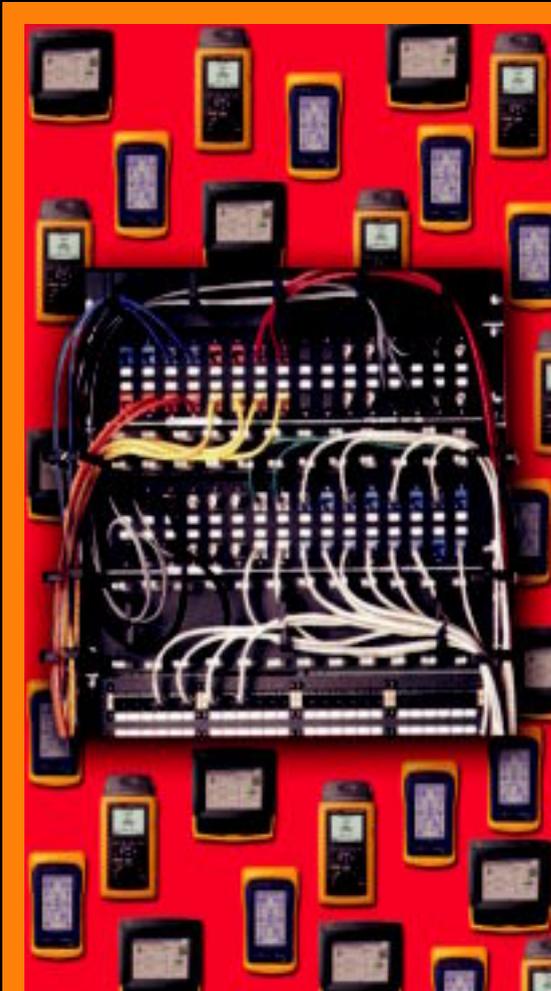


Educación técnico-profesional

Cálculo de enlaces alámbricos



Serie:
Desarrollo de contenidos

Telecomunicaciones

Serie: Desarrollo de contenidos

Colección: Telecomunicaciones

Cálculo de enlaces alámbricos

Rubén Jorge Fusario

Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.

a u t o r i d a d e s

PRESIDENTE DE LA NACIÓN

Dr. Néstor Kirchner

MINISTRO DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Lic. Daniel Filmus

DIRECTORA EJECUTIVA DEL INSTITUTO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. María Rosa Almandoz

DIRECTOR NACIONAL DEL CENTRO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum



2. Cálculo de enlaces alámbricos



Serie:
Desarrollo de
contenidos

Serie: "Desarrollo de contenidos"
Colección: "Telecomunicaciones"

Distribución de carácter gratuito.

Queda hecho el depósito que previene la ley n° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

La reproducción total o parcial, en forma idéntica o modificada por cualquier medio mecánico o electrónico incluyendo fotocopia, grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información no autorizada en forma expresa por el editor, viola derechos reservados.

Industria Argentina.

ISBN 950-00-0546-8

Dirección del Programa:
Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinación general:
Haydeé Noceti

Diseño didáctico:
Ana Rúa

Administración:
Adriana Perrone

Diseño gráfico:
Tomás Ahumada
Diego Herrero
Fabiana Rutman

Diseño de tapa:
Tomás Ahumada

Con la colaboración
del equipo de profesionales
del Centro Nacional
de Educación Tecnológica

Rubén Jorge Fusario
Cálculo de enlaces alámbricos, coordinado por Juan Manuel Kirschenbaum.

- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2006.

54 p.; 22x17 cm. (Desarrollo de contenidos; 3)0

ISBN 950-00-0546-8

I. Telecomunicaciones.

I. Kirschenbaum, Juan Manuel, coord. II. Título

CDD 622.349 26

Fecha de catalogación: 03-01-2006

Impreso en MDC MACHINE S. A., Marcelo T. de Alvear 4346
(B1702CFZ), Ciudadela, en setiembre 2006

Tirada de esta edición: 4.000 ejemplares

Serie: “**Desarrollo de contenidos**”

- Construcciones
- Diseño industrial y gráfico
- Electricidad, electrónica y sistemas de control
- Empresa simulada
- Fluidica y controladores lógicos programables (PLC)
- Gestión de la calidad
- Gestión de las organizaciones
- Invernadero computarizado
- Proyecto tecnológico
- Tecnología de las comunicaciones
 1. Técnicas de transmisión banda base aplicadas a redes LAN y WAN
 2. Cálculo de enlaces alámbricos
- Tecnología de los materiales
- Tecnología en herramientas de corte
- Tecnología química en industrias de procesos
- Unidades de Cultura Tecnológica

Índice



Las metas, los programas y las líneas de acción del Instituto Nacional de Educación Tecnológica _____ 8

Las acciones del Centro Nacional de Educación Tecnológica _____ 9

1 Características principales de la fibra óptica y del enlace optoelectrónico _____ 10

- ¿Qué es una fibra óptica?
- ¿Qué es un enlace optoelectrónico?
- Fibras empleadas en redes WAN-*Wide Area Network*-

2 Cálculos de enlace _____ 38

- Unidades de medidas de potencia
- Datos del enlace optoelectrónico

3 Tasa de información de una fuente de datos _____ 43

- Unidades de medida de la información

- Entropía de una fuente de información
- Tasa de información de una fuente

4 Medidas de la compresión de datos _____ 47

5 Capacidad de un canal con ruido _____ 48

- Características de un canal de información
- Capacidad de un canal de información
- Velocidad de transmisión de datos máxima

6 Relación entre la tasa de información y la capacidad de un canal real con ruido _____ 53



Rubén Jorge Fusario

Ingeniero en Electrónica (Universidad Tecnológica Nacional. UTN), con posgrado en Ingeniería de Sistemas (Universidad de Buenos Aires. UBA), ha desarrollado su carrera docente en la Facultad Regional Buenos Aires (UTN) alcanzando, por concurso público, el cargo de profesor titular ordinario en la asignatura “Redes de información”. En la Universidad de Buenos Aires ha alcanzado el cargo de profesor asociado en “Tecnología de comunicaciones”. Es profesor titular por concurso en la Universidad de Morón, en la asignatura “Teleinformática” y profesor titular en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires, en la asignatura “Redes de información”. En el área de posgrado, se desempeña como profesor titular en la asignatura “Redes I” de la Maestría en *Teleinformática y Redes de Computadoras* de la Universidad de Morón. Es Director del Departamento de *Ingeniería en Sistemas de Información* de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires.

Este libro
fue desarrollado
por:

LAS METAS, LOS PROGRAMAS Y LAS LÍNEAS DE ACCIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

El Instituto Nacional de Educación Tecnológica -INET- enmarca sus líneas de acción, programas y proyectos, en las metas de:

- Coordinar y promover programas nacionales y federales orientados a fortalecer la educación técnico-profesional, articulados con los distintos niveles y ciclos del sistema educativo nacional.
- Implementar estrategias y acciones de cooperación entre distintas entidades, instituciones y organismos –gubernamentales y no gubernamentales-, que permitan el consenso en torno a las políticas, los lineamientos y el desarrollo de las ofertas educativas, cuyos resultados sean considerados en el Consejo Nacional de Educación, Trabajo y Producción –CoNETyP– y en el Consejo Federal de Cultura y Educación.
- Desarrollar estrategias y acciones destinadas a vincular y a articular las áreas de educación técnico-profesional con los sectores del trabajo y la producción, a escala local, regional e interregional.
- Diseñar y ejecutar un plan de asistencia técnica a las jurisdicciones en los aspectos institucionales, pedagógicos, organizativos y de gestión, relativos a la educación técnico-profesional, en el marco de los acuerdos y resoluciones establecidos por el Consejo Federal de Cultura y Educación.
- Diseñar y desarrollar un plan anual de capacitación, con modalidades presenciales, semipresenciales y a distancia, con sede en el Centro Nacional de Educación Tecnológica, y con nodos en los Centros Regionales de Educación Tecnológica y las Unidades de Cultura Tecnológica.
- Coordinar y promover programas de asistencia económica e incentivos fiscales destinados a la actualización y el desarrollo de la educación técnico-profesional; en particular, ejecutar las acciones relativas a la adjudicación y el control de la asignación del Crédito Fiscal –Ley N° 22.317–.
- Desarrollar mecanismos de cooperación internacional y acciones relativas a diferentes procesos de integración educativa; en particular, los relacionados con los países del MERCOSUR, en lo referente a la educación técnico-profesional.

Estas metas se despliegan en distintos programas y líneas de acción de responsabilidad de nuestra institución, para el período 2003-2007:

Programa 1. Formación técnica, media y superior no universitaria:

- 1.1. Homologación y validez nacional de títulos.
- 1.2. Registro nacional de instituciones de formación técnica.
- 1.3. Espacios de concertación.
- 1.4. Perfiles profesionales y ofertas formativas.
- 1.5. Fortalecimiento de la gestión institucional; equipamiento de talleres y laboratorios.
- 1.6. Prácticas productivas profesionalizantes: Aprender emprendiendo.

Programa 2. Crédito fiscal:

- 2.1. Difusión y asistencia técnica.
- 2.2. Aplicación del régimen.
- 2.3. Evaluación y auditoría.

Programa 3. Formación profesional para el desarrollo local:

- 3.1. Articulación con las provincias.
- 3.2. Diseño curricular e institucional.
- 3.3. Información, evaluación y certificación.

Programa 4. Educación para el trabajo y la integración social.

Programa 5. Mejoramiento de la enseñanza y del aprendizaje de la Tecnología y de la Ciencia:

- 5.1. Formación continua.
- 5.2. Desarrollo de recursos didácticos.

Programa 6. Desarrollo de sistemas de información y comunicaciones:

- 6.1. Desarrollo de sistemas y redes.
- 6.2. Interactividad de centros.

Programa 7. Secretaría ejecutiva del Consejo Nacional de Educación Trabajo y Producción –CoNETyP–.

Programa 8. Cooperación internacional.

Los libros que, en esta ocasión, estamos acercando a la comunidad educativa, se enmarcan en el Programa 5 del INET; han sido elaborados por especialistas del Centro Nacional de Educación Tecnológica del INET y por especialistas convocados a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo –PNUD– desde su línea “Conocimientos científico-tecnológicos para el desarrollo de equipos e instrumentos”, a quienes esta Dirección expresa su profundo reconocimiento por la tarea encarada.

María Rosa Almandoz

Directora Ejecutiva

del Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología

LAS ACCIONES DEL CENTRO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Desde el Centro Nacional de Educación Tecnológica –CeNET– encaramos el diseño, el desarrollo y la implementación de proyectos innovadores para la enseñanza y el aprendizaje en educación técnico-profesional.

El CeNET, así:

- Es un ámbito de desarrollo y evaluación de metodología didáctica, y de actualización de contenidos de la tecnología y de sus sustentos científicos.
- Capacita en el uso de tecnología a docentes, profesionales, técnicos, estudiantes y otras personas de la comunidad.
- Brinda asistencia técnica a autoridades educativas jurisdiccionales y a educadores.
- Articula recursos asociativos, integrando a los actores sociales involucrados con la Educación Tecnológica.

Desde el CeNET venimos trabajando en distintas líneas de acción que convergen en el objetivo de reunir a profesores, a especialistas en Educación Tecnológica y a representantes de la industria y de la empresa, en acciones compartidas que permitan que la educación técnico-profesional se desarrolle en la escuela de un modo sistemático, enriquecedor, profundo... auténticamente formativo, tanto para los alumnos como para los docentes.

Una de nuestras líneas de acción es la de diseñar y llevar adelante un sistema de capacitación continua para profesores de educación técnico-profesional, implementando trayectos de actualización. En el CeNET contamos con quince unidades de gestión de aprendizaje en las que se desarrollan cursos, talleres, pasantías, conferencias, encuentros, destinados a cada educador que desee integrarse en ellos presencialmente o a distancia.

Otra de nuestras líneas de trabajo asume la responsabilidad de generar y participar en redes que vinculan al Centro con organismos e instituciones educativas ocupados en la educación técnico-profesional, y con organismos, instituciones y empresas dedicados a la tecnología en general. Entre estas redes, se encuentra la Red Huitral, que conecta al CeNET con los Centros Regionales de Educación Tecnológica -CeRET- y con las Unidades de Cultura Tecnológica -UCT- instalados en todo el país.

También nos ocupa la tarea de producir materiales de capacitación docente. Desde CeNET hemos desarrolla-

do distintas series de publicaciones –todas ellas disponibles en el espacio web www.inet.edu.ar–:

- *Educación Tecnológica*, que abarca materiales que posibilitan una definición curricular del área de la Tecnología en el ámbito escolar y que incluye marcos teóricos generales, de referencia, acerca del área en su conjunto y de sus contenidos, enfoques, procedimientos y estrategias didácticas más generales.
- *Desarrollo de contenidos*, nuestra segunda serie de publicaciones, que nuclea fascículos de capacitación en los que se profundiza en los campos de problemas y de contenidos de las distintas áreas del conocimiento tecnológico, y que recopila, también, experiencias de capacitación docente desarrolladas en cada una de estas áreas.
- *Educación con tecnologías*, que propicia el uso de tecnologías de la información y de la comunicación como recursos didácticos, en las clases de todas las áreas y espacios curriculares.
- *Educadores en Tecnología*, serie de publicaciones que focaliza el análisis y las propuestas en uno de los constituyentes del proceso didáctico: el profesional que enseña Tecnología, ahondando en los rasgos de su formación, de sus prácticas, de sus procesos de capacitación, de su vinculación con los lineamientos curriculares y con las políticas educativas, de interactividad con sus alumnos, y con sus propios saberes y modos de hacer.
- *Documentos de la escuela técnica*, que difunde los marcos normativos y curriculares que desde el CONET –Consejo Nacional de Educación Técnica- delinearón la educación técnica de nuestro país, entre 1959 y 1995.
- *Ciencias para la Educación Tecnológica*, que presenta contenidos científicos asociados con los distintos campos de la tecnología, los que aportan marcos conceptuales que permiten explicar y fundamentar los problemas de nuestra área.
- *Recursos didácticos*, que presenta contenidos tecnológicos y científicos, estrategias –curriculares, didácticas y referidas a procedimientos de construcción– que permiten al profesor de la educación técnico-profesional desarrollar, con sus alumnos, un equipamiento específico para integrar en sus clases.

Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional
del Centro Nacional de Educación Tecnológica.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica

1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA FIBRA ÓPTICA Y DEL ENLACE OPTOELECTRÓNICO

Cálculo de un enlace de comunicaciones para la transmisión de imágenes de TV

El profesor de "Tecnología de las comunicaciones" plantea el siguiente problema a sus alumnos:

Supongamos que tenemos que transmitir las imágenes generadas por una cámara que emplea cuadros de 600 líneas verticales por 800 horizontales, donde cada píxel tiene 32 niveles posibles de grises, y se transmiten 25 cuadros por segundo. Para hacerlo, se emplea una compresión cuyo índice es igual a 4.

Como ya disponemos del transmisor y del receptor –que hemos adquirido en la escuela– vamos a transmitir esas imágenes por un enlace de fibra óptica –FO– cuya relación S/N^1 es de 40 db.

Mi propuesta es que desarrollen el proyecto del enlace de comunicaciones, determinando los componentes que se detallan a continuación para, finalmente, calcular el alcance máximo que puede tener el enlace de fibra óptica y la cantidad máxima de transmisiones de TV que se pueden enviar por ella.

