámbito xeral das telecomunicacións

Antecedentes históricos

Evolución das comunicacións ópticas

Sistemas ópticos e sistemas de radio e microondas

Compoñentes básicas dun sistema de comunicacións ópticas

Unidade 2. O sinal: técnicas de modulación e detección

O sinal e o seu formato

Multiplexado de sinais

Formatos e técnicas de modulación

Recuperación do sinal

Detección coherente

BLOQUE II: FUNDAMENTOS DE PROPAGACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS

Unidade 3. Propagación en fibras ópticas

Fibras de salto de índice. Tratamento xeométrico

Fibras de gradiente de índice. Tratamento xeométrico

Fibras de salto de índice. Tratamento electromagnético

Unidade 4. Fibras monomodo

Características das fibras monomodo

Propagación de pulsos. Ecuación básica

BLOQUE III: FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS

Unidade 5. Dispersión

Dispersión material

Dispersión de guía de onda

Dispersión por polarización

Propagación de pulsos

Efectos da anchura de banda da fonte

Minimización e compensación da dispersión

Unidade 6. Atenuación da radiación

Concepto de atenuación

Mecanismos de atenuación

Compensación das perdas mediante amplificación óptica

Unidade 7. Efectos non lineais

Automodulación de fase

Mestura de catro ondas

Esparexemento estimulado

ÍNDICE

PRESENTACIÓN

OBXECTIVOS E COMPETENCIAS

1. Obxectivos
2. Competencias

PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

ACTIVIDADES PROPOSTAS

CONTIDOS

1. As comunicacións por fibra óptica dentro do ámbito xeral das telecomunicacións
2. Antecedentes históricos
 - 2.1. Comunicacións ópticas desde a antigüidade
 - 2.2. Era eléctrica
 - 2.3. Era óptica
3. Evolución das comunicacións ópticas
4. Sistemas ópticos e sistemas de radio e microondas
5. Compoñentes básicas dun sistema de comunicacións ópticas
 - 5.1. Transmisores ópticos
 - 5.2. Canle de comunicación óptica
 - 5.3. Receptores ópticos

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

OUTRAS FONTES E RECURSOS DE CONSULTA

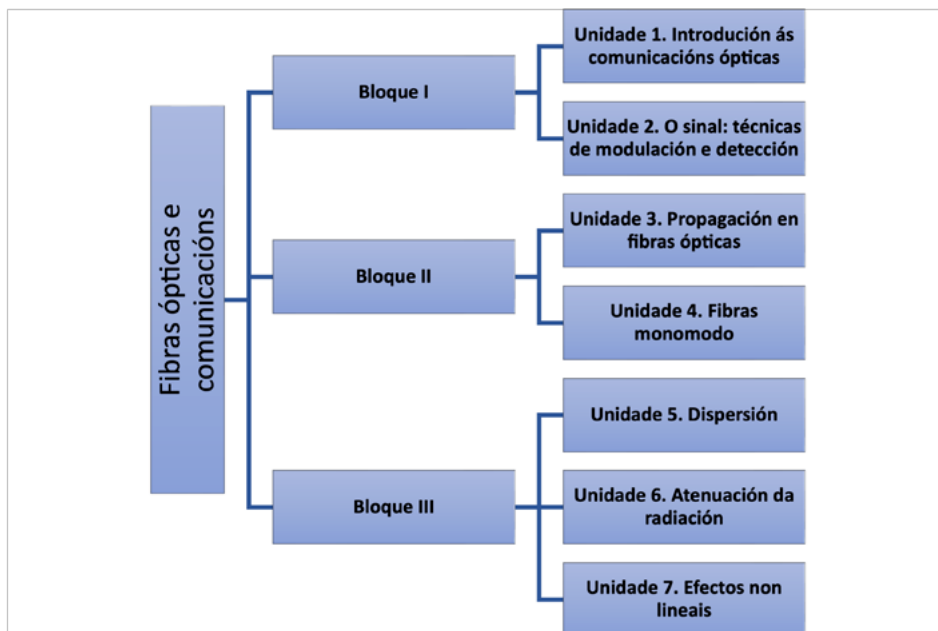
PRESENTACIÓN

A dramática redución das perdas na transmisión a través de fibras ópticas, xunto co desenvolvemento igualmente crítico doutras compoñentes como fontes de luz e detectores, revolucionou o campo das telecomunicacións. De feito, o nacemento das comunicacións ópticas coa obtención de fibras con baixas perdas e desenvolvemento de láseres de semiconductor capaces de operar a temperatura ambiente tivo lugar ao principio dos anos 70 do século pasado. Así, a comunicación por fibra óptica constitúe o presente e futuro da transmisión de datos. A súa evolución continúa de forma practicamente imparabile grazas ao avance da tecnoloxía e o aumento da demanda actual de comunicación.

A materia “Fibras ópticas e comunicacións” (3 ECTS) impártese no segundo semestre do Máster Universitario en Física vinculada á especialidade en Física da Luz e a Radiación. A materia está estruturada en tres grandes bloques temáticos. O Bloque I céntrase na presentación dos conceptos fundamentais das comunicacións ópticas, introducindo primeiro a localización das mesmas no ámbito xeral das telecomunicacións. A continuación preséntase unha perspectiva histórica e a evolución das comunicacións con luz, comentando de forma cronolóxica os desenvolvementos máis destacados acontecidos ata os sistemas de comunicacións ópticos actuais. Neste bloque discútenanse tamén as diferenzas entre os sistemas ópticos e os sistemas de radio e microondas así como as compoñentes principais que conforman un sistema de comunicacións ópticas. A segunda parte do Bloque I está dedicada ao sinal e tipos de formato xunto coas técnicas de multiplexado ou envío simultáneo de múltiples sinais a través dun enlace de comunicacións. Rematarase cos formatos e técnicas de modulación máis habituais e os sistemas de detección do sinal. O Bloque II introduce os diferentes tipos de fibras ópticas xunto co fenómeno da propagación nas mesmas e os factores que limitan a súa capacidade para transmitir información. Preséntase primeiro un estudo cualitativo da propagación da luz en fibras ópticas a través da teoría de raios ou óptica xeométrica, válido para fibras multimodo. Este primeiro achegamento ao estudo da propagación da radiación nas fibras, o cal permite introducir unha serie de conceptos básicos de forma sinxela, ten dous inconvenientes: (i) non é capaz de analizar todos os casos de propagación (por exemplo, fibras monomodo), (ii) non explica de forma correcta algúns aspectos da propagación en fibras multimodo. Así, realízase unha análise máis rigorosa da propagación en fibras multimodo a través da teoría electromagnética de Maxwell e discútenase a aproximación de guiado débil. A parte final deste bloque recolle o estudo particular da fibra monomodo e os seus parámetros fundamentais (frecuencia de corte, birrefrinxencia, diámetro de campo modal, etc.). O terceiro e último dos bloques está dedicado ao estudo dos fenómenos básicos que afectan á propagación da luz en fibras ópticas e, en particular, á súa capacidade de transmisión. Primeiro introdúcense os mecanismos máis importantes de dispersión (material, de guía de onda, por polarización), así como o estudo da propagación de pulsos na fibra e as estratexias de minimización e compensación da dispersión. A continuación analízanse os mecanismos esenciais de perdas sufridos

pola radiación que se propaga a través dunha fibra e a compensación de ditas perdas mediante a amplificación óptica. Por último, estudaranse os efectos non lineais que poden aparecer durante a propagación e de que maneira poden perturbar a calidade do sinal transmitido, así como as estratexias para minimalizalos.

Figura 1: Programación da materia Fibras Ópticas e Comunicacións.



Fonte: elaboración propia.