Para hacerlo, deben tomar decisiones respecto de:

1. Topología del enlace y determinación de los elementos necesarios para su implementación.
2. Cálculo del enlace: determinación de su alcance máximo, suponiendo una fibra óptica multimodo 62,5/125 micrómetros, con una atenuación de 0,2 db/km. La fibra óptica se suministra en bobinas de 2 km de longitud.
3. Determinación de la tasa de transmisión de la fuente de información (transmisión de TV).
4. Tasa de transmisión resultante, luego de la compresión de datos.
5. Cálculo de la capacidad máxima del enlace, en función del ancho de banda y de la relación señal a ruido. Comparación con la tasa de transmisión.
6. Determinación de la cantidad máxima de transmisiones de TV que se pueden enviar simultáneamente por el enlace calculado.

Para que los alumnos puedan avanzar en la resolución del problema, es necesario que vayan integrando contenidos y procedimientos referidos a:

- Características principales de la fibra óptica y del enlace optoelectrónico.
- Unidades de medida de potencia (db y dbm) y cálculo de enlaces.
- Tasa de información de una fuente de datos.

- Medidas de la compresión de datos.
- Capacidad de un canal con ruido (teorema de Shannon-Hartley).
- Relación entre la tasa de información y la capacidad de un canal real con ruido.

Por nuestra parte, son éstos los contenidos que vamos a ir presentándole en las próximas páginas y se corresponden con las seis partes de este material de capacitación.

¹ El cociente S/N es un factor importante en todo sistema de comunicaciones porque cuantifica la medida en que la señal útil supera al ruido.

¿Qué es una fibra óptica?

Una fibra óptica es un hilo fino de vidrio (compuesto de cristales de silicio) que se emplea para transmitir luz. La fibra tiene un núcleo y un recubrimiento. El núcleo tiene un índice de refracción mucho mayor que el recubrimiento y eso –como veremos más adelante– permite transmitir la luz por el interior de la fibra sin que ésta se “escape” del núcleo. Cuando la luz entra por uno de los extremos de la fibra, se transmite con muy pocas pérdidas –incluso, aunque la fibra esté curvada–.

Las fibras ópticas pueden emplearse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes cerrados (tales como sistemas, aviones, automóviles, computadoras, etc.) como en grandes redes geográficas.

Son muy empleadas para enlaces interurbanos en las empresas telefónicas y, en general, por los *carriers* de redes que brindan servicios de transmisión de voz y video.

Para abordar el estudio de la fibra óptica, comencemos analizando cómo fueron sus orígenes y cómo evolucionó esta tecnología.

Los primeros cables submarinos que sirvieron para la comunicación entre continentes fueron los cables telegráficos, instalados en los tiempos de la Guerra de Secesión en EEUU. A estos cables –que estaban constituidos por multipares de cobre– les sucedieron los cables coáxiles.

En 1955, se tendió el primer cable coáxil que unió los dos lados del Atlántico; tenía una capacidad de 48 líneas telefónicas.

La idea de fabricar fibras de vidrio de silicio suficientemente puro para transportar la luz a grandes distancias se

Con el advenimiento del uso de la fibra óptica, un solo par de fibras permite transmitir, simultáneamente, alrededor de 500.000 comunicaciones telefónicas de un continente a otro; es decir a una distancia de, aproximadamente, 10.000 km.

fue desarrollando tecnológicamente desde finales de los años ‘60.

El fundamento de esta tecnología se basa en el principio de que la luz enviada por el interior de la fibra se refleja en la interfase que separa el núcleo

Los cables de fibra óptica suponen una alternativa a los voluminosos cables de cobre para las telecomunicaciones. Se puede apreciar cómo por el ojo de esta aguja pasan, fácilmente, varias fibras ópticas.



Detalle de un haz de fibras ópticas

del recubrimiento, lo que tiene como consecuencia guiar el haz luminoso a lo largo de la fibra –incluso, como decíamos– cuando ésta está curvada; sin embargo, no es hasta mediados de los años setenta que se publican los resultados del trabajo teórico.

De esta forma, se pudo transmitir un haz luminoso en una fibra transparente flexible y proveer, así, un sistema de transmisión que reemplazó a la comunicación efectuada hasta entonces por alambres de cobre y señales eléctricas, exclusivamente.

El problema técnico que se tuvo que resolver para el avance de la fibra óptica en los sistemas de comunicaciones se originó en el hecho que las fibras mismas absorbían la luz que debían transmitir.

La solución a este problema requirió tiempo; fueron necesarias sucesivas innovaciones tecnológicas relativas tanto al soporte material —las fibras ópticas— como a la manera de enviar y de hacer circular la información por ellas. También se tuvieron que desarrollar dispositivos emisores de luz específicos denominados **láser** y dispositivos de recepción **fotodiodos**, así como sistemas de acoplamiento, conectores y empalmes para las fibras ópticas y para estos dispositivos.

Es por ello que, durante mucho tiempo, para las comunicaciones a larga distancia se emplearon los enlaces de radio por satélite, que no cedieron el paso a los cables ópticos hasta el final de los años '80.

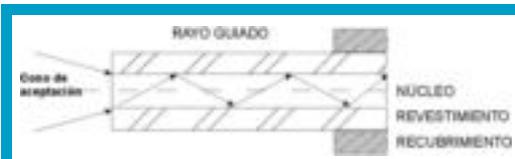
Pero, en la actualidad, la mayor parte de las comunicaciones intercontinentales se realiza a través de cables ópticos submarinos que,

depositados en el fondo de los océanos, conforman una verdadera red alrededor del planeta. De este modo, las fibras ópticas han sustituido completamente a los cables coáxiales y, también, están reemplazando a los enlaces satelitales.

Actualmente, se puede observar que, en las comunicaciones telefónicas internacionales, ha desaparecido –en la mayoría de los casos– la demora de aproximadamente 0,5 segundos producto del tiempo que debe invertir la señal electromagnética en recorrer el trayecto de 72.000 km de ida al satélite y de vuelta a la Tierra.

El profesor explica cuál es el principio físico en el que se basa la fibra óptica para transmitir información.

Una fibra óptica consiste en un filamento transparente llamado núcleo, cuyo diámetro tiene entre 8 y 600 micras –dependiendo del tipo de fibra óptica–, y de un revestimiento exterior, ambos de silicio, más una cubierta protectora de material plástico. La luz incidente en un extremo de la fibra se propaga por su interior, sufre múltiples reflexiones y sale por el otro extremo.



Transmisión de un haz de luz en el interior de una fibra óptica

El principio en que se basa la transmisión de luz por la fibra es la reflexión interna total; la luz que viaja por el centro o núcleo de la fi-

bra incide sobre la superficie que separa el núcleo del revestimiento con un ángulo tal que entra en el denominado **cono de aceptación**, de forma que todo rayo de luz se refleja sin pérdidas hacia el interior de la fibra. Así, la luz puede transmitirse a larga distancia, reflejándose miles de veces.

La transmisión de información a través de fibra óptica se basa en la posibilidad de transmitir luz a través de un medio que la conduce –como, por ejemplo, vidrio u otros materiales transparentes–.

Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata, en realidad, de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio –con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de los micrómetros, en lugar de los metros o centímetros–.

A las ondas luminosas se las referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia, mediante la expresión:

$$\lambda = c / f$$

Donde:

- λ = Longitud de onda.
- c = Velocidad de la luz.
- f = Frecuencia.

La luz se transmite a 300.000 km/s en el vacío; sin embargo, cuando se propaga por cualquier otro medio, la velocidad es menor. Cuando la luz pasa de propagarse por un medio a otro, su velocidad cambia y sufre, además, efectos de reflexión y de refracción (la luz, además de cambiar su velocidad, varía la dirección de propagación).

Dependiendo de la velocidad con que se propaga la luz en un medio o material, se le asigna un índice de refracción "n", un número deducido al dividir la velocidad de la luz en el vacío respecto de la velocidad de la luz en dicho medio:

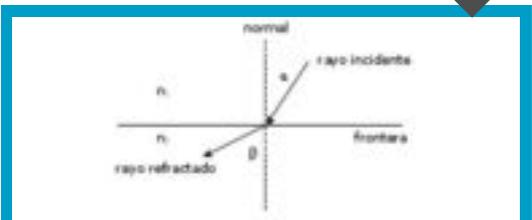
$$n = c / v$$

Donde:

- c = Velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente, $3 \cdot 10^8$ m/s).
- v = Velocidad de la luz en el material estudiado.

Los efectos de reflexión y refracción que se dan en la frontera entre dos medios (en la fibra el núcleo y en el revestimiento) dependen de sus índices de refracción y del ángulo de incidencia del rayo luminoso.

Para analizar este proceso podemos integrar la ley de Snell:



Ley de Snell

$$n_1 \text{ sen}\alpha = n_2 \text{ sen}\beta,$$

Donde:

- n_1 = Índice de refracción del material 1.
- n_2 = Índice de refracción del material 2.
- β = Ángulo de incidencia.
- α = Ángulo de refracción.

La ley de Snell nos dice que el índice de refracción del primer medio, por el seno del ángulo con el que incide la luz en el segundo medio, es igual al índice del segundo medio por el seno del ángulo con el que sale propagada la luz en el segundo medio.

Según esta ley, al incidir un rayo luminoso sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción (núcleo y revestimiento en una fibra óptica, en nuestro caso), una parte del rayo se refleja y otra se refracta.

Dependiendo de las constantes de refracción de los materiales, existe un ángulo máximo de incidencia de la luz sobre el extremo de la fibra, para el cual toda la luz incidente se propaga. Este ángulo se llama **ángulo de aceptación** y está dentro del “cono de aceptación” que hemos mencionado.

El seno del ángulo de aceptación se conoce como apertura numérica –AN–. Cualquier onda que entre con un ángulo mayor que el de aceptación, escapará a través del revestimiento.

El concepto de **apertura numérica** se usa para describir la potencia colectora de luz de la fibra y para calcular la eficiencia de acoplo fuente/fibra. Está definida como:

$$AN = \text{sen } \alpha_{\text{max}}$$

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde:

- α_{max} = Máximo ángulo de aceptación.
- n_1 = Índice de refracción del núcleo.
- n_2 = Índice de refracción del recubrimiento.

Al aumentar AN, también se incrementa el **grado de dispersión modal** (aumenta el número de modos o rayos que se propagan por la fibra) y, en consecuencia, disminuye el **ancho de banda** disponible.

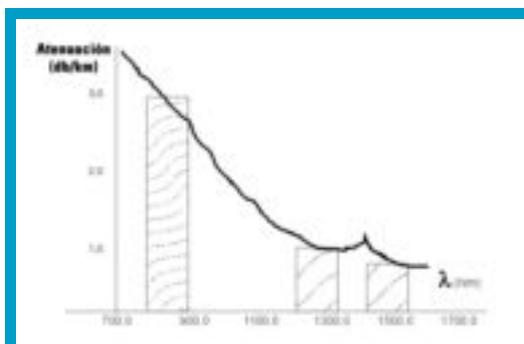
Los dispositivos empleados en aplicaciones optoelectrónicas funcionan en la banda óptica del espectro electromagnético. La banda del espectro óptico se divide en:

- **Ultravioleta**, con longitudes de onda entre 0,6 y 380 nm (nanómetros).
- **Espectro visible**; es la banda estrecha del espectro electromagnético formada por las longitudes de onda a las que es sensible el ojo humano. Corresponde al margen de longitudes de onda entre 350 y 750 nm.
- **Infrarrojo**, con longitudes de onda entre 750 nm y 1 mm.

Los sistemas de comunicación óptica utilizan la parte de la banda infrarroja más cercana al espectro visible.

La selección de la longitud de onda se realiza teniendo en cuenta la disponibilidad de dispositivos adecuados (emisores, receptores) y fibras ópticas con bajas pérdidas.

Actualmente, se trabaja en las tres bandas de frecuencia marcadas en la figura, que se conocen con el nombre de **ventanas**:



Ventanas de mínima atenuación de las fibras ópticas empleadas las transmisiones

Longitud de onda (λ)

1º ventana: 850 nm

2º ventana: 1300 nm

3º ventana: 1550 nm

Como observamos en la figura, se produce un aumento de la atenuación a medida que disminuye la longitud de onda. También podemos analizar la frecuencia; en este caso, la atenuación aumenta a medida que crece la frecuencia.

Los fenómenos de atenuación en las transmisiones por fibra óptica se producen por:

- **El efecto dispersión.** La velocidad de un rayo de luz en un medio depende de su índice de refracción n y de la longitud de onda del rayo: por lo tanto, si por la fibra se envían rayos de distinta longitud de onda λ , éstos tendrán distintas velocidades de propagación y el pulso obtenido en el receptor estará deformado (será más ancho y de menor amplitud). Lo mismo ocurre cuando se envían rayos lumínicos con distintos ángulos de incidencia, pues algunos deben recorrer más camino que otros.
- **La impureza del material.** Si bien los materiales utilizados en el núcleo de la fibra óptica son de elevada pureza, ninguno es completamente transparente; por esta razón, la luz transportada disminuye su intensidad al aumentar la distancia recorrida.
- **Las pérdidas en empalmes y conectores.** Este tipo de elementos introduce pérdidas debido a imperfecciones mecánicas y/o deficiencias en el conexionado (desalineación de conectores, pulido heterogéneo, etc.).

Los alumnos investigan cuáles son las principales aplicaciones de la fibra óptica.

Hoy funcionan muchas redes de fibra para comunicación a larga distancia que proporcionan conexiones transcontinentales y transoceánicas. Una ventaja de los sistemas de fibra óptica es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un repetidor para recuperar su intensidad.

En la actualidad, los repetidores de fibra óptica están separados entre sí unos 60 a 100 km –frente a, aproximadamente, 1,5 km en los sistemas eléctricos–.

Los amplificadores de fibra óptica recientemente desarrollados pueden aumentar todavía más esta distancia.

La aplicación cada vez más extendida de la fibra óptica son las redes de área local. Al contrario que las comunicaciones de larga distancia, estos sistemas conectan a una serie de abonados locales con equipos centralizados –como computadoras o impresoras–.

Este sistema aumenta el rendimiento de los equipos y permite, fácilmente, la incorporación de nuevos usuarios a la red. El desarrollo de nuevos componentes electro-ópticos y de óptica integrada aumentará aún más la capacidad de los sistemas de fibra óptica.

También pueden emplearse para transmitir imágenes; en este caso, se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y ópticamente pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lupa.

Las fibras ópticas también se emplean en una amplia variedad de sensores, que va desde termómetros hasta giroscopios. En este campo, su potencial de aplicación casi no tiene límites.

Las fibras pueden resultar especialmente útiles cuando los efectos eléctricos podrían hacer que un cable convencional resultara inútil, impreciso o, incluso, peligroso. También se han desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales.

Las dos ventajas más sobresalientes de los cables de fibras ópticas son:

- Tienen un peso muy inferior a los enlaces de cobre para igual capacidad de transmisión.
- Presentan inmunidad a las interferencias electromagnéticas.

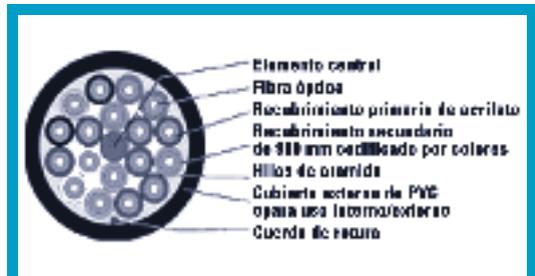
Estas dos características son fundamentales, por ejemplo, para la construcción de aviones, donde el peso y las interferencias electromagnéticas son factores importantes en su diseño.