A distribución horaria da materia é a seguinte:

- Clases expositivas: 20 h.
- Clases interactivas de seminario: 10 h.
- Titorías: 1 h.
- Traballo autónomo (estudo, resolución de exercicios, realización de tarefas, etc.) 44 h.
- Total: 75 h

A presente unidade didáctica, de título “Introdución ás comunicacións ópticas”, está encadrada no Bloque I, e supón a primeira toma de contacto do estudantado coa materia. Fundamentalmente a unidade didáctica busca enmarcar as comunicacións ópticas dentro do ámbito das telecomunicacións e dar ao estudantado unha visión xeral da evolución das mesmas desde os inicios das comunicacións por luz. Introducidos os elementos básicos dun sistema de comunicación, identifícanse nunha perspectiva global as vantaxes e desvantaxes dos sistemas de comunicación óptica

fronte aos de ondas radio ou microondas, rematando a unidade detallando as compoñentes principais que se atopan nos sistemas de comunicacións ópticas. Por último, debemos indicar que a distribución temporal da unidade didáctica está deseñada para ser desenvolvida en 4 horas de clases presenciais, das cales 3 horas estarán dedicadas a sesións expositivas e 1 hora á sesión interactiva de seminario.

OBXECTIVOS E COMPETENCIAS

1. Obxectivos

Os obxectivos xerais da materia “Fibras ópticas e comunicacións” na que está encadrada a unidade didáctica, son os seguintes:

- Identificar os elementos e conceptos máis destacados da propagación da luz nas fibras ópticas e da súa aplicación nas comunicacións ópticas.
- Avaliar os efectos da atenuación e a dispersión na calidade do sinal óptico, en particular a súa influencia no ancho de banda das canles de comunicación, así como coñecer os mecanismos deseñados para a amplificación e rexeneración do sinal.

No que se refire en particular a esta unidade didáctica, ao fin da mesma o estudantado poderá:

- Recoñecer o peso específico das comunicacións ópticas dentro das telecomunicacións.
- Coñecer os antecedentes históricos das comunicacións ópticas.
- Identificar os elementos básicos que forman parte dun sistema de comunicacións e a súa función.
- Coñecer as vantaxes dos sistemas de comunicación por fibra óptica fronte a outros sistemas de comunicación.

2. Competencias

As competencias asociadas a esta unidade didáctica son as seguintes:

XERAIS

CG01 - Adquirir a capacidade de realizar traballos de investigación en equipo.

CG02 - Ter capacidade de análise e de síntese.

CG03 - Adquirir a capacidade para redactar textos, artigos ou informes científicos conforme aos estándares de publicación.

CG04 - Familiarizarse coas distintas modalidades usadas para a difusión de resultados e divulgación de coñecementos en reunións científicas.

CG05 - Aplicar os coñecementos á resolución de problemas complexos.

BÁSICAS

CB6 - Posuír e comprender coñecementos que aporten unha base ou oportunidade de ser orixinais no desenvolvemento e/ou aplicación de ideas, a miúdo

nun contexto de investigación.

CB7 - Que os estudantes saiban aplicar os coñecementos adquiridos e a súa capacidade de resolución de problemas en contornas novas ou pouco coñecidos dentro de contextos máis amplos (ou multidisciplinares) relacionados coa súa área de estudo.

CB8 - Que os estudantes sexan capaces de integrar coñecementos e enfrontarse á complexidade de formular xuízos a partir dunha información que, sendo incompleta ou limitada, inclúa reflexións sobre as responsabilidades sociais e éticas vinculadas á aplicación dos seus coñecementos e xuízos.

CB9 - Que os estudantes saiban comunicar as súas conclusións e os coñecementos e razóns últimas que as sustentan a públicos especializados e non especializados dun modo claro e sen ambigüidades.

CB10 - Que os estudantes posúan as habilidades de aprendizaxe que lles permitan continuar estudando dun modo que haberá de ser en gran medida autodirixido ou autónomo.

TRANSVERSAIS

CT01 - Desenvolver a capacidade para interpretar textos, documentación, informes e artigos académicos en inglés, idioma científico por excelencia.

CT02 - Desenvolver a capacidade para a toma de decisións responsables en situacións complexas e/ou responsables.

ESPECÍFICAS

CE10 - Comprender e asimilar tanto aspectos fundamentais como máis aplicados da Física da luz e a radiación.

CE11 - Adquirir coñecementos e dominio das estratexias e sistemas de transmisión da luz e a radiación.

PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

As actividades formativas con presenza do profesorado que se desenvolverán ao longo deste unidade didáctica son:

- **Sesións expositivas.** Durante estas sesións o profesorado da materia exporá os principios teóricos e os contidos fundamentais do temario. Para isto seguirase un formato de clase maxistral, se ben se incentivará a participación activa dos estudantes. Empregaranse os medios audiovisuais dispoñibles na aula para a realización de presentacións.
- **Sesión interactivas de seminario.** As clases interactivas de seminario destinaranse á resolución de problemas relacionados cos contidos expostos nas clases expositivas, servindo para afianzar os conceptos adquiridos previamente.
- **Titorías.** As sesións anteriores estarán apoiadas por titorías nas que o profesorado proporcionará un seguimento máis individualizado do progreso do alum-

nado. Nestas sesións resolveranse dúbidas sobre os contidos da materia, prestarase consello sobre materiais de consulta, bibliografía, etc.

Poñerase a disposición do alumnado no Campus Virtual o material docente necesario. Tamén se utilizará esta plataforma para propoñer e realizar distintas actividades e como método de titorización complementario ás titorías presenciais. A outra ferramenta tecnolóxica que dará soporte durante o desenvolvemento das unidades didácticas da materia é Teams, principalmente para os casos nos que sexa preciso levar a cabo reunións virtuais ou compartir material.

ACTIVIDADES PROPOSTAS

Unha das actividades propostas é a realización dun glosario que recolla as definicións e conceptos máis destacados da materia. Así, para cada unidade didáctica e a medida que se avance na impartición dos contidos da materia o estudantado deberá ir incorporando os termos que consideren máis importantes xunto coa súa descrición. Buscarase información o máis actualizada posible para ter en consideración os últimos avances no eido das comunicacións ópticas e as fibras. Con esta actividade buscamos asentar conceptos e motivar o interese pola materia mediante unha actividade colaborativa. Tras a finalización de cada unidade didáctica o estudantado disporá de media hora para discutir cales son os conceptos para incluír no glosario e repartir as tarefas, polo que o/a docente poderá observar as dinámicas de traballo entre estudantes. As tarefas principais da actividade son a elección dos conceptos que consideren máis interesantes entre os que se van introducindo nas sesións expositivas da materia. Despois farán unha primeira asignación entre todos sobre quen se encarga de cada entrada, pero tamén poderán duplicar as entradas no glosario cando consideren que falta información. Os recursos que darán soporte e/ou axudarán a levar a cabo a actividade son principalmente o material de estudo facilitado polo profesorado na aula e posto a súa disposición na aula virtual, a bibliografía recomendada da unidade didáctica (dispoñible a través da BUSC da USC) e busca de información na rede (empregando por exemplo bases de datos como Scopus ou Web of Science). Para levar a cabo a actividade utilizarán a ferramenta glosario do campus virtual da USC. Dita ferramenta permite a introdución de conceptos e a súa descrición, así como a incorporación de imaxes, videos e ligazóns. A avaliación basearase na visualización da participación a través do campus virtual, onde primarán os criterios de pertinencia da actuación ao contido da unidade didáctica e a calidade da explicación aportada. Adicionalmente, o alumnado que opte por un sistema de avaliación continua, deberá realizar un traballo individual que pode versar sobre as distintas unidades didácticas da materia, podendo escoller un traballo relacionado coa presente unidade didáctica. O traballo será entregado por escrito cunha extensión mínima e máxima de 10 e 15

páxinas, respectivamente, e presentado de forma oral nunha das sesións presenciais.

CONTIDOS

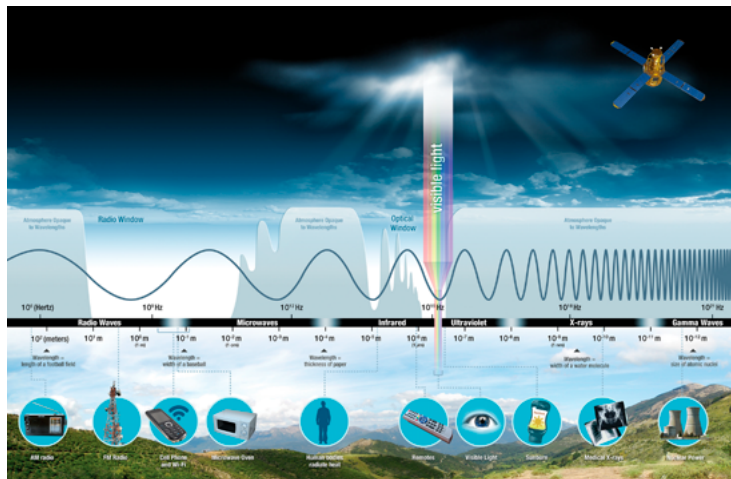
1. As comunicacións por fibra óptica dentro do ámbito xeral das telecomunicacións

A Unión Internacional de Telecomunicacións (UIT) define como **telecomunicación** toda transmisión, emisión e recepción de sinais, sinais escritos, imaxes, sons e información de calquera natureza por cable, radioelectricidade, **medios ópticos** ou outros sistemas electromagnéticos. Para a transmisión da información a longas distancias e altas velocidades de xeito eficaz os sistemas de comunicación fan uso de portadoras electromagnéticas correspondentes a unha determinada banda do espectro electromagnético (figura 2). Os elementos básicos que conforman de forma xeral calquera sistema de comunicación son: emisor, receptor, canle e sinal. Cando falamos de forma particular de sistemas de comunicacións ópticos e eléctricos temos que a diferenza esencial entre eles se atopa na frecuencia da portadora usada para transportar a información.

Podemos realizar unha primeira clasificación dos sistemas ópticos en dúas categorías atendendo á natureza da canle de comunicación:

- **Comunicacións non guiadas:** o sinal propágase na atmosfera ou no espazo ba-leiro.
- **Comunicacións guiadas:** o sinal está confinado nunha fibra óptica.

Figura 2: O espectro electromagnético.



Fonte: Nasa.

A *calidade* dun enlace de comunicacións ópticas avalíase en función do seu **rendemento**. Este parámetro calcúlase como o produto *capacidade-distancia*, onde definimos:

- **Capacidade (B):** Máxima cantidade de información que se transmite por unidade de tempo fixado un nivel de erro. Médese en bits por segundo (b/s).
- **Distancia (L):** distancia máxima á que se transmite a información sen ter que utilizar un repetidor. Médese en km.

As comunicacións ópticas prodúcense nunhas bandas ou rexións do espectro electromagnético coñecidas coma bandas ópticas. Como xa mencionamos, poden ser por un lado comunicacións non guiadas (a radiación luminosa trasnmítese polo espazo libre) ou guiadas (cando a radiación se transmite confinada nunha canle como a fibra óptica). Caracterízanse por ter unha portadora cuxa lonxitude de onda se atopa entre 300 nm e 10 μm . No caso das comunicacións por fibra óptica as portadoras atópanse nun rango entre 800 e 1600 nm. Do mesmo xeito, dentro da banda de transmisión das fibras ópticas distínguese entre outras tres rexións que se corresponden a tres xanelas espectrais, coñecidas como xanelas das comunicacións ópticas. A súa importancia débese a que nesas rexións (ou xanelas) as perdas de potencia sufridas por un sinal que se propaga na fibra é máis baixa que nas adxacentes, estando ditas rexións localizadas ao redor de 0.85, 1.3 e 1.55 μm e correspondéndose coa primeira, segunda e terceira xanela de comunicación, respectivamente. A primeira destas xanelas foi empregada basicamente por razóns tecnolóxicas, sendo as máis interesantes desde o punto de vista de eficiencia na transmisión a segunda e terceira.

A segunda e a terceira xanela de comunicación actualmente desdóbranse noutras bandas ou sub-bandas atendendo á súa localización espectral, as cales se recollen na táboa 1. Como se amosa na táboa 1, a terceira xanela basicamente desdóbrase nas bandas C, L e U. É interesante comentar que orixinalmente á banda S non se lle prestou especial atención debido ao alto nivel de absorción que presentaban as fibras nese rango de lonxitudes de onda. Hoxe en día as perdas de absorción nesa rexión están practicamente suprimidas o cal permite o seu uso de forma eficiente.

Táboa 1: Bandas de comunicacións ópticas.

Banda	Nome	Rango
O	Orixinal	1260 a 1360 nm
E	Estendida	1360 a 1460 nm
S	Lonxitudes de onda curtas	1460 to 1530 nm
C	Convencional ("erbium window")	1530 to 1565 nm
L	Lonxitudes de onda longas	1565 to 1625 nm
U	Lonxitudes de onda ultralongas	1625 to 1675 nm

2. Antecedentes históricos

A comunicación visual ten sido desde sempre o método preferente para transmitir información a longas distancias dado que a luz pode viaxar no aire máis lonxe que o son. A continuación preséntanse algúns dos fitos máis importantes previos ao que coñecemos na actualidade como comunicacións ópticas.

2.1. Comunicacións ópticas desde a antigüidade

Pode considerarse que uso da luz con fins de comunicación remóntase á antigüidade se interpretamos a comunicación óptica nun senso amplo, o que carrega calquera esquema de comunicación que empregue a luz. Deste xeito, enuméranse algunhas das formas de comunicación luminosa precursoras aos modernos sistemas ópticos de comunicación:

- **S. VI a.C.:** un dos primeiros exemplos de comunicacións ópticas é a Phryctoriae da antiga Grecia, un sistema de torres construídas nas cimas das montañas utilizado para enviar mensaxes acendendo cacharelas. Supostamente, así foi como se difundiu a noticia da caída de Troia. Esquilo narra case ao principio do *Agamenón*, a primeira traxedia da Orestíada, como tivo coñecemento deste acontecemento, e relata o paso de sinais xerados mediante indicacións luminosas (lume).
- **S. XVI:** os ingleses avisan da proximidade da Armada Invencible mediante sinais de fume.
- **S. XVIII:** úsanse lámpadas para transmitir información entre barcos.
- **1794:** transmítese o primeiro telegrama da historia dende Lille a París, ao longo de 230 km e 22 torres mediante un sistema de semáforos ou telégrafos ópticos desenvolvido por Claude Chappe. O telégrafo óptico pode considerarse o primeiro sistema de telecomunicación óptica que se estendeu por toda Europa nun período de 40 anos, de 1800 a 1840. Porén, foi pronto eclipsado polos sistemas de telecomunicación eléctrica baseados en liñas telegráficas e telefónicas.
- **S. XIX:** Alexander Graham Bell inventa o fotófono, un espello que reflicte a luz do sol, e é modulada acusticamente. O detector, situado a uns 200 m, é unha fotorresistencia.

O Fotófono

En 1880, Alexander Graham Bell e Charles Sumner Tainter crearon o que case se pode denominar precursor das comunicacións por fibra óptica: o **fotófono**. Bell consideraba o fotófono o seu invento máis importante:

I have heard articulate speech produced by sunlight! I have heard a ray of the sun laugh and cough and sing!

(A. G. Bell, February 26, 1880 (MIMS III, F. M. (1980))

O dispositivo permitía a transmisión de son nun feixe de luz. O 3 de xuño de 1880, Bell realizou a primeira transmisión telefónica sen fíos do mundo entre dous edificios separados uns 213 metros de distancia. Porén, debido ao uso dun medio de transmisión atmosférico, o fotófono non resultaría práctico ata que o progreso nas tecnoloxías láser e da fibra óptica permitisen o transporte eficiente da luz.