El profesor y los alumnos de "Tecnología de las comunicaciones" analizan, ahora, las principales características técnicas de una fibra óptica

Como dijimos, una fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica –por la cual se efectúa la propagación– denominada núcleo y por una zona externa a éste y coaxial con él –totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación–, denominada envoltura o revestimiento.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales.

- Del diseño geométrico de la fibra.
- De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración (diseño óptico).
- De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esta anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra.



Características fundamentales de la fibra óptica

- Elemento central
- Fibra óptica
- Recubrimiento primario de acrilato
- Recubrimiento secundario de 900 µm codificado por colores
- Hilos de aramida
- Cubierta externa de PVC para uso interno/externo
- Cuerda de rotura

Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 o 10 mm, y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos.

El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos, redundando en su facilidad de instalación.

El silicio tiene un amplio margen de funcionamiento en lo referente a temperatura, pues funde a 600 °C. La fibra óptica presenta un

funcionamiento uniforme desde $-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin degradación de sus características.

Como ya sabemos, la mayoría de las fibras ópticas se hace de arena de silicio, materia prima abundante en comparación con el cobre: Con unos kilogramos de silicio pueden fabricarse, aproximadamente, 50 kilómetros de fibra óptica.



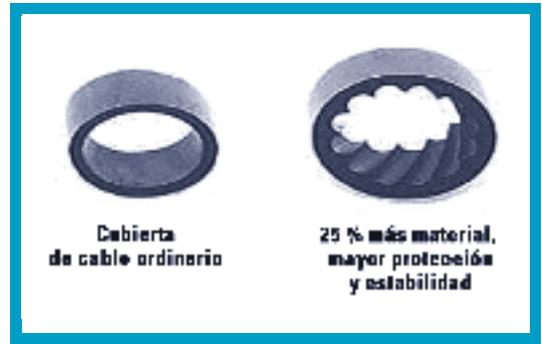
Consiste en una o varias hebras delgadas de vidrio o de plástico con diámetro de 50 a 125 micras.

El conjunto de núcleo y revestimiento está, a su vez, rodeado por una funda de plástico u otro material que lo protege de la humedad, el aplastamiento, los roedores y otros riesgos del ambiente.

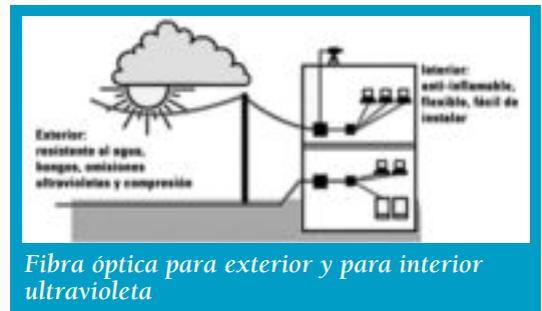
El profesor provee un *dossier* de información que permite al grupo analizar las principales características físicas de las fibras ópticas.

En estas últimas décadas, la fibra óptica ha evolucionado en forma notoria y ha dado origen a una tecnología con nuevas características:

Coberturas más resistentes. La cubierta especial es extruida a alta presión directamente sobre el mismo núcleo del cable, resultando que la superficie interna de la cubierta del cable tenga aristas helicoidales que se aseguran con los subcables. La cubierta contiene 25 % más material que las cubiertas convencionales.

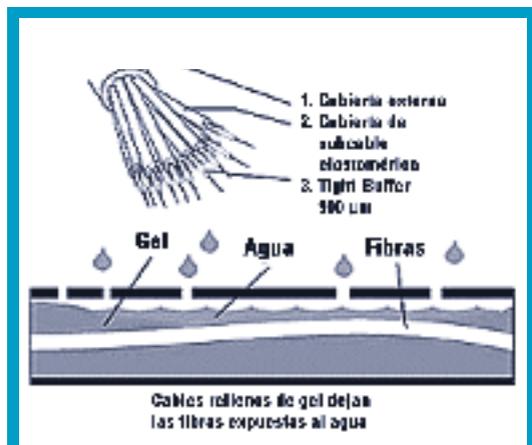


Uso dual (interior y exterior). Esto implica resistencia al agua, a los hongos y a las emisiones ultravioleta. Una cubierta resistente, buffer de 900 micrómetros, fibras ópticas probadas bajo 100 kpsi y funcionamiento ambiental extendido, contribuyen a una mayor confiabilidad durante el tiempo de vida.



Mayor protección en lugares húmedos. Existen cables en los que las fibras se ubican en tubos rellenos con gel. El gel dentro de la

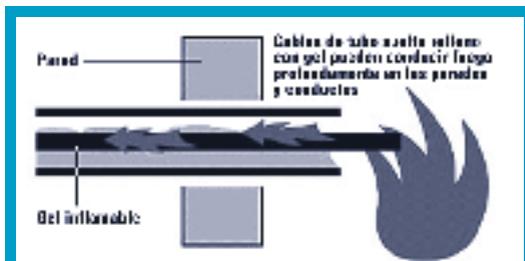
cubierta se asienta, dejando canales que permiten que el agua migre hacia los puntos de terminación. De otra forma, el agua puede acumularse en el interior del cable y dañar la vida útil de las fibras. El resultado es una mayor vida útil y mayor confiabilidad, especialmente en ambientes húmedos.



Estructura de un cable con varias fibras y construido con tubos rellenos con gel

Protección anti-inflamable. Los nuevos avances en protección anti-inflamable hacen que disminuya el riesgo que suponen las instalaciones antiguas de fibra óptica, que contenían cubiertas de material inflamable y relleno de gel –que, también, es inflamable–.

Estos materiales no pueden cumplir con los requerimientos de las normas de instalación, presentan un riesgo adicional y pueden, además, crear un reto costoso y difícil en la restauración después de un incendio. Con los nuevos avances en este campo y en el diseño de estos cables, se eliminan estos riesgos y se cumple con las normas de instalación.



Propagación del fuego en cables de fibras ópticas con gel

Luego de esta introducción, los alumnos analizan la clasificación de las fibras ópticas.

Atendiendo a las propiedades modales de las fibras, se las puede agrupar en dos categorías:

En una **fibra monomodo**, la luz puede tomar un único camino a través del núcleo -que mide alrededor de 10 micrómetros de diámetro-. Las fibras monomodo son más eficaces a largas distancias; pero, el pequeño diámetro de su núcleo requiere un alto grado de precisión en la fabricación, el empalme y la terminación de la fibra.

La **fibra multimodo**, en cambio, tiene núcleos de entre 50 y 200 micrómetros de diámetro. Se clasifica, en función del índice de refracción, en **índice escalón** e índice gradual. En las fibras de índice escalón se verifica que el índice de refracción es uniforme a lo largo del diámetro del núcleo y que disminuye abruptamente en el recubrimiento. En las fibras de **índice gradual**, el índice de refracción varía gradualmente, desde el centro del núcleo hacia los extremos de éste, y es inferior en las proximidades del revestimiento que en el eje de la fibra.

Las ondas luminosas se propagan ligeramente más lentas en las proximidades del eje del núcleo que cerca del revestimiento. Cabe recordar que la velocidad de propagación dentro de la fibra disminuye a medida que aumenta el índice de refracción del medio.

Fibras multimodo de índice escalón →

Poseen varios modos o rayos de propagación.

Fibras monomodo de salto de índice →

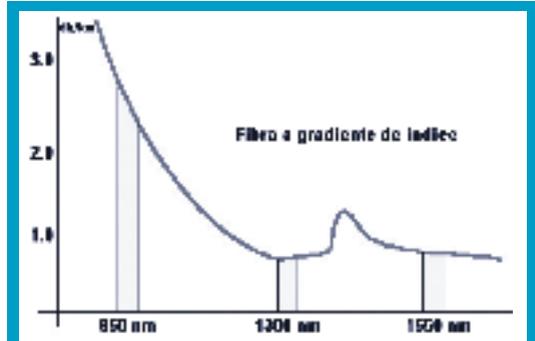
Son iguales a las multimodo de índice escalón, excepto en que el diámetro del núcleo es mucho más pequeño, por lo que sólo permiten propagar un único modo.

Fibra multimodo de índice gradual →

El índice de refracción varía gradualmente en el núcleo. Esta variación da lugar a que la luz se propague con diferente velocidad, dependiendo de la zona del núcleo por la cual se transmite. Mientras más alto es el índice de refracción, más baja es la velocidad de propagación.

Generalmente, se utilizan las fibras multimodo en la primera y segunda ventanas; y las monomodo en la segunda y tercera ventanas.

El debilitamiento de la luz en la fibra está en función de la longitud de onda de la fuente. Ésta es constante para todas las frecuencias de la señal útil transmitida.



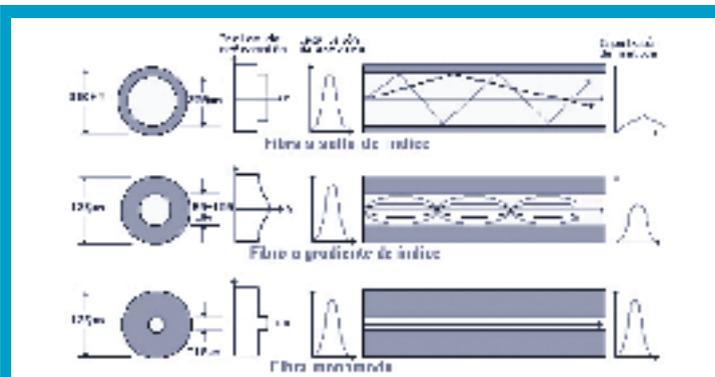
Atenuación de la luz en las fibras ópticas en función de la longitud de onda; el debilitamiento es más importante en el rojo (850 nm) que en el infrarrojo (1300-1550 nm)

Hasta aquí, los alumnos de "Tecnología de las comunicaciones" han estudiado cómo está conformada una fibra óptica, cuáles fueron sus cambios tecnológicos, cuáles son las características técnicas más importantes y cómo pueden clasificarse.

El profesor presenta, ahora, los conceptos físicos de atenuación (pérdidas) y dispersión en una fibra óptica.

Las pérdidas en las fibras ópticas producen atenuación de la luz que por ella se propaga, manifestándose como una disminución en la potencia de luz en el extremo receptor.

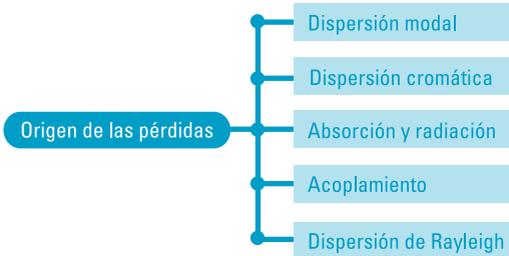
Sin embargo, debe destacarse que, de todos los medios físicos de comunicación utilizados, las fibras ópticas son las que presentan menos pérdidas ante iguales distancias a cubrir con el enlace.



Esquema de las fibras ópticas multimodo y monomodo

Como ejemplo de lo señalado, podemos decir que, en este tipo de medio de comunicaciones, se pueden obtener atenuaciones del orden de 0,2 db/km, para fibras monomodo.

Esto ha permitido que, a la fecha, existan enlaces que ya trabajan a velocidades de transmisión del orden de varios Gbps.



Pérdidas por dispersión modal. Estas pérdidas son, normalmente, las de mayor importancia. Se presentan en las fibras multimodo a causa de la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz (modos), dado que cada uno de ellos toma diferentes caminos y, por lo tanto, llegan en diferentes instantes.

Esto origina que, en el extremo receptor, el pulso se ensanche respecto del ancho de pulso original con el que fue generado en el extremo transmisor.

Pérdidas por dispersión cromática. Se producen en los casos en que el emisor no genera luz monocromática –como es el caso del led–.

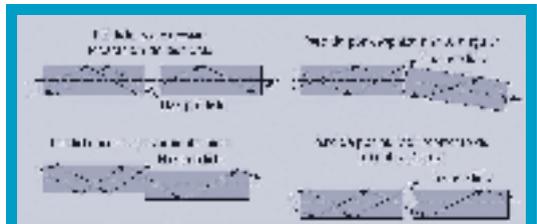
Tal como ya indicamos, el índice de refracción depende de la longitud de onda y, por lo tanto, al emitirse diferentes longitudes de onda desde una fuente cromática, éstas viajarán

a velocidades diferentes y producirán en el receptor un ensanchamiento del pulso y, consecuentemente, una disminución de su amplitud. Cabe destacar que estas pérdidas son mucho menores que las producidas por la dispersión modal.

Pérdidas por absorción y radiación. Son pérdidas producidas por la forma en que se construyen las fibras ópticas. En particular, las pérdidas por absorción se originan por las impurezas que es necesario incorporar al silicio para obtener índices de refracción diferentes entre el núcleo y el recubrimiento. Estas impurezas absorben la luz y la transforman en calor.

A su vez, al construir las fibras, siempre se producen imperfecciones tales como pequeños dobleces, discontinuidades, etc., que originan radiaciones indeseadas que disminuyen la potencia, al final de toda la transmisión.

Pérdidas por acoplamiento. Las pérdidas por acoplamiento se producen en cualquier tipo de fibra por uniones imperfectas entre las distintas partes que componen el circuito.



Pérdidas por acoplamientos incorrectos; para condiciones normales, el valor típico de pérdidas por cada uno es de 0,5 db, aún cuando la calidad tecnológica con que se realiza cada acoplamiento varía este valor.

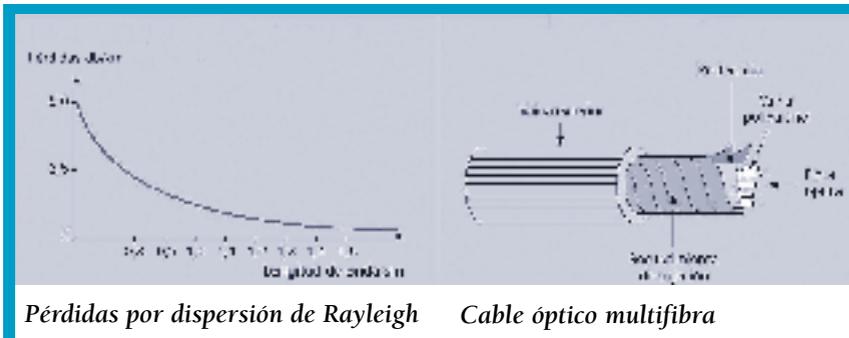
Pérdidas por dispersión de Rayleigh. En la construcción de las fibras ópticas se trabaja el silicio en un estado entre el líquido y sólido, comúnmente denominado estado plástico, intermedio entre los dos primeros. Al solidificarse el estado plástico, se producen, inevitablemente, irregularidades submicroscópicas que permanecen en el material.

Al incidir un rayo de luz en estas irregularidades, se produce un fenómeno indeseado de difracción, que se denomina *pérdidas de Rayleigh* -en honor de este importante investigador que fue el primero en estudiar estos fenómenos en forma genérica²-.

¿Qué es un enlace optoelectrónico?

Los alumnos retoman el problema “Cálculo de un enlace de comunicaciones para la transmisión de imágenes de TV”.

Para tomar decisiones respecto de la topología del enlace y la determinación de los elementos necesarios para su implementación, les resulta necesario repasar qué es un enlace optoelectrónico y qué elementos lo conforman.