- **S. XIX:** usado principalmente nas comunicacións militares, o heliógrafo ou telégrafo solar transmite sinais telegráficos tamén mediante a reflexión nun espello da luz solar.

2.2. Era eléctrica

Para poñernos en situación indicamos algunhas das datas máis destacadas nesta etapa nas comunicacións:

- **1839:** primeiro telégrafo eléctrico comercial, o cal marcou o inicio da era eléctrica. O primeiro cable submarino trasatlántico fai posible o telégrafo trasatlántico entre EUA- Francia en 1866.
- **1876:** invención do teléfono.

A historia do teléfono

Durante moito tempo Alexander Graham Bell foi considerado o inventor do teléfono, xunto con Elisha Grae. Porén, Graham Bell non foi o inventor, senón o primeiro en patentalo en 1876. O 11 de xuño de 2002 o Congreso de Estados Unidos aprobou a resolución 269, pola que se recoñecía a Antonio Meucci como inventor do teléfono, que denominou teletrófono. En 1871 Meucci só puido, por dificultades económicas, presentar unha breve descrición do seu invento, o cal se diseña e constrúe en 1954, pero non formalizar a patente ante a Oficina de Patentes dos Estados Unidos.

- **1940:** os cables coaxiais substitúen aos cables de pares trenzados, aumentando a capacidade de forma significativa.

Canles de comunicación

O par trenzado está constituído por dous cables de cobre illados e entrelazados en forma hélice para evitar as interferencias de fontes externas e a diafonía nos cables adxacentes. Os valores típicos de transmisión son 1–5 Mb/s para distancias da orde de 1–3 km. O seu custo é moi baixo en comparación con outros medios de transmisión e son moi eficientes en redes locais de distancia curta. O cable coaxial está formado por un cable condutor interno (cilíndrico) separado doutro cable condutor externo por un material illante. Aínda que máis caro que o par trenzado, pódese empregar a distancias máis longas con menos interferencias e velocidades de transmisión superiores. Emprégase habitualmente en televisión, telefonía a longa distancia, redes de área local, etc, aínda que a tendencia é a substituílos por fibra óptica.

- **1948:** sistemas de comunicación por microondas empregando ondas electromagnéticas con frecuencias no rango 1–10 GHz.

O problema dos sistemas baseados en cables coaxiais ou en microondas é que están limitados por unha capacidade de transmisión de información de 200 Mb/s cunha separación entre repetidores de poucos quilómetros. Xa nos anos 50 se viu que o mellor modo de incrementar de xeito significativo a capacidade dun sistema de comunicación sería empregar unha portadora de maior frecuencia, i.e. usar unha portadora na banda das comunicacións ópticas. Non obstante, nese momento non existía nin a fonte nin o medio de transmisión axeitados.

2.3. Era óptica

A era óptica vén marcada principalmente polo desenvolvemento dos láseres (véxase a figura 3) así como da canle de transmisión que permitiu a espectacular evolución dos sistemas de comunicación guiados por luz: a fibra óptica.

- **1958,** deséñanse sistemas guiados mediante lentes separadas 10–100 m.
- **Invenção (1958) e realización (1960)** do láser (fonte espectralmente pura, potente e coherente). En 1962, realízase o primeiro láser de semiconductor.

Polémica coa invención do láser

Gordon Gould era un estudante en Columbia do profesor Polykarp Kusch. En 1956, Gould propuxo unha novidosa técnica coñecida como bombeo óptico para estimular un máser, un dispositivo que produce un feixe coherente de microondas proposto por Gordon, Zeiger e Townes. O propio Townes, profesor en Columbia, asesorouno sobre como obter unha patente das súas ideas. En 1957 Gould tiña algúns cálculos para construír o que denominou láser (amplificador de luz por emisión estimulada), o cal deixou rexistrado no seu caderno de laboratorio. Mais antes de solicitar a patente quixo concretar algo máis como facelo, empezando a traballar nunha empresa chamada Technical Research Group (TRG), enviando a súa solicitude de patente en abril de 1959. Por outra banda, Townes tamén se dedicou a traballar na idea de obter un máser que emitise no visible, para o cal contou coa colaboración de Arthur Leonard Schawlow, con quen coincidira na Universidade de Columbia e que tamén era o seu cuñado, quen traballaba neses momentos nos Laboratorios Bell. Xuntos publicaron un artigo en agosto de 1958 titulado *Infrared and Optical Masers*. Solicitaron tamén unha patente do láser desde os Laboratorios Bell, a cal foi concedida en 1960, despois de que a solicitude de patente de Gould fora denegada alegando que a súa publicación fora feita tras a publicación do artigo de Townes e Schawlow. Isto levou a unha longa batalla legal de case 30 anos na que, finalmente, a Gould lle foi concedida a patente principal do láser.

- **Nos anos 60** deséñanse tamén os primeiros sistemas de comunicacións ópticas non guiadas.
- **Charles Kuen Kao e George Hockman (1966)**, suxiren usar fibras ópticas para comunicacións guiadas.

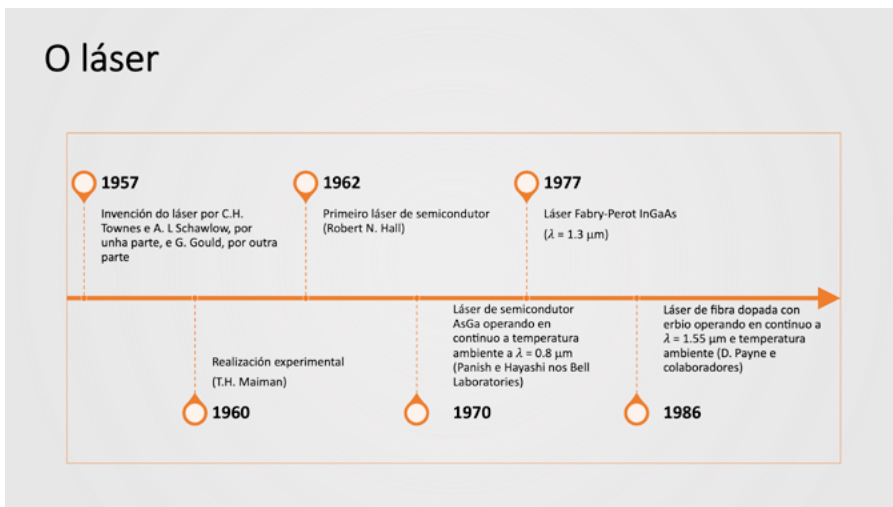
O pai das fibras ópticas

Ao principio dos anos 60 a atenuación da meirande parte dos vidros que poderían empregarse para obter fibras ópticas estaban por riba dos centenas de decibelios por quilómetro (db/km), algo totalmente ineficiente para o guiado da luz. Kao e Hockman indicaron que era posible reducir as perdas existentes nas fibras por debaixo de 20 db/km, pois están asociadas a impurezas resultantes do proceso de fabricación e que nese caso si poderían ser empregadas de forma competitiva para a transmisión da luz. Charles Kao sería recoñecido co Premio Nobel no 2009 e actualmente é habitual referirse a el como o pai das fibras ópticas.

- **1970:** as perdas nas fibras ópticas redúcense a 20 dB/km para $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ (2 dB/km en 1975).
- **1970:** demóstrase a operación continua dun láser semiconductor GaAs ($0.8 \mu\text{m}$) a temperatura ambiente.
- **1977:** desenvólvense o láser Fabry-Perot InGaAs e detectores de Ge ($1.3 \mu\text{m}$).
- **Nos principios dos 80,** dispóñense os primeiros sistemas comerciais de comunicacións ópticas guiadas.
- **Metade da década,** alcánzanse atenuacións de 0.4 dB/km para $\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$ e 0.25 dB/km para $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$ en fibras ópticas comerciais.
- **1986:** David Payne e os seus colegas da Southampton University (UK) desenvolven o primeiro láser de fibra dopada con erbio operando a unha lonxitude de onda de $1.55 \mu\text{m}$ e a temperatura ambiente.
- **1989:** primeiros amplificadores ópticos comerciais de fibra dopados con erbio (EDFA, do inglés *Erbium-Doped Fiber Amplifier*).

NOTA: perdas en dB/km: $10 \log[P(\text{inicial})/(P(1\text{km}))] / 1 \text{ km}$.

Figura 3: Algúns dos fitos máis importantes no desenvolvemento do láser para as comunicacións ópticas.



Fonte: Elaboración propia.

3. Evolución das comunicacións ópticas

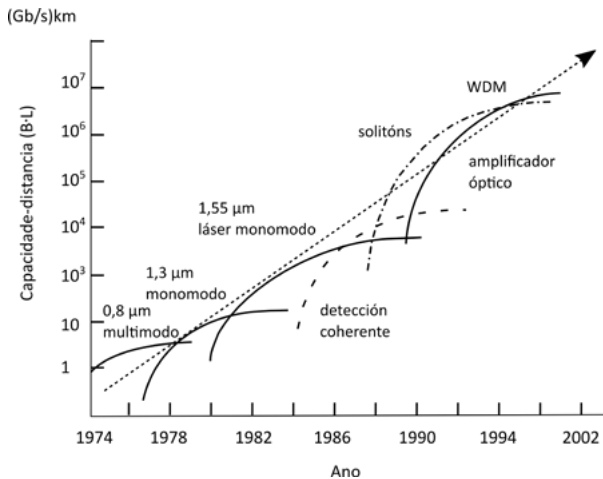
Existen varios feitos importantes que posibilitaron o comezo das comunicacións ópticas: (i) En 1954 Harold Hopkins e Narinder Singh Kapany conseguiron *dobrar a luz*, é dicir, demostraron que a fibra de vidro enrolada permitía transmitir luz. Antes

estaba moi aceptado que a luz soamente podía viaxar a través dun medio recto; (ii) Jun-ichi Nishizawa, un científico xaponés da Universidade de Tohoku, propuxo empregar as fibras en comunicacións en 1963; (iii) Nishizawa foi o inventor do diodo PIN e o transistor de indución estática, que contribuíron ao desenvolvemento das comunicacións por fibra óptica; (iv) en 1966, Charles K. Kao e George Hockham, dos Laboratorios STC (*Standard Telecommunication Laboratories, STL*), demostraron que as perdas nos vidros existentes estaban provocadas por contaminantes no material que podían eliminarse. A partir desde momento, a evolución das comunicacións ópticas acelerouse de forma vertixinosa. Os extraordinarios progresos alcanzados no desenvolvemento dos sistemas de comunicación de fibra óptica poden agruparse en diferentes xeracións (AGRAWAL, G.P. (2016)) que se comentan a continuación.

Primeiras tres xeracións

As fibras ópticas marcaron o comezo dunha revolución no eido das comunicacións. Esta revolución non tería sido posible de non ser polo espectacular desenvolvemento conxunto dos sistemas láser. A fibra óptica foi desenvolvida en 1970 por Corning Glass Works, conseguindo fibras cunha atenuación o suficientemente baixa para aplicacións de comunicacións (uns 20 dB/km). A figura 4 mostra a evolución temporal dalgunhas das etapas máis significativas nos sistemas de comunicacións ópticas atendendo ao seu rendemento. Cada xeración explota unha tecnoloxía para superar un reto durante a cal o produto capacidade-distancia (BxL) medra ata chegar a unha asíntota. Nese punto de estancamento do produto BxL explórase o desenvolvemento doutra tecnoloxía para superar o factor limitante e aumentar por tanto a capacidade de transmisión do sistema.

Figura 4: Evolución temporal do rendemento dos sistemas de comunicacións ópticas no século pasado.



Fonte: Modificada de MARTÍN PEREDA, J. M. (2004).

Así, o sistema de fibra óptica de primeira xeración desenvolveuse no 1975 empregando láseres de semiconductor de GaAs operando a unha lonxitude de onda de $0.8 \mu\text{m}$ e alcanzando unha velocidade de transmisión de 45 Mb/s cunha distancia de repetición de 10 km. As fibras ópticas empregadas nesta primeira etapa eran fibras de gradiente de índice e presentaban unha atenuación próxima aos 5 dB/km. A segunda xeración de comunicación por fibra óptica tería lugar a comezos dos anos 80, empregando láseres semicondutores InGaAsP operando a unha lonxitude de onda de $1.3 \mu\text{m}$ e fibras monomodo, as cales ofrecían unha atenuación próxima a 1 dB/km. En 1987, estes sistemas funcionaban a unha velocidade de ata 1.7 Gb/s en fibra monomodo cunha distancia de repetición de 50 km. En 1990 desenvolveuse a terceira xeración funcionando agora con fontes de lonxitudes de onda de $1.55 \mu\text{m}$, onde as perdas son mínimas nas fibras de sílice. As dificultades previas para traballar a esta lonxitude de onda por mor dos efectos de dispersión de pulso foron superadas empregando fibras de dispersión desprazada deseñadas para ter dispersión mínima a $1.55 \mu\text{m}$ ou limitando o espectro do láser a un único modo lonxitudinal. Nestes sistemas a velocidade de transmisión aumentou ata 2.5 Gb/s en fibra monomodo e separación entre repetidores de 100 km.

A mediados dos oitenta comezouse tamén unha etapa que se designa como *detección coherente*, na cal semellaba que algúns dos problemas existentes na transmisión poderían ser solucionados empregando os coñecidos como sistemas de detección coherentes utilizados nas comunicacións por radio. Os receptores coherentes son capaces de detectar tanto a amplitude como a fase dun sinal óptico mediante o que se coñece como sistema de detección heterodino e que se desenvolveron pouco despois do ano 2000. Ditos sistemas proporcionan unha maior sensibilidade de detección e tamén un aumento na eficiencia espectral (codificando máis bits nun símbolo) comparados aos sistemas de detección directa, os cales dependen soamente da potencia ou fluxo de fotóns do sinal óptico, sendo insensibles tanto á frecuencia como á fase do sinal. Mais a aparición dos amplificadores ópticos, baseados en fibras ópticas dopadas con terras raras, ía desviar a atención da aplicación de ditos sistemas.

Cuarta xeración

No 1990, a cuarta xeración de sistemas de fibra baseouse no uso de amplificadores ópticos para poder incrementar o espazado entre repetidores, en combinación coa técnica de multiplexado por división de lonxitudes de onda (WDM, do inglés *Wavelength Division Multiplexing*) para aumentar a capacidade de transmisión (AGRAWAL, G.P. (2016)). Basicamente, na técnica WDM empréganse varias fontes láser operando a lonxitudes de onda lixeiramente diferentes para transmitir de forma simultánea varios fluxos de datos por unha mesma fibra óptica. Aínda que o WDM xa se empregaba nas frecuencias de radio e microondas, para poder ser utilizada nas lonxitudes de onda ópticas foi preciso o desenvolvemento de novos dispositivos nun lapso de tempo duns poucos anos. Por exemplo, os multiplexores e demultiplexores ópticos capaces de combinar e de separar canles individuais nos dous extremos dun enlace de fibra. En 1996, a utilización da técnica WDM en combinación cos amplifica-

dores ópticos que permiten a amplificación simultánea de varias lonxitudes de onda fixo posible obter sistemas operando a unha taxa de bits de 1 Tb/s, o que implica un aumento na capacidade dos sistemas nun factor 400 nun período de unicamente 6 anos. En 2001, levouse a cabo un experimento de 11 Tb/s no cal 273 canles, cada unha delas operando a 40 Gb/s, foron transmitidos unha distancia de 117 km.