Pérdidas por dispersión de Rayleigh Cable óptico multifibra

Relación entre la longitud de onda del pulso de luz y las pérdidas en una fibra óptica; se puede observar que no es posible trabajar en la zona visible del espectro, a causa de sus elevadas pérdidas. Esta difracción produce pérdidas en la potencia de luz que se incrementan a medida que el haz recorre una mayor distancia

Se denomina **sistema optoelectrónico** a la combinación de los diversos componentes necesarios para formar un sistema de comunicación que utiliza fibras ópticas como medio de transmisión.

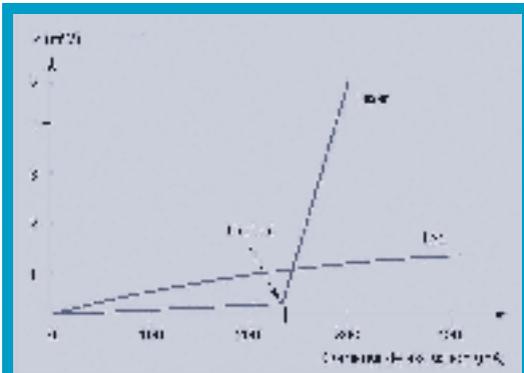
Estos sistemas están compuestos por:

- un transmisor, cuya misión es la de convertir la señal eléctrica en señal óptica susceptible de ser enviada a través de una fibra óptica,
- un receptor, ubicado en el extremo opuesto de la fibra óptica, cuya misión es la de convertir, nuevamente, la señal óptica en señal eléctrica.

²John William Strutt Rayleigh nació en la ciudad de Maldon, Inglaterra, en 1842, y falleció en 1919. Matemático y físico, obtuvo el Premio Nobel de Física en 1904 por sus trabajos relacionados con los fenómenos de propagación de ondas. Fue director del Laboratorio de Cavendish en la Universidad de Cambridge entre los años 1879 y 1884. En particular, sus estudios estuvieron enfocados a la óptica física, la electricidad, los fenómenos relacionados con las vibraciones de los gases y de los sólidos elásticos.

En este tipo de sistema, la información se transmite mediante pulsos de luz que viajan por la fibra óptica.

Para transmitir la información mediante el uso de luz, es necesario disponer de los **emisores** de luz denominados led -acrónimo de *Light Emitted Diode*- y láser -acrónimo de *Light Amplification Stimulated Emission Radiation*-, que transforman una señal eléctrica en fotones, los que viajan por la fibra. Ambos son semiconductores de estado sólido y emiten espontáneamente luz cuando pasa una corriente eléctrica a través suyo. En la composición de los semiconductores se incorporan materiales diferentes que posibilitan obtener emisiones de luz para la primera, segunda o tercera ventana.



Potencia óptica del led y el láser, en función de la corriente de excitación

Se denomina **transmisor** al emisor de luz led o láser con sus circuitos excitadores. Las diferencias entre uno y otro se basan en el ancho de banda o ancho espectral de estos dispositivos.

Para transmisores digitales es importante tener muy en cuenta la velocidad máxima de transmisión, la que está relacionada con un

parámetro del emisor de luz denominado **tiempo de crecimiento** –que es el necesario para que el pulso alcance su valor nominal–.

En el otro extremo del vínculo, para detectar esa luz, se usan **fotodetectores** denominados APD -acrónimo de *Avalanche Photo Diode*- , PIN -acrónimo de *Photo Detector*- y PIN/FET -acrónimo de *Photo Detector/Field Effect Transistor*-, que convierten los fotones en electrones.

Debido a que, hasta ahora, la transmisión de la información se realizaba mediante un vínculo eléctrico, existe una gama de equipos transductores que convierten voz, video, datos, etc., en señales eléctricas. Pero, para realizar una transmisión de señales mediante fibra óptica, a esos equipos debemos agregarles conversores de señales eléctricas a luz -en la parte transmisora- y conversores de luz a señales eléctricas -en la parte receptora-.

Fibras empleadas en redes WAN -Wide Area Network-

Para resolver el problema, los alumnos también necesitan recordar información básica acerca de redes.

El principal objetivo al diseñar un cable es el de proteger las fibras de las condiciones ambientales adversas a las cuales van a ser sometidas durante su vida útil y de los esfuerzos, a menudo muy duros, de instalación.

Durante el proceso de selección se evalúan los siguientes factores:

- el peso,
- el coeficiente de fricción,
- el diámetro,
- el radio de curvatura,
- la rigidez.

Por otro lado, también debemos considerar las condiciones generales de las redes de área extensa –WAN–:

- Las distancias a conectar son muy grandes y, por lo tanto, los tramos son largos; esto implica el empleo de empalmes.
- En general, se utilizan fibras monomodo, por tener menor atenuación y mayor ancho de banda.
- Las atenuaciones deben ser mantenidas siempre al mínimo, sean cuales sean las condiciones.

Por esto, el empleo de cables universales no tiene demasiado sentido. En su lugar se utilizan cables fabricados a partir de fibras protegidas por un tubo relleno de gel, cableadas alrededor de un elemento muy rígido, impregnadas de nuevo de gel, cubiertas con polietileno duro, blindadas con elementos metálicos.

Cuando los cables ópticos sólo se utilizaban en planta externa, los diseños se orientaban a proteger las fibras de la humedad, de variaciones térmicas importantes y de otros factores igualmente críticos habituales en exteriores. Entonces, al instalar estos cables en el interior de los edificios se originaba gran cantidad de inconvenientes pues su diseño y

los materiales utilizados no eran adecuados para estas instalaciones.

Es así como se diseñaron cables para interior que fueron -como era de esperar- radicalmente distintos a los de planta externa y, por lo tanto, inadecuados para tales aplicaciones. Además, en estos cables se podían utilizar materiales resistentes al fuego, con baja emisión de humos y libres de halógenos.

Sobre la base del estudio de las características técnicas de la fibra óptica y su empleo en el cableado de redes de área extensa (redes WAN) y redes de área local (redes LAN), los alumnos reconstruyen las ventajas e inconvenientes que presenta el uso de este tipo de medio de comunicación, y los remiten al problema "Cálculo de un enlace de comunicaciones para la transmisión de imágenes de TV".

Las ventajas del empleo de fibra óptica son:

- Mayor capacidad de transmisión.
- Mayor velocidad de transmisión. Las señales recorren los cables de fibra óptica a la velocidad de la luz ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), mientras que las señales eléctricas recorren los cables a una velocidad entre el 50 y el 80 % de ésta, según el tipo de cable.
- Inmunidad total a interferencias electromagnéticas. La fibra óptica no produce ningún tipo de interferencia electromagnética, y no se ve afectada por rayos o por pulsos electromagnéticos nucleares –NEMP– que acompañan a las explosiones nucleares.

- No presentan problemas de *crosstalk* –reflexiones–, como ocurre en las líneas de transmisión eléctricas.
- La atenuación aumenta con la distancia en menor relación que para el caso de los cables eléctricos, lo que permite mayores distancias entre repetidores.
- Se consiguen tasas de error típicas del orden de 10^{-9} , frente a las tasas del orden de 10^{-6} que alcanzan los cables coáxiles.
- No existe riesgo de cortocircuito ni de daños de origen eléctrico.
- Los cables de fibra óptica pesan mucho menos que los cables de cobre.
- Los cables de fibra óptica son, generalmente, de menor diámetro, más flexibles y más fáciles de instalar que los cables eléctricos.
- Los cables de fibra óptica son apropiados para utilizar en una amplia gama de temperaturas.
- Es más difícil realizar escuchas sobre cables de fibra óptica que sobre cables eléctricos -es necesario cortar la fibra para detectar los datos transmitidos-. Las escuchas sobre fibra óptica pueden detectarse fácilmente, utilizando un reflectómetro en el dominio del tiempo o midiendo las pérdidas de señal.
- Se puede incrementar la capacidad de transmisión de datos, añadiendo nuevos canales que utilicen longitudes de onda distintas de las ya empleadas³.
- La fibra óptica presenta una mayor resistencia a los ambientes y líquidos corrosivos que los cables eléctricos.
- Las materias primas para fabricar vidrio son abundantes y se espera que los costos se reduzcan a un nivel similar a los de los cables metálicos.

- La vida media operacional y el tiempo medio entre fallas de un cable de fibra óptica son superiores a los de un cable eléctrico.
- Los costos de instalación y mantenimiento para grandes y medias distancias son menores que los que se derivan de las instalaciones de cables eléctricos.

Inconvenientes en el empleo de fibra óptica:

- Elevado costo tanto de la fibra óptica como de los elementos de estas redes: transreceptores, conmutadores, etc.
- Es un medio relativamente nuevo, por lo que aún falta experiencia y estandarización -sobre todo en entornos LAN-.



³Esta técnica, de reciente aparición, se denomina DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing-.

Medio físico	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones típicas
Par trenzado	<ul style="list-style-type: none"> - Costo. - Sencillez. - Facilidad para añadir más nodos. - Muy extendido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible al ruido. - Distancia limitada (atenuación). - Ancho de banda limitado. - Seguridad limitada. 	<ul style="list-style-type: none"> - LAN. - Telefonía.
Cable coaxial	<ul style="list-style-type: none"> - Ancho de banda elevado. - Grandes distancias. - Inmunidad al ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones físicas. - Seguridad limitada. - Menor flexibilidad. - Costo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Televisión por cable. - Redes Ethernet antiguas (1990).
Fibra óptica	<ul style="list-style-type: none"> - Ancho de banda muy elevado. - Muy grandes distancias. - Inmunidad al ruido. - Tamaño pequeño. - Robustez. 	<ul style="list-style-type: none"> - Conexiones complicadas. - Costo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Telecomunicaciones a larga distancia. - Backbones
Inalámbrico	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestructura menor. - Instalación sencilla. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado. - Menor capacidad. - Poco evolucionado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos móviles. - Distancias cortas.

Hasta aquí, los alumnos han analizado cuáles son las principales aplicaciones de fibra óptica en entornos de redes WAN) y de redes LAN.

Para completar el estudio sobre enlaces optoelectrónicos, el profesor presenta algunos dispositivos de conectividad que pueden encontrarse en el mercado para redes con fibra óptica, para que su grupo realice un análisis tecnológico⁴

Tarjetas de red PCI –*Peripheral Component Interconnect Local Bus*– a ISA –*Industry Standard Architecture*– 10 y 100 Mbps, y convertidores de medio en multimodo y monomodo con autonomía de hasta 60 km.



⁴Las diversas etapas del método de análisis o lectura surgen como respuesta a interrogantes que, normalmente, un observador crítico se plantearía frente a los objetos en general y a un objeto en particular: ¿Qué forma tiene? ¿Qué función cumple? ¿Cuáles son sus elementos y cómo se relacionan? ¿Cómo funciona? ¿Cómo está hecho y de qué material? ¿Qué valor tiene? ¿Cómo está relacionado con su entorno? ¿Cómo está vinculado a la estructura sociocultural y a las demandas sociales? (Gay, Aquiles; Ferreras, Miguel. 1997. *La Educación Tecnológica. Aportes para su implementación*. Prociencia-CONICET. Ministerio de Cultura y Educación de la Nación. Buenos Aires).
Usted puede acceder a la versión digital de esta obra desde el sitio web: www.mict.edu.ar

Switches Ethernet desde 5 puertas hasta 24 puertas UTP –*Unshielded Twisted Pair*– son modelos administrables con soporte VLAN –*Virtual LAN*– y SNMP –*Simple Network Management Protocol*– para mayor flexibilidad de aplicaciones, con montaje en rack de 19" o sobre escritorio para 100 Mbps de operación Lantech:



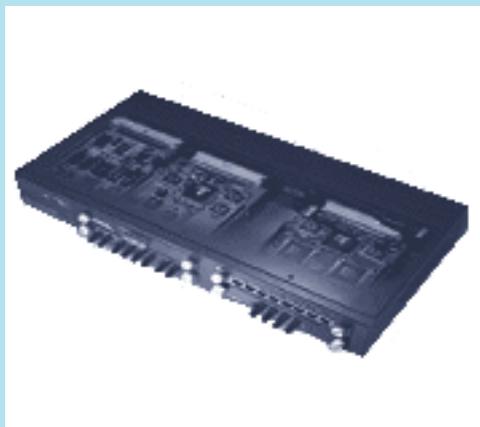
Switch configurable Lantech con módulos de fibra óptica en 100 Mbps:



Soluciones configurables; hasta 64 puertas con opciones de fibra óptica y puertas 1000 Bas-TX:



Switch Lantech®, configurado con puertas de fibra óptica en 100 Mbps y módulos UTP de 8 puertas *Dual Speed*:

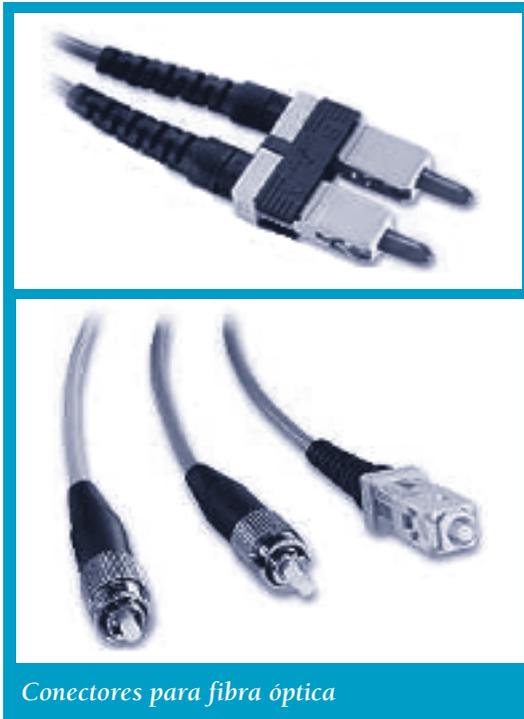


Switch configurable con capacidad de insertar tarjetas de diferente tipo con puertas –ports– UTP *Unshielded Twisted Pair*– y fibra óptica.



Conectores y switches empleados en instalación con fibra óptica

Los conectores que generalmente se emplean con la fibra óptica son de los tipos: ST –conector metálico–, SC –conector cerámico–, SMA –conector empleado en enlaces Wireless–, FDDI –conector empleado en redes *Fiber Distributed data interface*– y FC –conector empleado en enlaces de fibra óptica *Fiber Channel*–.



Los switches con puertos de 100Base-FX, y conectores ST son la mejor solución para las redes que requieren conexiones a más de 100 metros de distancia. Estos switches ofrecen modos dúplex completo y semidúplex en todos los puertos de fibra. Con soporte para todos los sistemas

operativos de red importantes, también proveen una configuración de fibra centralizada que puede ser ampliada hasta 2 km.

Las características generales de los switches para fibra óptica son:

- Autodetección de 10/100 Mbps en los puertos TX.
- Modos dúplex completo y semidúplex en cada puerto de fibra (con dip-switch).
- Conmutación de paquetes en modo almacenamiento y envío.
- Configuración automática *-Plug and Play-*.
- Swich *Non Blocking* -sin bloqueos-.
- Con soporte para 1,024 MAC address entries.
- Control de flujo en modo semidúplex.
- Montaje en rack conforme con norma ANSI/EIA/TIA/568.