En paralelo coa terceira e cuarta etapa explorouse tamén o uso de solitóns ópticos como medio de aumentar o produto capacidade-distancia nas comunicacións ópticas. Os solitóns son, basicamente, pulsos que poden conservar a súa forma contrarrestando os efectos negativos da dispersión nas fibras. Porén, os avances foron máis lentos do esperado e aínda se segue a traballar neste campo co fin de obter solucións operativas que se poidan implementar nos sistemas comerciais.

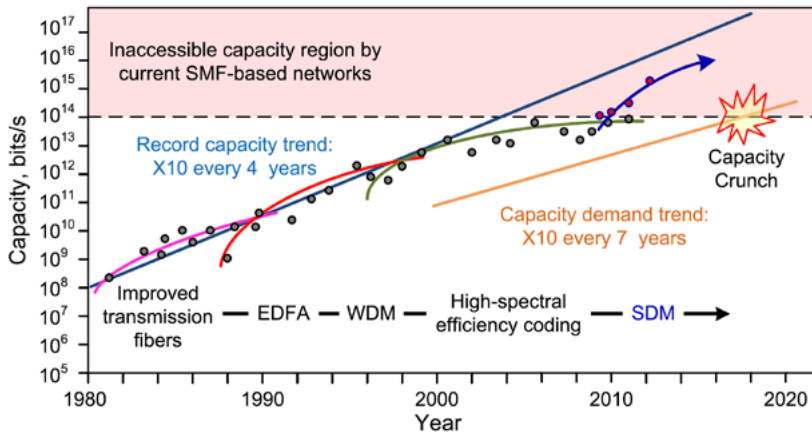
Quinta xeración

Desde o ano 2000 realizáronse avances importantes no deseño de sistemas de comunicación ópticos avanzados, derivando na quinta e sexta xeración dos mesmos. Os sistemas de comunicación por fibra óptica de quinta xeración enfocáronse en facer os sistemas WDM máis eficientes desde o punto de vista espectral. Isto conseguiuase a través da multiplexación por división de onda densa (DWDM) e recuperando o sistema de detección coherente de finais da década de 1980 (abandonado pouco despois da introdución dos amplificadores ópticos de fibra) para aumentar aínda máis a velocidade de transmisión de datos (AGRAWAL, G. P. (2016)). A súa dipoñibilidade comercial a finais da década fixo posible empregar formatos de modulación do sinal avanzados nos que a información é codificada a través tanto da amplitude como da fase dunha portadora óptica (AGRAWAL, G. P. (2005)).

Sexta xeración

A figura 5 mostra a evolución da máxima capacidade e demanda de capacidade en sistemas de comunicación por fibra óptica (CHEN, H., KOONEN, A.M.J.(2017)). Hai un par de décadas considerábase que a fibra óptica tiña unha capacidade ilimitada de transmisión da información. Non obstante, a alta demanda de capacidade por parte dunha sociedade cada vez máis dixitalizada chegou ao grao de requirir sistemas con taxas de transmisión próximas aos 10 Tb/s. Aínda que a capacidade máxima estimada dunha fibra monomodo é duns 100 Tb/s, sendo esta unha cifra enorme, o tráfico de datos por redes de fibra óptica leva experimentando un crecemento constante, duplicándose cada 18 meses, desde a chegada de Internet a principios dos ano 90.

Figura 5: Evolución temporal da capacidade e demanda nas redes de comunicacións ópticas.



Fonte: CHEN, H., KOONEN, A.M.J. (2017).

Este límite na capacidade das fibras vén imposto polas non linealidades das fibras. Shannon introduciu no 1948 o concepto de capacidade dunha canle como $B = \Delta f \log_2(1 + SNR)$, no cal o valor da *relación sinal-ruido* (SNR) establece o límite fundamental para un sistema óptico de comunicacións lineal cun ancho de banda Δf . Definindo a *eficiencia espectral* como $SE = B/\Delta f$, teríamos que podería en principio aumentarse simplemente enviando sinais cada vez máis potentes a través da fibra. Desafortunadamente isto non é posible dado que o uso dunha potencia máis elevada dá lugar a aparición de procesos non lineais nas fibras que poden provocar a degradación do sinal. Comezouse, por tanto, a prever a saturación nas capacidades dos sistemas comerciais baseados nas fibras, chamándoselle a este feito como “*Capacity Crunch*” e que se considerou que tería lugar ao redor do ano 2018 (véxase a figura 5). Actualmente estanse a buscar novas estratexias que permitan operar por encima do límite de Shannon. Un exemplo de solución directa é aumentar o número de cableado de fibra óptica dun só núcleo, mais esta proposta resulta demasiado custosa e complexa en termos de infraestrutura. A técnica destacada que se espera aumente a capacidade óptica das fibras e evite o “*Capacity Crunch*” denomínase *Multiplexado por División Espacial* ou SDM (do inglés, *Spacial Division Multiplexing*). O exemplo quizais máis sinxelo de SDM é dispoñer máis fibras paralelas xuntas formando unha brazada de fibras. Neste caso estaríamos a falar de fibras multielemento ou MEF (do inglés *multi element fiber*). Outras fibras para a implementación da SDM consisten na utilización de fibras multimodo ou FMF (do inglés *few-mode fiber*) de forma que se poidan transmitir varios fluxos de bits WDM a través de diferentes modos da mesma fibra ou fibras multinúcleo ou MCF (do inglés *multi-core fiber*), nas cales basicamente hai múltiples núcleos dentro dunha única fibra. Estas técnicas SDM,

a pesar de ser consideradas actualmente como emerxentes, non son novas xa que o concepto de empregar MCF e a copropagación de varios modos remóntase ao 1979 e 1982, respectivamente. Se non se consideraron naquel momento foi porque os requirimentos na capacidade de transmisión eran satisfeitos polas tecnoloxías existentes, as cales resultaban máis rendibles, como por exemplo as fibras monomodo con baixa atenuación, os amplificadores ópticos, o multiplexado por división de lonxitude de onda ou a modulación de amplitude en cuadratura (e ordes superiores). Igual que no caso da tecnoloxía WDM, a implementación da SDM precisa do desenvolvemento de novos tipos de fibras, así como doutros elementos ópticos activos e pasivos, como multiplexores/demultiplexores de modo e amplificadores de fibra que permitan amplificar os sinais en todos os modos/lonxitudes de onda de forma simultánea.

4. Sistemas ópticos e sistemas de radio e microondas

Na táboa 2 preséntanse as principais vantaxes e desvantaxes dos sistemas ópticos de comunicación non guiados fronte aos sistemas de radio e microondas, mentres que a táboa 3 recolle as dos sistemas ópticos guiados.

Táboa 2: Vantaxes e desvantaxes dos sistemas non guiados.

<i>Vantaxes</i>	<i>Desvantaxes</i>
Menos perdas na transmisión	Non son axeitados para sistemas de cobertura ampla (radiodifusión)
Moi boa direccionalidade	Require un direccionamento preciso do feixe
Módulos de transmisión e recepción compactos	Maior nivel de ruído
Boa seguridade	Sensible a perturbacións atmosféricas
Explota unha banda non usada do espectro electromagnético	Pode producir danos derivados da potencia dos láseres usados
Non require licenza de comunicación	A luz do sol pode enmascarar o sinal
Inmunity a interferencias electromagnéticas	A presenza de obstáculos pode producir interrupcións momentáneas da transmisión
Capacidade de transmisión de información elevada	

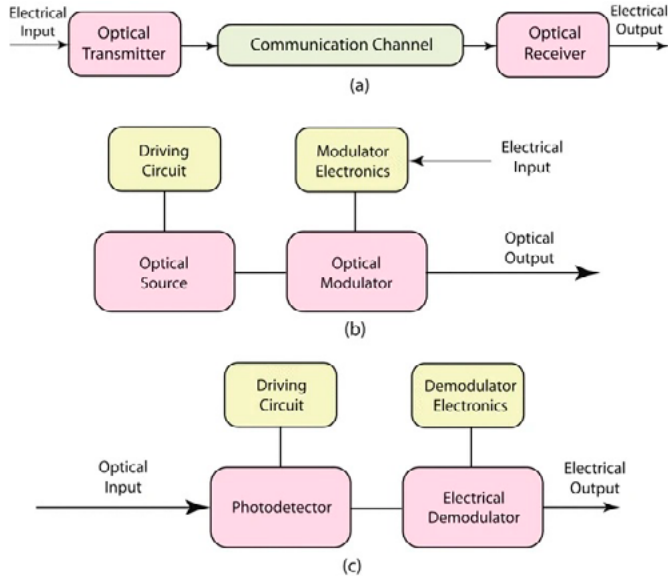
Táboa 3: Vantaxes e desvantaxes dos sistemas ópticos guiados.

<i>Vantaxes</i>	<i>Desvantaxes</i>
Pouco peso e tamaño	Dificultade de conexión de fibras
Baixo custo	Perdas por flexión de fibras
Interferencias entre canais desprezable	Posible degradación das fibras
Capacidade de transmisión de información elevada	Desenvolvemento lento de estándares
Conexións ópticas, non eléctricas	Necesidade de conversión electro-óptica
Inmunityde a interferencias electromagnéticas	Sensibilidade a radiación ionizante
Longa distancia entre rexeneradores do sinal	Sensible a ataques de animais (tiburóns nos fondos mariños, roedores, térmites...)
Capacidade e flexibilidade de crecemento	
Alta seguridade	

5. Compoñentes básicas dun sistema de comunicacións ópticas

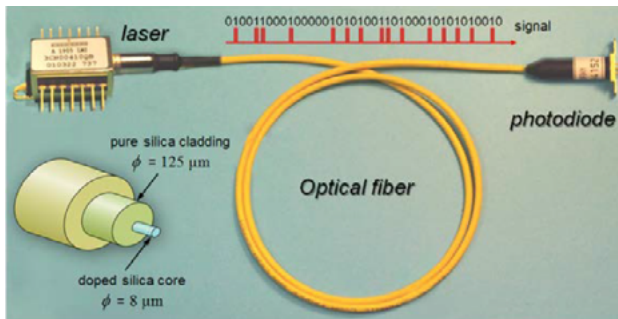
Os elementos básicos que constitúen un sistema de comunicacións poden descomporse no transmisor, a canle de comunicacións e o receptor. Estes tres compoñentes aparecen representados mediante un diagrama de bloques na figura 6 e discutíranse máis en detalle a continuación. Na figura 7 pode verse unha imaxe dun enlace óptico.

Figura 6: (a) Diagrama de bloques xenérico dun sistema de comunicacións ópticas. (b) Compoñentes dun transmisor óptico. (c) Compoñentes dun receptor óptico



Fonte: AGRAWAL, G.P. (2016).

Figura 7: Enlace óptico onde aparecen, de esquerda a dereita, un láser de semiconductor, unha fibra óptica e un receptor. A información a transmitir codifícase mediante unha secuencia de pulsos, onde cada un destes pulsos corresponde a un valor de bit de 1. A ausencia de luz corresponde ao valor de bit 0. Abaixo á esquerda móstrase unha representación da sección transversal dunha fibra monomodo.



Fonte: BRETEAKER, F., & TREPS, N. LASER: 50 YEARS OF DISCOVERIES. WORLD SCIENTIFIC. (2014).

5.1. Transmisores ópticos

A función dun transmisor óptico é transmutar o sinal eléctrico nun sinal óptico e dirixilo ata a canle de comunicación. Está composto esencialmente por unha fonte

óptica e un modulador, así como os circuitos electrónicos asociados necesarios. A continuación describíranse estes compoñentes cun pouco máis de detalle.

FONTES ÓPTICAS

Os sistemas de comunicacións ópticas actuais teñen como elemento esencial unha fonte de radiación luminosa que ben pode ser un **láser** (do inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ou luz amplificada por emisión estimulada de radiación) ou un **LED** (do inglés *Light Emitting Diode* ou diodos emisores de luz). Aínda que se podería dicir que o uso do láser é prioritario en comunicacións ópticas, deixando ao LED nun segundo plano, ambos son utilizados tanto en comunicacións non guiadas coma guiadas, dependendo a elección dunha fonte ou outra da aplicación. No caso das comunicacións non guiadas, son habituais os diodos emisores de luz e láseres de semiconductor (diodos láser), para pequenas distancias ($L < 10$ km) e, para distancias maiores, fontes máis potentes como láseres de Neodimio ($1.06 \mu\text{m}$ ou dobrado en frecuencia a $0.53 \mu\text{m}$), láseres de CO_2 ($10.6 \mu\text{m}$) ou matrices de láser de semiconductor (sobre 800 nm). Para comunicacións guiadas, as fontes máis empregadas son os LED e os diodos láser, dada a súa compactidade e compatibilidade coas fibras ópticas.

Un LED e un láser de semiconductor son practicamente análogos na súa composición; porén, son radicalmente distintos en canto a mecanismo físico (microscópico) de operación se refire, xa que a radiación emitida dos LED débese a emisións espontáneas mentres que no caso dos diodos láser a emisión é estimulada, fomentada pola presenza dunha cavidade óptica (ou sistema de retroalimentación).

Os diodos láser presentan unha serie de vantaxes sobre os LEDs, a saber:

- Admiten maiores velocidades de modulación (>1 Gb/s)
- Permiten un mellor acoplamento da radiación a fibra óptica (tipicamente >1 mW)
- A súa anchura de banda é menor (o que implica menor dispersión na fibra)
- Ademais da modulación en amplitude, admiten outro tipo de modulacións

Non obstante son máis sensibles ao valor da corrente inxectada, así como a temperatura. Ademais o seu custo é superior. Outro parámetro importante do transmisor, e asociado á fonte, é a potencia enviada á canle de comunicación¹. En principio, debería de ser o maior posible para aumentar a relación sinal-ruído (SNR) no detector. Porén, nun sistema guiado a potencia está limitada para evitar efectos ópticos non lineais na fibra. No caso de LEDs, a potencia é menor que 0.1 mW, pero no caso dos diodos láser pode chegar a ser uns poucos mW.

¹É usual referir a potencia a un nivel de referencia de 1 mW:

$$\text{Potencia (dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Potencia}}{1 \text{ mW}} \right)$$

MODULADORES

Antes de que a portadora óptica sexa levada ata a canle de comunicación, débese imprimir nela a información que se desexa transmitir. O modulador transforma o sinal eléctrico entrante á frecuencia aceptada pola fonte luminosa, a cal transforma o sinal eléctrico nun sinal óptico ou, dito doutro modo, o modulador usa os datos impresos nun sinal eléctrico para modular a portadora óptica.

Pódese distinguir entre varios tipos de modulación:

- **Directa ou interna:** O sinal eléctrico é aplicado directamente na circuitaría que permite a operación da fonte óptica, de xeito que esta emite un sinal modulado. Este é un sistema máis barato pero soamente permisible para frecuencias de modulación baixas.
- **Externa:** a fonte emite unha portadora continua que é modulada posteriormente.

5.2. Canle de comunicación óptica

A función da canle de comunicación é transportar o sinal óptico dende o transmisor ata o receptor, coas menores distorsións posibles (CABRERA, M., TARRÉS RUIZ, F. (2013)). Unha primeira clasificación dos sistemas ópticos pode facerse atendendo á natureza da canle de comunicación según se trate de comunicacións non guiadas ou guiadas, como xa vimos ao comezo desta unidade didáctica. En xeral, os medios guiados ofrecen unha maior protección do sinal, mais teñen como principal inconveniente a necesidade de instalar infraestruturas para cubrir a diferentes usuarios que non poden ser empregados cando o receptor/emisor son móbiles e que, unha vez instaladas, resultan moi caras de modificar. A **fibra óptica** é o medio físico que soporta unha maior capacidade de transmisión de datos, o que fai que, xunto coa súa protección a ruídos e interferencias e peso e tamaño reducidos, sexa o medio máis empregado actualmente. O material por excelencia para a fabricación das fibras ópticas é a sílice, moi abundante na natureza, aínda que tamén poden empregarse materiais plásticos. As fibras teñen forma cilíndrica con tres seccións radiais básicas: núcleo, cuberta e recubrimiento. O valor do índice de refracción do núcleo, a parte central da fibra, é superior ao da cuberta, o que provoca o confinamento ou guiado da luz. O recubrimiento é unha parte protectora empregada para evitar o deterioro da fibra, cuxo papel é principalmente illar ao conxunto do núcleo e da cuberta de golpes, esmagamentos, abrasións, humidades, etc.