Certificación de cableado realizado con fibra óptica

Una vez realizados los cableados de una instalación -tanto sean horizontales como vínculos entre edificios- es necesario proceder a certificarlos, incluidos los patch cord⁵, y cables interiores y exteriores utilizados. Para esto se utiliza instrumental que permite verificar el comportamiento del material empleado a través de su respuesta frente a las pruebas a que se lo someta (parámetros eléc-

⁵Patch Cord son cables de conexión UTP que, en ambos extremos, tienen conectores Jack RJ 45.

tricos del tipo de conductor utilizado), así como también controlar los dispositivos de terminación y todos los accesorios involucrados en las distintas conexiones, los que deben soportar velocidades de, al menos, 100 Mbps. Esta certificación se realiza en cableados de cobre o de fibra óptica, dispositivos de conmutación, concentradores, y todo dispositivo activo o pasivo que se involucre en los tendidos de la obra.

Cuando se efectúa una oferta de cableado, el oferente debe incorporar el detalle técnico de los fabricantes, marca, modelo y especificaciones de los instrumentos de certificación a utilizar en los procesos de medición: certificadores, medidores del ancho de banda, reflectómetros, etc.; también debe incluir los certificados de verificación anual de los instrumentos en los cuales conste que son aptos para el trabajo de certificación o de comprobación solicitado.

Al respecto, se toman como referencia los parámetros y criterios que se recomiendan en la EIA/TIA 568, EIA/TIA 569, EIA/TIA 607⁶, normas relativas al cableado estructurado en edificios y campus.

Existe gran variedad de instrumentos de medición tanto para cobre, fibra y protocolos:



Instrumental para certificación de la obra de cableado

⁶EIA y TIA son dos asociaciones empresarias que agrupan a las industrias de electrónica y telecomunicaciones de los Estados Unidos.

Los alumnos leen la Norma de Cableado Estructurado ANSI/EIA/TIA 568.

Dos asociaciones empresarias (EIA y TIA) que agrupan a las industrias de electrónica y telecomunicaciones de los Estados Unidos, desarrollaron, en forma conjunta, la norma EIA/TIA 568, que establece las

El **cableado estructurado** es el sistema de cableado de telecomunicaciones para edificios que presenta, entre sus características, la de ser general; es decir, la característica de soportar una amplia gama de productos de telecomunicaciones, sin necesidad de ser modificado.

pautas a seguir para la ejecución del cableado estructurado.

Otras normas relacionadas son:

- ANSI/EIA/TIA 569: *Commercial Building Standard for Telecommunications Pathways and Spaces.*
- ANSI/EIA/TIA 570: *Residential and Light Commercial Telecommunications Wiring Standard.*
- ANSI/EIA/TIA 606: *Administration Standard for the Telecommunications Infrastructure of Commercial Buildings.*
- ANSI/EIA/TIA 607: *Grounding and Bonding Requirements for Telecommunications in Commercial Buildings.*

Las normas garantizan que los sistemas que se ejecutan de acuerdo con ellas soportarán todas las aplicaciones de telecomunicaciones presentes y futuras por un lapso de, al menos, diez años.

Esta afirmación puede parecer excesiva; pero, si se tiene en cuenta que entre los autores

de la norma están, precisamente, los fabricantes de estas aplicaciones, puede contarse con su perspectiva real. Esto es, los fabricantes son quienes aseguran que, al menos durante los próximos diez años, todos los nuevos productos a aparecer podrán soportarse en los sistemas de cableado que se diseñen hoy de acuerdo con la norma.

Otro de los beneficios del cableado estructurado es que permite la administración sencilla y sistemática de las mudanzas, y cambios de ubicación de personas y equipos.

El sistema de cableado soporta, así, un ambiente multiproducto y multiproveedor. Esto implica que debe ser lo más general posible; no se trata de diseñar un cableado teniendo en mente la utilización que se le dará en el corto plazo sino tratando, en lo posible, de que sea independiente de los productos que lo utilizarán, y de la disposición y uso actual de las oficinas.

Elementos que configuran el cableado estructurado

Los distintos elementos que componen la estructura general de un sistema de cableado estructurado son:

- Cableado horizontal.
- Cableado troncal o *backbone*.
- Puesto de trabajo.
- Gabinete o armario de telecomunicaciones.
- Sala de equipamiento o de red.
- Instalaciones de entrada.
- Administración.

Los vínculos externos (líneas telefónicas, de transmisión de datos, fibras ópticas, etc.) ingresan al edificio por las instalaciones de entrada, dirigiéndose de allí a la sala de red.

En este lugar se encuentran ubicados equipos de telecomunicaciones que dan servicio al edificio; como, por ejemplo, central telefónica privada (PABX⁷), routers, etc.

Desde allí arranca el cableado troncal o *backbone*, que se dirige a los gabinetes de telecomunicaciones.

En estos gabinetes se produce la transición entre cableado troncal y cableado horizontal (cableado de distribución).

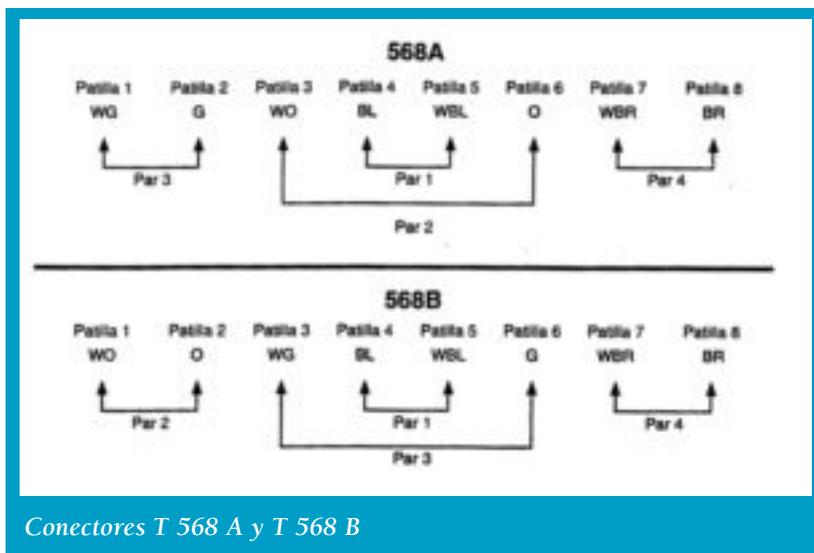
Es normal que se instalen allí, además, los equipos electrónicos que sean necesarios (típicamente, hubs o concentradores de redes de transmisión de datos, paneles de interconexión, etc.).

El cableado horizontal llega desde cada gabinete de telecomunicaciones hasta los puestos de trabajo.

Puesto de trabajo. Es el lugar en el que los usuarios interactúan con los equipos terminales de telecomunicaciones (computadoras, teléfonos, etc.). En una oficina típica, cada escritorio corresponde a un puesto de trabajo.

Para conectar los servicios a los puestos de trabajo se deben distribuir bocas de telecomunicaciones en las áreas de oficinas. Estas bocas son los lugares en los que el equipamiento del usuario se conecta al sistema de cableado.

Estas bocas se implementan, según la norma, utilizando conectores modulares de 8 posiciones (llamados, antiguamente, RJ - 45). La norma define, asimismo, dos configuraciones de cableado diferentes de dichos conectores, denominadas T 568 A y T 568 B.



Como gran parte de los equipamientos de los puestos de trabajo requiere alimentación eléctrica, es habitual colocar tomacorrientes junto a las bocas de telecomunicaciones; éstos corresponden al cableado de una red de distribución de energía eléctrica.

Para la correcta operación de las redes de computadoras y para la seguridad de todo el equipamiento, es fundamental que los toma-

⁷ Private Automatic Branch Exchange; centrales telefónicas privadas.

corrientes posean conexión de tierra y que estas conexiones se lleven a una única jabalina⁸ de buena calidad.

Es común agrupar las bocas de telecomunicaciones y los tomacorrientes en una única caja terminal. Cuando esta caja terminal se monta sobre piso o está embutida, se suele denominar **periscopio**.

Es muy importante prever que los ramales de alimentación eléctrica y de telecomunicaciones se encuentren separados por lo menos unos 25 centímetros; si se tienen que cruzar, lo deben hacer en ángulo recto, para evitar inconvenientes.

Si no es posible cumplir con estas indicaciones, se deben tomar otras medidas; por ejemplo, conducir la alimentación eléctrica por conductos metálicos o caños metálicos independientes de los utilizados para los sistemas de telecomunicaciones.

Como dato general para el dimensionamiento, se debe prever un puesto de trabajo cada nueve metros cuadrados de oficina.

Estos puestos de trabajo deben contar con, por lo menos, dos bocas de telecomunicaciones⁹, y tres o cuatro tomas de energía eléctrica. Es habitual calcular las cantidades de tomas de energía y bocas de la red por puesto.

Hoy en día resulta habitual utilizar una de las bocas para transmisión de datos y la otra para telefonía. Es de suponer que esta situación cambiará en el futuro distante, con el creci-

⁸Barra metálica de cobre que se conecta a tierra en los edificios.

⁹También conocidas como rosetas de comunicaciones.

miento de las necesidades de tráfico de datos y con la disminución de las de telefonía—que, paulatinamente, irán siendo incluidas dentro del tráfico de datos—. Si se diera esta situación y el cableado ha sido realizado correctamente, no sería necesario realizar modificaciones a la instalación en los puestos de trabajo. Lo mismo ocurre si fuera necesario, ocasionalmente, contar con dos bocas de telefonía.

El concepto es claro: Ninguna de las bocas debe tener *per se* una función asignada, sino que todas deben poder utilizarse para cualquier servicio de telecomunicaciones.

Las bocas no deben estar preparadas para placas Ethernet, sino que deben poder utilizarse para cualquier tecnología. Ello implica que cada boca debe conectarse de acuerdo con una de las disposiciones estándar (T 568 A o B), integrando los 8 hilos del cable.

La máxima longitud de cable admitida desde la boca de telecomunicaciones hasta el equipo terminal (típicamente, computador personal o teléfono) es de tres metros.

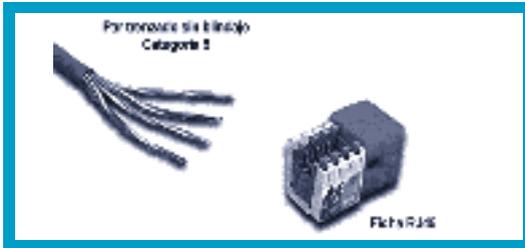
Cableado horizontal. Se denomina cableado horizontal a la porción del sistema de cableado que se extiende desde los puestos de trabajo a los gabinetes de telecomunicaciones.

La topología general del cableado horizontal es la estrella: cada boca de telecomunicaciones se conecta a un gabinete de telecomunicaciones.

La máxima distancia admitida desde la boca de telecomunicaciones al gabinete es de 90 metros, independientemente del medio utilizado.

Los medios de transmisión a utilizar en el cableado horizontal son:

- Cable de 4 pares retorcidos sin blindaje de 100 ohm de impedancia –UTP–.
- Cable UTP y conector RJ 45 “Jack”.



- Cable de fibra óptica de 62,5/125 micrómetros.
- Cables de combinados (UTP + fibra óptica).
- Cable de 4 pares retorcidos recubiertos blindados por foil (STP¹⁰).

Lo habitual hoy en día, es utilizar el cable denominado UTP.

Las especificaciones anexas a la norma EIA/TIA, clasifican los cables UTP según la máxima velocidad de transmisión de datos que soportan.

La decisión de qué tipo de cable utilizar se ve simplificada actualmente, debido a que la diferencia de precios de los cables ha disminuido mucho y que su impacto en el total de la obra ya no es significativo.

Se recomienda, por lo tanto –siempre que resulte factible–, utilizar cable UTP categoría 5e o 6.

¹⁰Shielded Twisted Pair.

Categorías de cables UTP

- Categoría 1 y 2** →
 - No se usa en Ethernet.
 - Categoría 1; se utiliza para telefonía.
 - Categoría 2, para voz y datos hasta 4 Mbps.
- Categoría 3** →
 - Soporta frecuencias de hasta 16 MHz.
 - Usado en 10Base-T y 100Base-T4.
- Categoría 4** →
 - Soporta frecuencias de 20 MHz.
 - Definido por la especificación TIA/EIA 568-A.
 - Usado en 10Base-T y 100Base-T4.
- Categoría 5** →
 - Soporta frecuencias hasta 100 MHz.
 - Definido en la especificación TIA/EIA 568-A.
 - Usado en 10Base-T, 100Base-T4 y 100Base-TX.
 - Puede soportar 1000 Base T.
- Categoría 5e** →
–5 enhanced;
5 realzado–
 - Soporta frecuencias de hasta 100 MHz.
 - Tiene mejoras respecto al Crosstalk y atenuación que el cat 5.
 - Definido en una actualización al estándar TIA/EIA 568-A.
 - Soporta 1000Base-T, 10Base-T, 100Base-T4 y 100Base-TX.
- Categoría 6** →
 - Soporta frecuencias de hasta 250 MHz.
 - Definido en el documento TIA/EIA-568-B.2-1.
- Categoría 7** →
 - Estándar para transmitir hasta 600 MHz.
 - No usa RJ45 como conector.

Debe tenerse en cuenta que, para aprovechar el cable categoría 5, todos los elementos auxiliares de interconexión (conectores, paneles, etc.) deben ser de categoría 5. Por otra parte, los procedimientos de instalación deben seguir la norma EIA/TIA 568.

La norma establece que se deben conectar los 4 pares de cada cable a la boca de telecomunicaciones, de modo de no tener que realizar ninguna reconexión o cambio en la boca si se modifica el servicio que se utiliza.

El cable se puede hacer llegar desde los puestos de trabajo a los gabinetes de telecomunicaciones por diferentes medios:

Ductos de techo. Son la solución técnicamente más completa, ya que proveen flexibilidad casi ilimitada y fácil acceso a los cables. Sin embargo, su costo elevado y consideraciones estéticas los pueden volver inviables, en muchos casos.

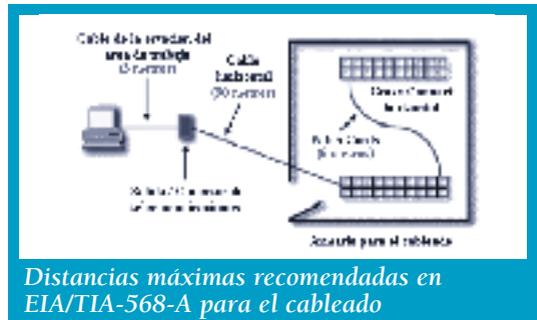
Ductos de piso. Son conductos empotrados en el piso destinados al pasaje de cables. Su instalación requiere de considerable obra civil. En el caso de que ya existan, debe verificarse con cuidado la sección, ya que la mayoría de los pisoductos con algunos años de antigüedad son demasiado estrechos para el volumen de cables que resulta necesario hoy.

Ductos de zócalos. Son conductos metálicos externos que se aplican sobre los zócalos. En muchos casos, son una solución adecuada y no resultan estéticamente desagradables.

La configuración del tipo de red que sirve a la boca se realiza en el gabinete de telecomunicaciones

correspondiente.

Por lo tanto, se recomienda llegar a cada puesto de trabajo con dos cables UTP de cuatro pares categoría 5 y terminarlos en conectores modulares de 8 posiciones (RJ 45), independientemente de que se destinen algunos a telefonía y otros a datos.



Cable canal. Es la solución más económica, si bien la de peor resultado estético. Esta solución emplea ductos denominados cable canal –generalmente, de plástico– que se adhieren a la pared.

Espacios de entretechos o sobre cielorrasos. Son, en muchos casos, la única posibilidad para la distribución horizontal.

En todos los casos, si por el mismo sistema de ductos se llevan cables de comunicaciones y de energía, se los debe conducir por secciones separadas del zócalo de piso o se deben separar los suficiente (como mínimo, 25 cm).

Si ello no es posible, los cables de energía se deben conducir por dentro de un caño metálico flexible puesto a tierra.

En los casos en que la separación sea pequeña, puede considerarse el uso de STP en vez

del UTP, por su mayor inmunidad frente al ruido eléctrico.

Cableado vertical –backbone–. El cableado vertical realiza la interconexión entre los diferentes gabinetes de telecomunicaciones, y entre éstos y la sala de equipamiento.

En este cableado ya no resulta económico mantener la estructura general utilizada en el cableado horizontal, sino que es conveniente realizar instalaciones independientes.

Esta filosofía se ve reforzada por el hecho de que, si fuera necesario sustituir el *backbone*, esto se realiza con un costo relativamente bajo y causando muy pocas molestias a los ocupantes del edificio.

El *backbone* telefónico se realiza habitualmente con cable telefónico multipar. Estos cables multipares efectúan la interconexión de cada uno de los cables asignados a telefonía en los gabinetes de comunicaciones y el distribuidor general de la central telefónica.

Debe preverse, por lo tanto, un par (dos pares, si los aparatos telefónicos son a cuatro hilos) por cada puesto de trabajo, desde cada gabinete de comunicaciones al distribuidor general, más una adecuada capacidad de reserva (aproximadamente, del 30 %).

Para definir el *backbone* de datos es necesario tener en cuenta cuál será la disposición física del equipamiento. Normalmente, el tendido físico del *backbone* se realiza en forma de estrella; es decir, se interconectan los gabinetes con uno que se define como centro de la estrella, en donde se ubica el equipamiento electrónico más complejo.

El backbone de datos se puede implementar con cables UTP o con fibra óptica. En caso de decidir utilizar UTP, éste será de categoría 5 y se dispondrá un número de cables desde cada gabinete seleccionado como centro de la estrella.

Actualmente, la diferencia de costo provocada por la utilización de fibra óptica se ve compensada por la mayor flexibilidad y posibilidad de crecimiento que brinda esta tecnología. Se construye el *backbone* llevando un cable de fibra desde cada gabinete al gabinete centro de la estrella.

Si bien para una configuración mínima Ethernet es suficiente con utilizar cable de 2 fibras, resulta conveniente utilizar cable con mayor cantidad de fibras (6 a 12), ya que la diferencia de costos no es importante y se posibilita: por una parte, disponer de conductores de reserva para el caso de falla de algunos y, por otra parte, la utilización en el futuro de otras topologías que requieren más conductores –como es el caso de la tecnología FDDI o sistemas resistentes a fallas–.

La fibra a utilizar es la denominada multimodo, que difiere de la monomodo –utilizada en vínculos de larga distancia, y por las empresas de telefonía y cable– por su menor costo de implementación y por su simplicidad en la instalación.

Como contrapartida, la fibra multimodo presenta mayor atenuación, efecto que es totalmente irrelevante en las longitudes utilizadas en *backbones* internos de edificios.

Existen diversos tipos de conectores que se pueden utilizar para terminar las fibras; los

más usuales son los denominados ST y, actualmente, los SC.

La utilización de backbone de cable coáxil –sea tanto fino (norma RG 58) como grueso (norma RG 218)– está totalmente desaconsejada.

Recomendamos, por lo tanto, realizar el backbone telefónico con cables multipares y el backbone de datos con cable de 8 fibras multimodo.

Gabinetes de telecomunicaciones. La norma EIA/TIA 568 prevé la transición de cableado vertical a horizontal y la ubicación de los dispositivos necesarios para lograrla en gabinetes independientes con puerta y cerradura, ubicados por lo menos uno por piso, denominados genéricamente armarios o gabinetes de telecomunicaciones.



Gabinete de telecomunicaciones



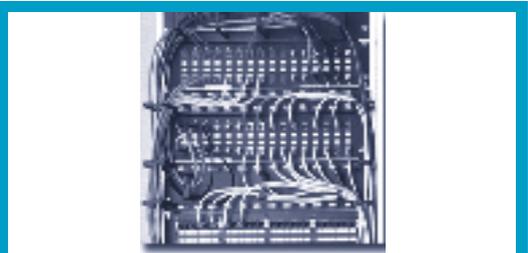
Estante con un soporte movable para teclado



Estante con soportes deslizantes



Administrador de cables de estilo de anillo



Paneles de conexionado

Elementos de un gabinete de telecomunicaciones

Habitualmente, se utilizan gabinetes estándar de 19 pulgadas de ancho con puertas de, aproximadamente, 50 centímetros de profundidad y de una altura entre 1,5 y 2 metros.

En estos gabinetes se disponen las siguientes secciones:

- Acometida (Instalación por la que se deriva hacia un edificio u otro lugar parte del fluido que circula por una conducción principal) de los puestos de trabajo. Dos cables UTP llegan desde cada puesto de trabajo.
- Acometida del *backbone* telefónico. Cable multipar que puede terminar en regletas de conexión o en *patch panels*.
- Acometida del *backbone* de datos. Cables de fibra óptica que se llevan a una bandeja de conexión adecuada.
- Electrónica de la red de datos. *Hubs*, *switches*, *bridges* y todo otro dispositivo necesario.
- Alimentación eléctrica para estos dispositivos.
- Iluminación interna, para facilitar la realización de trabajos en el gabinete.
- Ventilación, a fin de mantener la temperatura interna dentro de límites aceptables.
- Cerradura del gabinete.

La cantidad de gabinetes a utilizar y su ubicación depende de los siguientes factores:

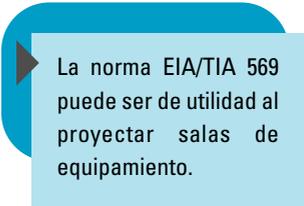
- El recorrido del cableado horizontal desde el gabinete al puesto de trabajo más alejado no puede superar, en ningún caso, los 90 metros. Si no es posible definir una ubicación de un gabinete

por piso que cumpla esta condición, se debe utilizar más de uno por piso.

- La cantidad máxima de puestos que pueden ser servidos por un gabinete debe estar en el orden de los 140/150. De lo contrario, queda muy poco lugar para el equipamiento.
- Si la cantidad de puestos es pequeña y las limitaciones de distancia lo permiten, se puede colocar un gabinete cada dos o más pisos. En este caso, se debe prever el paso de los cables UTP de un piso o otro.

Sala de equipamiento o red. Se define como el lugar en el edificio en donde se ubican equipos de telecomunicaciones, y las terminaciones mecánicas de una o más partes del cableado de telecomunicaciones. Se la llama sala de red dado que allí se ubica el router, la UPS, la central telefónica y los servidores de red.

El equipamiento contenido aquí es de mayor complejidad que el contenido en los gabinetes, por lo que es posible la existencia de varias salas de equipamiento en un edificio, una sola de las cuales será la sala de red.



La norma EIA/TIA 569 puede ser de utilidad al proyectar salas de equipamiento.

Administración del sistema de cableado. La administración del sistema de cableado incluye la documentación de los cables, terminaciones de éstos, cruzadas, paneles de patcheo, armarios o gabinetes de comunicaciones, y otros espacios ocupados por los sistemas de telecomunicaciones.

La documentación es un componente de máxima importancia para la operación y el mantenimiento de los sistemas de telecomunicaciones. Esta documentación puede ser totalmente sobre papel; pero, hoy en día, resulta mucho más aconsejable la utilización de sistemas basados en computadoras.

Resulta de máxima importancia disponer, en todo momento, de documentación actualizada y fácilmente actualizable, dada la gran

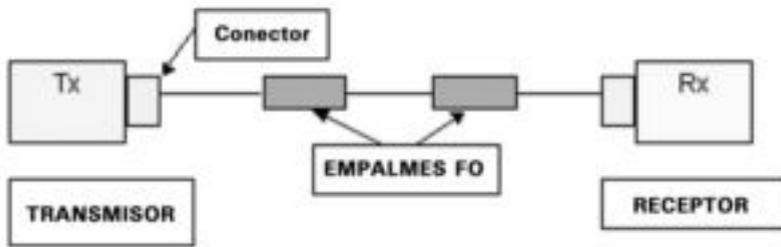
variabilidad de las instalaciones debidas a mudanzas, a incorporación de nuevos servicios, a expansión de los existentes, etc.

La norma EIA/TIA 606 proporciona una guía que puede ser de utilidad para la ejecución de la administración de los sistemas de cableado. Los principales fabricantes de equipamiento para cableado también disponen de software específico para administración.

A medida que integran contenidos referidos a fibra óptica y a enlaces optoelectrónicos, los alumnos van bosquejando una respuesta a su primera tarea: **Tomar una decisión respecto a la topología del enlace y determinar los elementos necesarios para su**

implementación.

Optan, entonces, por un enlace punto a punto cuya estructura y topología son:



2. CÁLCULOS DE ENLACE

Para abordar el cálculo del enlace, el profesor presenta a los alumnos las principales unidades de medida que se utilizan en el campo de las comunicaciones para indicar la relación entre potencias, tensiones o corrientes, en valores relativos o absolutos:

- db,
- dbm,
- dbu,
- dbmV,
- neper.

Unidades de medida de potencia

El db –decibel–. Es una unidad de medida relativa (pues no tiene un patrón de comparación) que indica la relación entre potencias, tensiones o corrientes entre dos valores conocidos.

Relación de ganancia en db:

$$\text{Relación de potencias } G \text{ (db)} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{Relación de tensiones } G \text{ (db)} = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{Relación de corrientes } G \text{ (db)} = 20 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$$

Relación de pérdida en db:

$$\text{Relación de potencias: } P \text{ (db)} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{Relación de tensiones: } V \text{ (db)} = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{Relación de corrientes: } I \text{ (db)} = 20 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$$

El dbm. Es una unidad de nivel absoluto que mide la potencia (de salida o de entrada según corresponda, para un circuito amplificador o atenuador), respecto de un valor fijo de 1 mW.

Cuando la comparación se efectúa respecto de valores de potencia por debajo de 1 mW, el resultado es siempre negativo.

$$\text{dbm} = 10 \log_{10} \frac{P_1 \text{ (mW)}}{1 \text{ mW}}$$

En algunos casos donde se usan potencias mayores, se toma como valor fijo 1 watt; en ese caso la unidad se denomina dbW.

El dbu. Es una unidad de nivel absoluto usada para comparar tensiones respecto de un valor fijo de 0,775 volt.

Esta unidad es muy usada en telefonía y el valor de 0,775 volt es un valor que resulta cuando, sobre una impedancia de 600 ohm, se aplica una potencia de 1 mW.

$$\text{dbu} = 20 \log_{10} \frac{V_i (\text{V})}{0,775 \text{ V}}$$

Relación entre el dbm y el dbu:

$$\text{dbm} = 10 \log_{10} \frac{P_i (\text{mW})}{1 \text{ mW}} \Rightarrow 10 \log_{10} \frac{V^2 / Z}{(0,775)^2 / 600 \Omega}$$

P_i (mW) es igual al cociente entre la tensión al cuadrado sobre la impedancia (de la ley de Ohm). En el denominador tenemos que 1 miliwatt es igual al cociente de una tensión de 0,775 volt al cuadrado, sobre una impedancia de 600 ohm.

Operando convenientemente:

$$\text{dbu} = 20 \log_{10} \frac{V_i (\text{V})}{0,775 \text{ V}} + 10 \log_{10} \frac{600 \Omega}{Z}$$

$$\text{dbm} = \text{dbu} + \text{Factor de corrección}$$

El factor de corrección es distinto de cero, cuando la impedancia Z, es distinta del valor patron de 600 Ω .

El dbmV. Es una unidad de nivel absoluto, usada para comparar tensiones respecto de un valor fijo de 1 mV.

$$\text{dbmV} = 20 \log_{10} \frac{V_i \text{ mV}}{1 \text{ mV}}$$

El neper (N). Es una unidad relativa usada como alternativa del db.

La diferencia con éste, radica en que la base de los logaritmos usados es el número e, en lugar de la base 10.

$$N = \frac{1}{2} \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Relaciones entre neper y db:

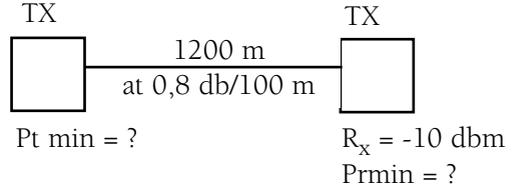
$$1 \text{ neper} = 8,686 \text{ db}$$

$$1 \text{ db} = 0,115 \text{ neper}$$

El profesor plantea a los alumnos algunos ejemplos sencillos de aplicación de estas unidades de medida.

Ejemplo 1. Dado un canal de transmisión de datos coáxil con una atenuación a la frecuencia de operación de 0,8 db/100 metros y en el que la sensibilidad del receptor es -10 dbm:

- calcular la potencia mínima que deberá tener el transmisor, si la longitud del coáxil es de 1200 metros;
- indicar cuál es la potencia mínima del receptor, en miliwatt.



$$-10 \text{ dbm} = 10 \log \frac{P_{rmin}}{1 \text{ mW}}$$

$$-1 \text{ dbm} = \log \frac{P_{rmin}}{1 \text{ mW}}$$

$$\text{invlog} (-1) = \frac{P_{rmin}}{1 \text{ mW}}$$

$$0,1 \cdot 1 \text{ mW} = P_{rmin}$$

$$P_{rmin} = 0,1 \text{ mW}$$

$$P_{R_x} = P_{t_x} - \text{Pérdidas} - \text{FD} - \text{Atenuación} + \text{Ganancia}$$

$$P_{t_x} = P_{R_x} + \text{Pérdidas} + \text{FD} + \text{Atenuación} - \text{Ganancia}$$

$$\text{Atenuación (at)} = 1200 \text{ m} \times \frac{0,8 \text{ db}}{100 \text{ m}}$$

$at = 9,6 \text{ db}$

$P_t \text{ min} = -10 \text{ dbm} + 9,6 \text{ db}$

$P_t \text{ min} = -0,4 \text{ dbm}$

Si se pasa $-0,4 \text{ dbm}$ a $\text{mW} \rightarrow$
 $\text{dbm} = 10 \log$

$-0,4 \text{ dbm} = 10 \log \frac{P_i}{1 \text{ mW}}$

$\frac{\text{invlog}(-0,04)}{1} = P_i$

$0,912 \text{ mW} = P_i$

$At \text{ FO} = 1,6 \text{ db/km}$

$At \text{ Co} = 0,6 \text{ db c/u}$

$FD = 10 \text{ db}$

$P_{R_x} = P_{t_x} - \text{Pérdidas} - FD - \text{Atenuación} + \text{Ganancia}$

$P_{R_x} = P_{t_x} - \text{Pérdidas} - FD - \text{Atenuación} + \text{Ganancia}$
 $-55 \text{ dbm} = 3 \text{ dbm} - 10 \text{ db} - 1,6 \text{ db/km} \times d - 0,6 \text{ db}$
 $-55 \text{ dbm} - 3 \text{ dbm} + 10 \text{ db} + 0,6 \text{ db} = -1,6 \text{ db/km} \times d$

$-47,4 \text{ dbm} / -1,6 \text{ db} = d$

$29,62 \text{ km} = d$

Potencia disponible para el enlace = $P_t - S_{R_x}$
 Potencia disponible para el enlace = $3 \text{ dbm} + 55 \text{ dbm}$
 Potencia disponible para el enlace = **58 db**

Pérdidas fijas = $At \text{ Co} \times 2 + FD$

Pérdidas fijas = $1,2 + 10$

Pérdidas fijas = **11,2 db**

Pérdidas posibles en la FO = $58 \text{ db} - 11,2 \text{ db}$

Pérdidas posibles en la FO = **46,8 db**

Alcance Fo = $\frac{1,8 \text{ db}}{1 \text{ db/km}}$

Alcance Fo = **1,8 km**

Para FO de $0,2 \text{ db/km} \rightarrow$

Alcance FO = $\frac{1,8 \text{ db}}{0,2 \text{ db/km}}$

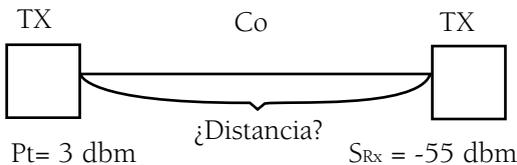
Alcance FO = **9 km**

Ejemplo 2. Dado un enlace de fibra óptica -FO- entre un emisor y un receptor con los siguientes parámetros:

- atenuación de la fibra óptica = $1,6 \text{ db/km}$,
- atenuación del conector = $0,6 \text{ db}$,
- potencia de transmisión = 3 dbm ,
- sensibilidad del receptor = -55 dbm ,

calcular la distancia máxima entre receptor y transmisor, suponiendo un factor de diseño $FD = 10 \text{ db}$ (margen de diseño), empleándose un conector en el transmisor y otro en el receptor.

Repetir el cálculo para una fibra óptica cuya atenuación es de $0,2 \text{ db/km}$.



Datos del enlace optoelectrónico

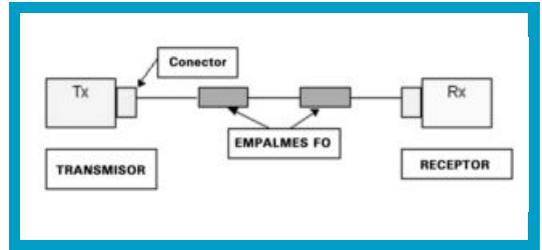
A los alumnos ya les resulta posible abarcar la segunda tarea derivada del problema planteado:

- Cálculo del enlace y determinación de su alcance máximo, suponiendo una fibra óptica multimodo 62,5/125 micrómetros de atenuación igual a 0.2 db/km. La fibra óptica se suministra en bobinas de 2 km de longitud.

- 1. Fibra óptica multimodo:** 50/125 μm .
Que opera en 850/1300 nm.
La atenuación típica es de 2 db/km.
El ancho de banda correspondiente es 500 MHz . km.
Se empleará un cable de 4 fibras (2 en servicio y 2 de *back-up*).
- 2. Bobinas de cable de fibra óptica:**
Cada bobina tiene 24 km.
- 3. Transmisor:** ILD –diodo de inyección láser–.
Potencia: 7 dbm (5 mW).
- 4. Receptor:** Diodo Pin.
Sensibilidad: 15 dbm.
- 5. Conectores:**
Atenuación: 0,5 db.
- 6. Empalmes:**
Atenuación: 0,5 db.
- 7. Factor de diseño¹¹:** 2 db

¹¹Se define como factor de diseño a la pérdida "ficticia" que se debe introducir en el cálculo del enlace para "absorber" futuras pérdidas por envejecimiento de los componentes activos, aumento de la pérdida en empalmes o conectores, cambio de elementos, etc.

Retomemos la topología propuesta por los alumnos:



Margen de enlace. Primero debemos hallar el **margen de enlace** (potencia disponible que surge de la diferencia entre la potencia de transmisión menos la sensibilidad del receptor).

$$\text{Margen del enlace} = P_t - \text{Pérdidas fijas} - S_{R_x}$$

Donde:

- P_t = Potencia transmitida por el láser a la línea 0 7 db.

Pérdidas fijas. Son aquellas que no dependen de la longitud del enlace.

En consecuencia:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas fijas} &= \text{Pérdidas (Conectores)} \\ &+ \text{Pérdidas (Factor de diseño)} \end{aligned}$$

$$\text{Pérdidas fijas} = 2 \cdot 0,5 + 2$$

$$\text{Pérdidas fijas} = 3 \text{ db}$$

Margen del enlace (ME) es la potencia que se puede "perder" en los empalmes y por atenuación de la fibra óptica:

$$\text{ME} = P_t - S_{R_x} - \text{Pérdidas fijas}$$

Donde:

- SRx = Sensibilidad del receptor.

$$ME = 7 \text{ dbm} + 15 \text{ dbm} - 3 \text{ db}$$

$$ME = 19 \text{ db}$$

En el enlace de fibra, entre la atenuación de la fibra óptica y los empalmes pueden perderse 19 db.

El profesor plantea a los alumnos:

- Pero, ¿cómo calculamos la cantidad de empalmes, si no conocemos el alcance del enlace?

Cálculo de empalmes. Los alumnos saben que, cada 2000 metros, es necesario colocar un empalme cuyas atenuaciones son de 0,5 db. En consecuencia, calculan una atenuación que sea la combinación de la atenuación de la fibra óptica más la parte proporcional del empalme.

$$\text{Atenuación de la fibra óptica + empalme} = 2 \text{ db/km} + 0,5/2 \text{ db/km}$$

$$\text{Atenuación de la fibra óptica + empalme} = 2,250 \text{ db/km}$$

$$\text{Alcance máximo del enlace} = \text{ME} / \text{Atenuación de la fibra óptica + empalme}$$

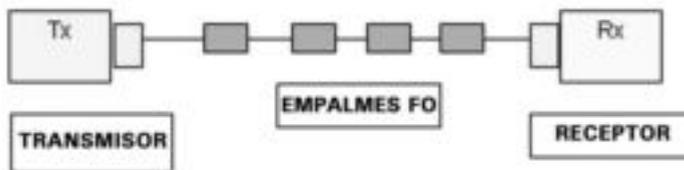
$$\text{Alcance máximo del enlace} = 19 \text{ db} / 2,25 \text{ db/km}$$

$$\text{Alcance máximo del enlace} = 8,44 \text{ km}$$

En consecuencia: Si el enlace tiene 8,44 km se necesitan 4 empalmes.

Los alumnos rediseñan el enlace con cuatro empalmes. Recuerdan que cada empalme introduce una atenuación de 0,5 db.

Por otro lado, analizan que la existencia de los empalmes es inevitable, debido a la longitud de las bobinas del cable de fibra óptica que tienen una longitud máxima de 2 km.



3. TASA DE INFORMACIÓN DE UNA FUENTE DE DATOS

Para seguir avanzando en la resolución del problema con la determinación de la tasa de transmisión de la fuente de información (transmisión de TV), el profesor plantea los conceptos fundamentales de la *Teoría de la Información* a su grupo.

Una información es un conjunto de datos que nos permiten aclarar algo sobre aquello que nos es desconocido; porque, cuando se sabe que un hecho va a ocurrir, no contiene información alguna.

Un suceso, por lo tanto, contendrá mayor cantidad de información, cuanto menor sea su probabilidad de ocurrencia.

Unidades de medida de la información

$$I(a) = \log \frac{1}{P(a)} \text{ Unidades de información}$$

La elección de la base del logaritmo que interviene en la definición de la cantidad de información, implica determinar la unidad con que se medirá dicho parámetro.

$$I(a) = \log_2 \frac{1}{P(a)} \quad (\text{Shannon})$$

$$I(a) = \log_e \frac{1}{P(a)} \quad (\text{Nat})$$

$$I(a) = \log_{10} \frac{1}{P(a)} \quad (\text{Hartley})$$

Las relaciones entre las diferentes unidades mencionadas son:

$$1 \text{ Hartley} = 3,32 \text{ Shannon}$$

$$1 \text{ Nat} = 1,44 \text{ Shannon}$$

$$1 \text{ Hartley} = 2,30 \text{ Nat}$$

Para saber si hay o no información en un dígito binario, una regla empírica es determinar si suprimiéndolo se altera la información transmitida.

- Contiene información: Forma códigos, representa letras, números y símbolos especiales.
- No contiene información: Indica paridad para detección de errores, bits de sincronismo para principio y fin de transmisiones asincrónicas.

El profesor de "Tecnología de las comunicaciones" propone a sus alumnos considerar dos ejemplos:

a. Cálculo de la información entregada por una letra entre 32 equiprobables.

Suponemos que tenemos una fuente de información que tiene 32 símbolos equiprobables y extraemos de la fuente un símbolo (una letra):

$$I = \log_2 \frac{1}{1/32}$$

$$I = 5 \text{ bits}$$

b. Suponiendo una imagen de 600 líneas horizontales y 300 puntos discretos por línea, donde cada punto tiene 8 niveles equiprobables de brillo y un vocabulario de 100.000 palabras equiprobables, demostrar el proverbio que dice: "Una imagen vale más que 1000 palabras".

$$\text{Puntos} = 600 \times 300$$

$$\text{Puntos} = 180.000$$

$$I = 180.000 \cdot 3 \text{ bits}$$

$$I = 540.000 \text{ bits}$$

$$I(\text{palabra}) = \log_2 \frac{1}{1/100.000}$$

$$I(\text{palabra}) = 16,67 \text{ bits}$$

$$I(1000 \text{ palabras}) = 16.670 \text{ bits} \ll 540.000 \text{ bits (imagen)}$$

Entropía de una fuente de información

Definimos como entropía de una fuente de memoria nula H , a la expresión siguiente:

$$H = - \sum_{k=1}^n p(x_k) \log_2 p(x_k) \text{ Shannon/símbolo}$$

La entropía H , representa la "incertidumbre media" en la ocurrencia de cada símbolo.

El profesor plantea:

Dados tres mensajes con la siguiente probabilidad de ocurrencia:

$$p_1 = 20 \%$$

$$p_2 = 50 \%$$

$$p_3 = 30 \%$$

- Calcular la cantidad de información suministrada por cada uno de ellos.
- Expresar la respuesta en nat y en shannon.
- Calcular la información promedio por mensaje de esta fuente.

$$I(m_1) = \log_2 1/0,2$$

$$I(m_1) = 2,32 \text{ bits}$$

$$I(m_1) = 1,6 \text{ nat}$$

$$I(m_2) = \log_2 1/0,5$$

$$I(m_2) = 1 \text{ bit}$$

$$I(m_2) = 0,69 \text{ nat}$$

$$I(m_3) = \log_2 1/0,3$$

$$I(m_3) = 1,74 \text{ bits}$$

$$I(m_3) = 1,2 \text{ nat}$$

$$H = I(m_1) \times P_{m1} + I(m_2) \times P_{m2} + I(m_3) \times P_{m3}$$

$$H = 2,32 \times 2/10 + 1 \times 5/10 + 1,74 \times 3/10$$

$$H = 0,464 + 0,5 + 0,522$$

$$H = 1,486 \text{ bits/símbolo (shannon/símbolo)}$$

Son características de la entropía:

- **Continuidad.** Pequeños cambios en la probabilidad del evento implican pequeños cambios en la cantidad de información y, por ende, de la entropía.
- **Simetría.** El orden en que se presentan los eventos no altera la entropía del sistema.
- **Aditividad.** Para un mismo sistema, las entropías son aditivas.
- **Maximidad.** Si los símbolos que genera la fuente de memoria nula son equiprobables, la entropía es máxima.

Podemos afirmar que, para una fuente discreta cuyos símbolos son estadísticamente independientes, la expresión de la entropía

permite describir la fuente en términos de la información promedio producida por ella.

Cabe señalar que la probabilidad de cada símbolo es $1/x$, cuando la entropía es máxima.

Se puede tener el caso de que varias entropías sean iguales, pero una más rápida (entrega más símbolos por unidad de tiempo) que otra.

Tasa de información de una fuente

Se define como el cociente entre la entropía de la fuente respecto de la duración promedio de los símbolos que ésta envía. Nos brinda la cantidad de información producida por una fuente, en un determinado tiempo:

$T = \frac{H(x)}{\tau}$	[Shannon por segundos]
	[Bits por segundos -bps-]

Donde:

- τ = Duración promedio de los símbolos (se mide en segundos/símbolo).

$T = V_m \cdot H(x)$

Donde:

- V_m = Velocidad de modulación.
- $V_m = 1/\tau$. Es la inversa del ancho de pulso = símbolo.

La velocidad de modulación es medida en baudios.

Un ejemplo: Tenemos que calcular la tasa de información T [bits/segundos] de una fuente telegráfica, sabiendo que:

$P_{\text{punto}} = 2/3$ $P_{\text{raya}} = 1/3$
 $T_{\text{punto}} = 0,2 \text{ segundos}$ $T_{\text{raya}} = 0,4 \text{ s}$

Donde:

- P = Probabilidad.
- T = Duración.

$$T = H / \tau$$

$$\tau p = 0,2 \times 2/3 + 0,4 \times 1/3$$

$$\tau p = 0,266 \text{ segundos}$$

$$H = 2/3 \log_2 3/2 + 1/3 \log_2 3$$

$$H = 0,386 \quad + \quad 0,53$$

$$H = 0,916 \text{ bits.}$$

Entonces:

$$T = 0,916 / 0,266 \text{ (bits/s)}$$

$$T = 3,44 \text{ bps}$$

Otro ejemplo: Se transmite una imagen de 250 líneas horizontales y 150 puntos por línea. Si cada punto tiene 64 niveles equiprobables de brillo, calculemos la información de la imagen y el tiempo total de transmisión si se utiliza un canal que permite enviar información a razón de 1000 shannon/segundos.

$$\text{Cantidad de puntos} = 250 \times 150$$

$$\text{Cantidad de puntos} = 37.500 \text{ puntos}$$

Bits por punto: 6 bits

$$I(\text{imagen}) = 37.500 \times 6$$

$$I(\text{imagen}) = 775.000 \text{ bits}$$

$$\text{Tiempo de transmisión} = 225.000 \text{ bits} / 1 \text{ kbps}$$

$$\text{Tiempo de transmisión} = 225 \text{ segundos}$$

Una vez que el profesor explica los conceptos de medida de la información, entropía y tasa de información, los alumnos comienzan la resolución de la tercera parte del problema: **Determinación de la tasa de transmisión de la fuente de información (transmisión de TV).**

Datos de la fuente:

- Cuadros de 800 x 600 líneas.
- Imágenes conformadas por 25 cuadros por segundo.
- Píxel con 32 posibles niveles de grises.

La solución que elabora el grupo es:

1. Cantidad de información de un cuadro
= 800 x 600 x 5

Cantidad de información de un cuadro
= 2.400.000 bits/ cuadro

2. Tasa de información de una imagen sin comprimir = 2.400.000 bits/cuadro
X 25 cuadro/segundos

Tasa de información de una imagen sin comprimir = 60.000.000 bits/segundos

Tasa de información de una imagen sin comprimir = 60 Mbps

4. MEDIDAS DE LA COMPRESIÓN DE DATOS

Los alumnos encaran, ahora, el cálculo de la tasa de transmisión mínima necesaria luego de una compresión de datos.

Los sistemas de compresión de datos permiten reducir el volumen de datos y, por consiguiente, disminuyen las necesidades de almacenamiento en discos y abaratan las transmisiones. Así, se logra transferir mayor cantidad de información en tiempos sustancialmente menores, sin necesidad de aumentar el ancho de banda de los canales de comunicación.

La **compresión de datos** posibilita, entonces, el aumento de la velocidad real de transferencia de datos, manteniendo constante tanto la velocidad de modulación como la velocidad de transmisión.

Se trata de técnicas lógicas o físicas que permiten reducir el tamaño de un conjunto de datos, sin alterar el significado de la información que contiene.

Dado un conjunto de datos, el **índice de compresión** - C - se puede definir como el número que resulta de dividir la longitud original de un conjunto de datos (medidos en bits o en bytes) por la longitud del mismo conjunto luego de haber sido comprimido.

Resulta, así, la expresión:

$$C = \frac{\text{Longitud original de un conjunto de datos}}{\text{Longitud comprimida del conjunto de datos}}$$

Como se puede apreciar, la longitud original del conjunto de datos a comprimir será siempre mayor que la de los datos ya comprimidos, por lo que el cociente será siempre mayor que uno.

$$C > 1$$

Este índice mide el grado de reducción del conjunto original de datos, obtenido como resultado de la compresión.

Por supuesto, si C fuera igual a 1, no habría compresión alguna. También es fácil observar que cuanto mayor sea este índice, más efectivo es el método de compresión utilizado.

Una vez analizado este concepto, los alumnos realizan el cálculo de la tasa de información final según el índice de compresión dado en el problema.

Índice de compresión $C = 4$

Solución:

Tasa final luego de compresión = $60/4$

Tasa final luego de compresión = 15 Mbps

5. CAPACIDAD DE UN CANAL CON RUIDO

Una vez calculada la tasa de información mínima necesaria en el enlace luego de la compresión de datos, el profesor plantea a los alumnos la necesidad de evaluar la capacidad de un canal con y sin ruido.

Características de un canal de información

El estudio del canal de información se ocupa de evaluar y de permitir administrar adecuadamente los recursos del canal físico, usando como criterio de eficiencia la velocidad de transmisión de la información y la calidad con la que ésta es transportada. Su objetivo fundamental es preservar la integridad de la información mediante el uso de medios de codificación adecuados y la introducción del concepto de transmisión con redundancia, para la detección y corrección de errores.

Canal continuo. El concepto de canal continuo sirve para introducir la forma en que trabaja lo que denominaremos un canal real. Un canal continuo puede definirse como un canal de comunicaciones que, al recibir en la entrada una señal continua, reproduce en su salida una réplica de la misma señal.

Los canales reales logran este objetivo sólo aproximadamente, pues el

Obsérvese que, en el caso de una señal digital, la deformación tiene un sentido diferente: o bien es posible detectar un pulso, o éste directamente es ignorado en la recepción.

ruido —que tiene características aditivas respecto a la señal útil y que puede ser del tipo gaussiano o impulsivo— modifica la forma de onda de la señal de entrada.

El Teorema de Nyquist permite determinar la cantidad de información que es posible enviar a través de un canal de comunicaciones sin ruido (canal ideal) y de ancho de banda finito de valor Δf .

Para señales binarias, sabemos que la máxima velocidad de transmisión de datos en un canal sin ruido es igual a:

$$V_{t\max} = 2\Delta f \quad [\text{bps}]$$

Donde:

- $V_{t\max}$ = Velocidad de transmisión de datos máxima con señales binarias.
- Δf = Ancho de banda del canal de transmisión.

Además, si la señal es del tipo multinivel, la expresión anterior se transforma en:

$$V_{t\max} = 2\Delta f \log_2 n$$

$$V_{t \max} = V_{t \max} \log_2 n$$

Donde:

- $V_{t \max}$ = Velocidad de transmisión de datos máxima con señales multinivel.
- n = Número de niveles de la señal.

Precisamente de estas expresiones surge el concepto de capacidad de un canal.

Capacidad de un canal de información

La capacidad de un canal está relacionada con la velocidad de transmisión máxima; por lo tanto, la definimos como la máxima velocidad de transmisión de datos que se puede alcanzar en un canal -expresándola en bps-.

$$C = V_{t \max}$$

Donde:

- C = Capacidad de un canal [bps].
- $V_{t \max}$ = Velocidad de transmisión de datos máxima.

Consideremos un ejemplo: Una imagen de TV tiene 625 líneas con 500 puntos por línea. Cada punto tiene 128 niveles equiprobables de brillo. Si se transmiten 25 imágenes por segundo, es posible calcular la cantidad de información y la capacidad que debería tener este canal de comunicaciones.

$$\text{Cantidad de puntos} = 625 \times 500$$

$$\text{Cantidad de puntos} = 312.500 \text{ puntos}$$

$$N = \log_2 128$$

$$N = 7 \text{ bits/punto}$$

$$\text{Imagen} = 312.500 \text{ puntos} \times 7 \text{ bits/punto}$$

$$\text{Imagen} = 2.187.500 \text{ bits}$$

$$\text{Capacidad del canal} = I (\text{Imagen}) \times 25 \text{ imágenes/segundo}$$

$$\text{Capacidad del canal} = 54,68 \text{ Mbps}$$

Velocidad de transmisión de datos máxima

En el caso de un canal ideal (sin ruido), el Teorema de Nyquist nos permite conocer que no se puede sobrepasar una velocidad de transmisión de datos máxima, que es función del ancho de banda Δf del canal de transmisión.

De esta forma, en los canales ideales, la capacidad máxima al transmitir señales binarias queda determinada exclusivamente por el ancho de banda.

En el caso de señales multinivel, la situación es distinta. La expresión nos muestra que la capacidad de un canal ideal se podría acrecentar indefinidamente (en teoría), solamente aumentando el número de niveles de la señal.

Analicemos, ahora, el caso de canales continuos con ruido y supongamos la presencia de ruido blanco o térmico.

La presencia de este tipo de ruido es característica de los **canales reales** de transmisión.

En todos los casos, el ruido presenta características de **aditividad**. Esto significa que se sumará siempre a la señal a transmitir, ya sea analógica o digital.

Como ya se dijo, en un **canal ideal** se podría aumentar el número de niveles tanto como se quisiera, ya que siempre sería posible distinguir un nivel del siguiente.

Pero, en el caso de un **canal real**, el aumento indefinido del número de niveles es imposible, pues éste queda limitado a la probabilidad de que se pueda distinguir un nivel **[n]** del nivel siguiente **[n + 1]**, sin que el detector cometa un error al decidirse por uno o por otro.

Precisamente, el número de niveles que es posible implementar estará limitado por el valor de una relación de fundamental importancia en el estudio de los canales de comunicación: la relación **señal/ruido**.

En efecto:

$$S/N = \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}}$$

El cociente S/N es un factor importante en todo sistema de comunicaciones porque cuantifica la medida en que la señal útil supera al ruido.

El **Teorema de Shannon-Hartley** se refiere a la capacidad de un canal real de comunicaciones continuo.

En 1948, Claude Shannon completó los estudios de Nyquist, ampliándolos a un canal sujeto a ruido térmico (aleatorio).

Analicemos, para una transmisión multinivel, la relación que existe entre el número de bps (medida de la velocidad de transmisión)

y el número de baudios (medida de la velocidad de modulación).

$$\text{Número de [bps]} = \text{Número de [baudios]} \log_2 n$$

Donde:

- n = Número de estados significativos de la señal.

Por ejemplo, si se transmite a 2400 baudios y se utilizan señales cuadrubits (16 niveles), se obtiene una velocidad de transmisión de 9600 bps.

Por otra parte, deducimos que la capacidad de un canal ideal, con señales multinivel, será igual a:

$$C = V_{\text{tmáx}} \log_2 n_{\text{máx}} \quad [\text{bps}]$$

En esta expresión se puede observar que el valor de n deberá ser, en este caso, el máximo valor que posibilite la relación señal/ruido. A este valor lo hemos denominado $n_{\text{máx}}$.

Como la velocidad de transmisión máxima es igual a:

$$V_{t \text{ máx}} = 2 \Delta f$$

La expresión queda de la siguiente manera:

$$C = 2 \Delta f \log_2 n_{\text{máx}} \quad [\text{bps}]$$

El número máximo de niveles está relacionado con la relación señal/ruido y, si aceptamos sin demostración que esa relación está dada por la expresión siguiente.

$$n_{\text{máx}} = (1 + S/N)^{1/2}$$

Si en esta expresión reemplazamos la fórmula correspondiente a la capacidad de un canal, tendremos:

$$C = 2 \Delta f \log_2 (1 + S/N)^{1/2} \quad [\text{bps}]$$

Y, simplificando, obtenemos:

$C = \Delta f \log_2 (1 + S/N) \quad [\text{bps}]$
--

Donde:

- S = Potencia media de la señal continua transmitida por el canal.
- N = Potencia media del ruido gaussiano.
- Δf = Ancho de banda del canal de comunicaciones.

Ésta es la expresión de la **Ley de Shannon-Hartley**, que determina la capacidad de un canal continuo que tiene un ancho de banda Δf y ruido gaussiano limitado en banda.

Consideremos, ahora, una aplicación. Dados los valores:

$$f = 3000 \text{ Hz}$$

$$S/N = 30 \text{ db}$$

calcular la capacidad del un canal C e indicar la tasa de información máxima admisible.

$$C = \Delta f \log_2 (1 + S/N)$$

$$C = 3000 \log_2 (1 + 1000)$$

$$C = 30 \text{ kbps}$$

El Teorema de Shannon-Hartley es de fundamental importancia para el análisis de los sistemas de comunicaciones. Tiene dos as-

pectos relevantes:

- Permite calcular la velocidad máxima de transmisión de datos en un canal con ruido (con distribución estadística de tipo gaussiano).
- Relaciona dos parámetros fundamentales en todo canal de comunicaciones: el ancho de banda, Δf , y la relación señal/ruido, **S/N**.

Se puede observar que la capacidad de un canal continuo depende del ancho de banda del medio físico empleado por el canal y del logaritmo en base dos de la relación señal/ruido.

Se puede, también, demostrar que la influencia de la variación de la relación señal/ruido tiene un efecto menor que el ancho de banda (en la determinación de la capacidad del canal), pues está relacionada a través de su logaritmo.

En la práctica, una relación de señal a ruido igual a cien significa que la señal útil debe superar cien veces a la potencia media de ruido.

El teorema de Shannon permite calcular la velocidad máxima teórica de transmisión; pero, en la práctica se están alcanzando valores que se podrían considerar **límites** de dicho teorema. Las posibilidades de obtener valores mayores en la capacidad de los canales telefónicos están dadas por el tipo de medios de comunicaciones empleados en la construcción de las redes de telecomunicaciones actuales. Estos medios tienen valores ligeramente superiores a los 3000 Hz de ancho de banda y relaciones señal/ruido muy buenas, en razón de una mejora en la calidad

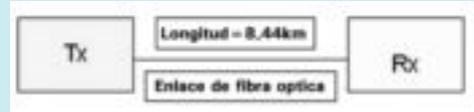
de los materiales que actualmente se usan en la construcción de las redes de cables de las empresas que proporcionan estos servicios.

El teorema de Shannon-Hartley expresa que un canal sin ruido (canal ideal con $N = 0$) tendrá una capacidad infinita; y, por otra parte, también se puede deducir que, si se incrementa el ancho de banda del canal, su capacidad aumentará.

En los canales reales (o sea, con ruido) existe un límite para incrementar la capacidad de transmisión, cuando se utiliza como variable de ajuste el aumento del ancho de banda. Ese límite se debe a que, cuando se incrementa el ancho de banda, también se incrementa la potencia de ruido, con lo cual disminuye nuevamente la capacidad del canal.

Ahora, los alumnos están en condiciones de resolver el quinto punto del problema mediante la aplicación del teorema de Shannon-Hartley para el cálculo de la capacidad máxima del enlace y su relación con la tasa de transmisión.

Ya disponen del enlace:



Ancho de banda de la fibra óptica = 500 MHz x km
Longitud del enlace: 8,44 km.

Y llegan a esta solución:

Para la distancia de 8,44 km, el ancho de banda es

Ancho de banda = 500 MHz . km/ 8,44 km
Ancho de banda = 59, 24 MHz

Para el cálculo de la capacidad máxima del canal toman, entonces, 59 MHz.

Ahora, aplican el Teorema de Shannon-Hartley y hallan la capacidad máxima que tendrá el enlace de fibra óptica para poder determinar cuántas transmisiones de TV pueden enviar simultáneamente por dicho canal:

$$C_{\max} = \Delta f \log_2 (1 + S/N)$$

Siendo:

- $\Delta f = 59.000.000$ Hz.
- $S/N = 40$ db.

O sea, $S/N = 10.000$

Por lo tanto, $C_{\max} = 59.000.000 \times \log_2 (1 + 10.000)$

Entonces, $C_{\max} = 786.675.207$ [bits/segundo]

O sea, aproximadamente, 786 [Mbps].

6. RELACIÓN ENTRE LA TASA DE INFORMACIÓN Y LA CAPACIDAD DE UN CANAL REAL CON RUIDO

Ahora, los alumnos van a determinar la cantidad máxima de transmisiones de TV –como las que ya han caracterizado– que se pueden enviar por esa línea física.

Para esto, el profesor hace una presentación relacionando los conceptos la capacidad de un canal y la tasa de información.

La capacidad de un canal “C” medida en bps, nos indica la cantidad de información que el canal puede transportar por unidad de tiempo.

Depende de la relación señal a ruido (S/N) y del ancho de banda, y es independiente de la tasa de información de la fuente.

La relación entre la tasa de información y la capacidad del canal está establecida a través de la tasa de error del sistema -BER-, de tal forma, que se puede establecer que: Si la tasa de información es mayor que la capacidad del canal, no es posible transmitir sin errores.

Los alumnos encaran, ahora, la resolución del sexto punto del problema planteado: Calculan la cantidad máxima de transmisiones de TV que se pueden enviar simultáneamente por el enlace calculado.

Datos:

Capacidad máxima del canal: 786 Mbps.

Tasa de Información de la fuente: 15 Mbps.

Solución:

Cada transmisión de TV requiere una tasa igual a 15 Mbps.

Los alumnos recuerdan que, siempre, la tasa de información debe ser menor o igual a la capacidad del canal de comunicaciones; es decir:

$$T \leq C_{\max}$$

En consecuencia:

Cantidad de transmisiones de TV = $786/15$

Cantidad de transmisiones de TV = 52.4

Es decir, la cantidad máxima de Tx de TV= 52 transmisiones de TV¹².

¹² Este cálculo es teórico, dado que no se ha considerado el requerimiento adicional de ancho de banda que el sistema de multiplexado pueda requerir para el transporte de las señales de TV en el enlace.

En síntesis

Para que los alumnos adquirieran competencias básicas para desarrollar este proyecto, debieron integrar conocimientos referidos a:

- Características principales de la fibra óptica y del enlace optoelectrónico.
- Unidades de medida de potencia (db y dbm) y cálculo de enlaces.
- Tasa de información de una fuente de datos.

- Medidas de la compresión de datos.
- Capacidad de un canal con ruido (teorema de Shannon-Hartley).
- Relación entre la tasa de información y la capacidad de un canal real con ruido.

Este proyecto tecnológico les ha permitido integrar los conocimientos fundamentales y las capacidades necesarias para encarar la resolución de problemas que involucran el cálculo de enlace y sus parámetros asociados.



MINISTERIO *de*
EDUCACIÓN
CIENCIA y TECNOLOGÍA
PRESIDENCIA *de la* NACIÓN



Argentina

inet
Instituto Nacional de
Educación Tecnológica