A canle de comunicación empregada é, por tanto, un factor determinante na calidade da transmisión e recepción dos sinais. No caso das comunicacións ópticas, tense que as causas máis destacadas de distorsión no sinal son as seguintes:

- **Comunicacións non guiadas:** atenuación e turbulencias na atmosfera. Non existen no baleiro.
- **Comunicacións guiadas:** principalmente, atenuación e dispersión na fibra no caso de sistemas ópticos. Tamén pode deberse á aparición de efectos non li-

neais, e de polarización.

Nos sistemas de comunicación guiados por fibra de longas distancias é habitual utilizar sistemas rexeneradores de sinal para compensar as degradacións sufridas polo sinal ao longo da súa propagación. Distínguense entre os rexeneradores ou repetidores eléctricos e os amplificadores ópticos:

- **Repetidor:** é unha combinación intermedia de transmisor e detector. Basicamente, o repetidor detecta o sinal óptico e convérteo nun sinal eléctrico que é logo reconvertido nun sinal óptico amplificado. No caso da comunicación dixital, o sinal reconstruído pode reproducir o sinal orixinal sen distorsións.
- **Amplificador óptico:** simplemente aumenta o nivel (a potencia) do sinal.

Así, mentres que o amplificador amplifica o sinal xunto co ruído, no repetidor o ruído é eliminado rexenerando o sinal. Xustamente, un parámetro característico dos sistemas de comunicación é a distancia mínima entre repetidores/amplificadores para que o sinal poida chegar a ser reconstruído con fidelidade no receptor.

5.3. Receptores ópticos

A última das compoñentes principais dun sistema de comunicacións ópticas que imos tratar é o receptor óptico. A súa función básica consiste en reconverter o sinal óptico no sinal eléctrico orixinal.

Os receptores están formados por un detector e un demodulador, xunto coa circuitaría electrónica asociada. Os fotodetectores, ao igual que ocorre coas fontes empregadas en comunicacións guiadas, fábrícanse con materiais semicondutores, podendo distinguir entre fotodiodos pin e fotodiodos de avalancha. Nas comunicacións non guiadas tamén se utilizan un tipo de fotodetectores chamados fotomultiplicadores. Nun fotodetector, basicamente prodúcense procesos de absorción nos que se aniquilan fotóns e se crean pares de electróns-ocos que dan lugar a unha corrente de electróns. A función do demodulador é reconstruír o sinal eléctrico orixinal a partir de esa corrente eléctrica e a pesar da degradación do sinal óptico e do ruído engadido no proceso de detección.

A precisión coa que se produce a demodulación depende da relación sinal-ruído no detector:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (5.1)$$

onde P_s é a potencia do sinal e P_n a potencia do ruído que afecta ao sinal.

Nos sistemas analóxicos a SNR define o rendemento do receptor, mentres que nos sistemas dixitais o rendemento caracterízase pola capacidade do detector en identificar se un bit é 0 ou 1. Usualmente defínese a **probabilidade de erro** ou **erro relativo de bit (BER)** como a probabilidade media de identificar incorrectamente un bit, ou ben, como o número medio de erros por número de bits recibidos. Por exemplo, un BER de 10^{-9} significa que en media se produce un erro cada mil millóns

de bits que se reciben. Tamén se define a **sensibilidade do detector** como a mínima potencia media requirida para chegar a un valor do BER prefixado. A sensibilidade depende da SNR que á súa vez depende das fontes de ruído existentes no sistema. Por outra banda, a **fidelidade** no proceso de detección depende da linealidade do detector coa potencia óptica así como da súa anchura de banda.

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

O proceso de avaliación da aprendizaxe para a presente unidade didáctica rexerase polos criterios xerais cos que se realizará o seguemento da materia no seu conxunto. Empregarase de forma preferente un sistema de avaliación continua baseado en:

- Asistencia e participación de forma activa tanto nas clases expositivas coma nas clases interactivas de seminario.
- Resolución de exercicios prácticos na aula.
- Traballos realizados en horario non presencial.

Excepcionalmente, poderase realizar un exame final da materia con cuestións e problemas relacionados cos contidos impartidos. Na figura 8 pódense ver as compoñentes, criterios e instrumentos de avaliación que se aplicarán nesta unidade didáctica.

Figura 8: Compoñentes, criterios e instrumentos de avaliación.

	ASPECTO	INSTRUMENTO	CRITERIOS
PARTE I EVALUACIÓN CONTINUA	Asistencia e participación activa na aula	<ul style="list-style-type: none"> • Observación e notas do profesor • Listas de control • Diarios de clases 	<ul style="list-style-type: none"> • Participación activa • Resolución de problemas
	Realización de informes e traballos	<ul style="list-style-type: none"> • Producións escritas con carpeta de actividades diversas • Textos escritos • Desenvolvemento de aplicacións interactivas 	<ul style="list-style-type: none"> • En cada traballo analizarase: <ul style="list-style-type: none"> - Estrutura do traballo - Orixinalidade - Calidade da documentación - Ortografía e presentación
	Presentacións orais	Presentacións orais de traballos de diversa índole, ou probas orais específicas	<ul style="list-style-type: none"> • Pertinencia da actuación ao contido da materia • Calidade da actividade presentada
PARTE II PROBA ESCRITA INDIVIDUAL	Conceptos fundamentais da materia	Exame final	<ul style="list-style-type: none"> • Dominio dos coñecementos teóricos e prácticos da materia • Calidade da redacción • Evidencia de asimilación vs. reprodución literal

Fonte: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- AGRAWAL, G. P. (2005). Lightwave Technology. Telecommunications systems. Cap. 1. John Wiley & Sons, 2005. ISBN: 978-0-471-21572-1.
- GOWAR, J. (1993). Optical Communication Systems. Cap. 1. Hemstead, UK: Prentice-Hall. ISBN: 0-13-638727-6.
- MARTÍN PEREDA, J. M. (2004). Sistemas y redes ópticas de comunicaciones. Pearson Educación. ISBN: 8420540080, 9788420540085.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- AGRAWAL, G. P. (2016). Optical communication: its history and recent progress. In Optics in our time (pp. 177-199). Springer, Cham.
- CAPMANY, J., FRAILE-PÉREZ, F. J. E MARTÍ, J. (2004). Fundamentos de Comunicaciones Ópticas. Cap. 1. Pearson Educación. ISBN: 8420540080, 9788420540085.
- MIMS III, F. M. (1980) Alexander Graham Bell and the Photophone: The Centennial of the Invention of Light-Wave Communications, 1880-1980 OPTICS NEWS/Vol. 6.
- CHEN, H., KOONEN, A.M.J.(2017). Spatial Division Multiplexing. In: Venghaus, H., Grote, N. (eds) Fibre Optic Communication. Springer Series in Optical Sciences, vol 161. Springer, Cham.
- CABRERA, M., TARRÉS RUIZ, F.(2013). Introducción a los sistemas de comunicaciones. FUOC. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya.

OUTRAS FONTES E RECURSOS DE CONSULTA

- [Charles K.Kao, febreiro de 1966](#)
[History of optical fibers](#)
[El láser, la luz de nuestro tiempo](#)



Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade

unidadesdidácticas
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA