

01170

6



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“CARACTERIZACIÓN DE UNA RED LOCAL
PARA VIDEOCONFERENCIAS
CON FIBRA ÓPTICA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN INGENIERÍA
(ELÉCTRICA)**

PRESENTA

IRAZÚ MUÑIZ CASTAÑEDA

DIRECTOR: M. EN I. VLADIMIR A. SVIRID KUZMENKO



Ciudad Universitaria

Febrero, 2001

65



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

R E S U M E N

Título:

Caracterización de una red local para videoconferencias con fibra óptica.

Autor:

Irazú Muñiz Castañeda

En el presente trabajo de investigación se analizan dos tipos de videoconferencia, la de escritorio y la sala interconstruida, así como la forma de conectarlas a la red que se extiende por Ciudad Universitaria, utilizando un enlace de fibra óptica para enviar y recibir información multimedia de banda ancha.

Asimismo, esta tesis se refiere a la Internet, la Mbone y la Red Nacional de Videoconferencia como los modos de conferencia que permiten realizar sesiones entre dos o más usuarios, tanto a nivel nacional como internacional, con fines académicos y de experimentación técnica.

También se examinan las características físicas y funcionales de los dispositivos que integran un sistema de comunicación óptico, para de esta forma realizar el cálculo del enlace óptico que une la sede de cada sistema de videoconferencia con la red que corresponde a su modo de transmisión.

Los resultados que se obtienen en esta tesis serán el punto de partida para la implantación del sistema de videoconferencia en el edificio Luis Valdés Vallejo, específicamente en el Departamento de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la UNAM por darme la oportunidad de ser su alumna, por la excelente formación académica brindada, por sus espacios, jardines, recintos culturales, por todo lo que la hace ser tan valiosa, porque en ella descubrí el amplio mundo del conocimiento y comprendí que el estudio no es un deber sino un placer.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

Con cariño y admiración a mis profesores de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por su compromiso personal y profesional, por los conocimientos transmitidos y especialmente, por su gran calidad humana. Agradezco al Dr. Francisco García Ugalde su motivación e interés por mi trabajo. A todos ellos mi más profundo agradecimiento por sus enseñanzas y el tiempo dedicado.

A mi director de tesis por su amplia disposición y entrega a lo largo de dos años de trabajo; por darme su tiempo, espacio y compromiso dentro de sus múltiples actividades. Realmente valoro su esfuerzo y sus conocimientos aportados. Gracias por su asesoría.

A mis sinodales, el Dr. Víctor García Garduño, el Dr. Salvador Landeros Ayala, el Dr. Oleksandr Martynyuk y el Dr. Carlos Rivera Rivera, por revisar mi trabajo y, en su caso, hacer observaciones y aportaciones al mismo.

A todas las personas que me proporcionaron información técnica indispensable, al personal administrativo de la División y de la Biblioteca, éstos últimos siempre muy atentos y afables, así como a todos aquéllos que me permitieron emplear sus recursos para realizar pruebas y llevar a buen término el desarrollo de esta tesis.

A los compañeros y amigos con los que conviví durante mi estancia en esta Universidad; de ellos me llevo muchas anécdotas, experiencias y recuerdos muy gratos. A ti Paty, por tu amistad, compañía y espacio, sobre todo por tu constante apoyo para realizar este trabajo. No podías faltar tú Beto, por tu excepcional cariño, compañía y solidaridad.

A ti madre, por tu invaluable apoyo, confianza y ánimo para que todo saliera adelante. No hay suficientes palabras para expresarte todo mi amor y agradecimiento. Puedes estar segura de que sin ti, esto no hubiera sido posible.

Y a mi familia por supuesto: a mi hermana, mis tíos y tías, primos y primas, a ellos también gracias por su interés, amor y confianza.

Abuelita Vicky, te dedico mi trabajo en reconocimiento al gran esfuerzo que realizaste para que tus nietos tuvieran educación y una mejor calidad de vida. También te agradezco infinitamente el amor y los cuidados que desde niña me prodigaste, los cuales, aun en tu ausencia y con el paso del tiempo, no olvido y tanto añoro.

Mamá, siempre has estado junto a tus dos hijas para cuidar de ellas, amarlas y darles lo mejor de ti. Sabes que tu labor no ha sido en vano y ahora con orgullo cosechas los frutos de tu esfuerzo. Este trabajo es en tu honor, gracias por tu apoyo. Pero antes escucha lo que te digo: ¡Te felicito Martha, lo has hecho muy bien!

Igualmente importante eres tú Tabatha, parte fundamental en mi vida; eres la hermana que tanto quiero y admiro. Este trabajo también va por ti, gracias por tu amplia disposición a ayudarme y por el ánimo que siempre tuviste a bien darme.

Sinceramente, Irazú.

C O N T E N I D O

RESUMEN	1
CONTENIDO	2
I. INTRODUCCIÓN	5
I.I Descripción del problema	
I.II Objetivos	
I.III Antecedentes	
I.IV Organización del texto	
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA VIDEOCONFERENCIA Y SUS RECOMENDACIONES DE INTEROPERABILIDAD	9
<hr/>	
1.1 LA VIDEOCONFERENCIA	9
1.1.1 Definición, tipos y elementos esenciales de un sistema de videoconferencia	9
1.1.2 Información multimedia manipulada en una videoconferencia	11
1.1.3 Canales de comunicación y modos de conferencia	11
1.1.4 Medios de transmisión de banda ancha	14
1.1.5 Estructura y características de Red UNAM	15
1.2 RECOMENDACIONES DE INTEROPERABILIDAD PARA EQUIPO DE VIDEOCONFERENCIA	17
1.2.1 Serie H.32X de la ITU-T y recomendaciones complementarias	17
1.2.2 Recomendación H.323 de la ITU-T	18
1.2.3 Descripción de los estándares de control, video, audio, datos y señalización	20
1.2.4 Entidades de un sistema H.323	22
1.2.5 Tipos de conferencia	26
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR EN UN ENLACE ÓPTICO	27
<hr/>	
2.1 TRANSMISOR ÓPTICO	27
2.1.1 Tipo de fuentes ópticas	28
2.1.2 Potencia emitida	31
2.1.3 Diagrama de radiación	32
2.1.4 Espectro de radiación	32
2.1.5 Relación voltaje-corriente (V-I)	33
2.1.6 Relación corriente - potencia óptica emitida	33
2.1.7 Velocidad de modulación (tiempo de subida)	34
2.1.8 Circuitos de modulación. Estabilización de la potencia	35

2.2 RECEPTOR ÓPTICO	36
2.2.1 Tipo de fotodetectores	37
2.2.2 Sensibilidad del fotodetector	38
2.2.3 Tiempo de respuesta	38
2.2.4 Corriente de oscuridad	40
2.2.5 Tipos de preamplificador	41
2.2.6 Respuesta en frecuencia	41
2.2.7 Ruido en la recepción	43
2.2.8 Tasa de errores y umbral de detección para un sistema digital	45

CAPÍTULO 3. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CON FIBRA ÓPTICA **48**

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA	48
3.1.1 Estructura de la fibra óptica y ventajas potenciales de su uso	48
3.1.2 Teoría de reflexión y refracción de la luz	49
3.1.3 Propagación de la luz y apertura numérica de la fibra óptica	50
3.1.4 Modos de propagación, acoplamiento de modos y distancia de equilibrio	52
3.1.5 Frecuencia normalizada	53
3.1.6 Tipos de fibras ópticas	54
3.1.7 Atenuación y pérdidas en una fibra óptica	56
3.1.8 Ventanas de transmisión de bajas pérdidas	58
3.1.9 Definición de dispersión y factores que la generan	59
3.1.10 Reducción de la dispersión en una fibra óptica	61
3.2 PRINCIPIOS DEL CÁLCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA	63
3.2.1 Selección de los dispositivos ópticos	63
3.2.2 Análisis del ancho de banda del sistema	64
3.2.3 Análisis energético y umbral de detección	66
3.2.4 Cálculo total para un enlace con múltiples secciones	67

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE VIDEOCONFERENCIA CON FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN **69**

4.1 ANÁLISIS DE UNA RED DE DATOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA	69
4.1.1 Estructura y funcionamiento de la red del edificio Luis Valdés Vallejo	69
4.1.2 Características del nodo en IIMAS	70
4.2 SISTEMAS DE VIDEOCONFERENCIA Y MODOS DE TRANSMISIÓN FACTIBLES EN EL DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES	71
4.2.1 LAN de videoconferencia por Internet	73
4.2.2 LAN de videoconferencia por Mbone (Multicast Backbone)	76
4.2.3 Sistema interconstruido de videoconferencia por la RNVC	78

4.3 CÁLCULO DEL ENLACE ÓPTICO	81
4.3.1 Enlace para la videoconferencia	81
4.3.2 Enlace para una cámara remota	84
4.4 SESIONES DE VIDEOCONFERENCIA DE PRUEBA	87
4.4.1 Desempeño de la sesión	90
4.5 CONCLUSIONES	92
II. BIBLIOGRAFÍA	97

I. INTRODUCCIÓN

I.I DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La creciente necesidad de estar en contacto con otras instituciones académicas del país y del extranjero, para intercambiar información, promover la educación a distancia y la participación conjunta en proyectos de interés común, exige que la Facultad de Ingeniería adopte el uso de la videoconferencia como una herramienta de comunicación completa que manipule datos, audio y video de forma simultánea.

Lo anterior, aunado al especial interés que ha puesto la UNAM para impulsar tres funciones que considera básicas: la docencia, la investigación y la divulgación científica, invita a hacer un profundo estudio que permita implantar un sistema de videoconferencia en el Departamento de Ingeniería de Telecomunicaciones, con fines educativos y de análisis técnico, siempre considerando los recursos disponibles y explotando las oportunidades que ofrece la Red de Ciudad Universitaria.

I.II OBJETIVOS

La propuesta de esta tesis persigue los siguientes objetivos:

- Analizar los sistemas de videoconferencia actuales, sus características técnicas básicas y elementos que los conforman, así como los estándares que rigen su funcionamiento en distintos tipos de redes de comunicación.
- Estudiar la estructura y particularidades de Red UNAM, sobre todo los servicios que ofrece y las posibles formas de conectar un sistema de videoconferencia a esta red para transferir información multimedia de banda ancha.
- Describir física y funcionalmente los elementos que conforman un enlace óptico, así como los parámetros que se deben tomar en cuenta para diseñar un sistema de comunicación con fibra óptica. Realizar pruebas y observar su comportamiento en condiciones reales de trabajo, hacer cálculos de atenuación y dispersión en la fibra óptica, examinar el tipo de conexión empleado y las características del enlace.
- Implantar un sistema de videoconferencia en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, para:
 - Promover cursos, clases, conferencias y seminarios que ofrece la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, e incorporar los que no estén disponibles, con universidades del país y del extranjero, la mayoría en condiciones de usar sistemas de videoconferencia.
 - Realizar programas que impulsen las reuniones virtuales entre investigadores, para compartir experiencias, adelantos y resultados en diversas áreas científicas, de manera efectiva y económica. Igualmente entre estudiantes, para discutir temas de interés común, solicitar asesoría externa, entrevistarse con expertos en ciertas áreas,

intercambiar información o cooperar en proyectos con otras universidades para el desarrollo de tesis.

- Incentivar el uso de la videoconferencia para discutir proyectos universidad-empresa, introducir a ciertas áreas de la ingeniería aplicada, establecer programas de capacitación o certificación e incrementar las oportunidades de relación con la industria.
- Ampliar su uso a otras áreas de la ingeniería para apoyar el trabajo en desarrollo. Presenciar eventos de trascendencia mundial y participar activamente en ellos.

I.III ANTECEDENTES

Hubo un tiempo en que el correo electrónico era la aplicación más novedosa de Internet y causaba maravilla a propios y extraños. Ahora es asunto de todos los días y casi a nadie le sorprende, acostumbrados como estamos a los avances de la informática. Estos cambios han propiciado que el uso de la red sea cada vez más ambicioso, pocas personas se conforman con ver unas cuantas imágenes estáticas o grupos de caracteres desplegados en el monitor de la computadora. En nuestros días se requiere de un uso intensivo de la imagen, de ser posible en movimiento y en tiempo real. La respuesta a estos requerimientos es la videoconferencia.

Esta herramienta de comunicación representa el intercambio interactivo de información y tiene aplicaciones en campos diversos como el entretenimiento, la educación a distancia, la medicina y los negocios. Se vale de los adelantos en software, hardware, del ancho de banda de los medios de transmisión y de las recientes tecnologías de compresión de datos que manipulan la señal de banda ancha y la colocan en un canal digital de bastante capacidad.

Todo comenzó en 1948, cuando el invento del transistor se convirtió en el principal detonador que impulsó la transición de la electrónica hacia rumbos antes unimaginables. El primer precedente de su gran potencial se sentó catorce años después con la puesta en órbita del primer satélite artificial, suceso que además vino a ampliar las expectativas de las telecomunicaciones.

Posteriormente, en 1964, se presentó durante la Feria Universal de Nueva York un prototipo de videoteléfono que planteaba la posibilidad de una comunicación bidireccional, en tiempo real y entre personas alejadas geográficamente, de audio y video en movimiento. Sus raíces tecnológicas eran por supuesto el teléfono y la televisión, pero el único método posible que soportaba tal ancho de banda a largas distancias, era el satélite, aún en etapa de experimentación. Sin embargo, el costo del equipo, de las líneas de comunicación y del tiempo necesario para transmitir la información, excedía por mucho los beneficios que se obtenían al comunicar de manera interactiva a un grupo de personas.

En respuesta a esa creciente y previsible necesidad de ancho de banda, al empezar la década de los 70's se retomó la idea inicialmente planteada en 1884 por el físico irlandés John Tyndall, de utilizar la luz como soporte de comunicaciones fiables y de alta capacidad. El

empleo de la fibra óptica como medio de transmisión se volvió atractivo, sentando así las bases de la teoría óptica aplicada a las telecomunicaciones.

Se construyó entonces el diodo láser, la primera fuente coherente de luz capaz de operar de manera continua a temperatura ambiente, y el diodo electroluminiscente, mejor conocido como LED. Pero estas fuentes semiconductoras presentaban grandes inconvenientes, toda vez que tenían muy pocas horas de vida útil, eran demasiado voluminosas para poder acoplarlas al cable y operaban en una longitud de onda poco transparente para la fibra óptica. Años después se utilizaron otros materiales que permitieron la emisión fotónica en otras ventanas de atenuación y con hasta un millón de horas de vida útil.

Durante este tiempo la tecnología de las fibras experimentó también un progreso considerable, principalmente en su fabricación con menores niveles de atenuación, siempre en el empeño de conseguir sistemas capaces de transmitir más cantidad de información, a velocidades más elevadas, mayores distancias y a menor costo.

Por otro lado, los avances en la industria de la computación y de las telecomunicaciones, así como el interés por la visualización gráfica de la información, han permitido el desarrollo de mejores métodos de análisis y algoritmos de compresión, mayor capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento de la señal digital, al grado de poder manipular información multimedia de gran ancho de banda, con tasas de compresión mayores a 1600:1 (56 kbit/s). Se cuenta también con mejor equipo de comunicaciones, medios y protocolos de transmisión, además de que el sueño de comunicar al mundo entero es cada vez más una realidad gracias a la Internet.

La teleconferencia de forma genérica, y específicamente la videoconferencia, es un tema de gran trascendencia que promete cambiar el rumbo de las comunicaciones actuales.

Desde el punto de vista técnico, requiere de estándares que aseguren su interoperabilidad en distintos tipos de redes y regule sus características básicas; exige medios físicos con mayor ancho de banda y de equipo con capacidad para multidifundir video, además de que demanda un mayor desarrollo de las tecnologías de comunicación, para lograr sesiones interactivas, bidireccionales y en tiempo real.

Desde el punto de vista humano, estimula la docencia y la participación conjunta en seminarios, conferencias, cursos, áreas de investigación científicas y culturales. Amplía las posibilidades de interactuar con otras personas en sitios remotos, para compartir o adquirir información y colaborar en proyectos comunes; aumenta las habilidades de trabajo, discusión, pensamiento y aprendizaje. Y por si fuera poco, no sólo nos permite presenciar eventos de relevancia mundial, sino participar activamente en ellos, con sólo enlazarnos a la fuente de información. La educación a distancia es uno de los grandes beneficiarios de esta herramienta de comunicación.

Algunas de las actividades antes señaladas son, entre otras tantas, las funciones básicas de una institución académica como la Universidad Nacional Autónoma de México y más aún de la Facultad de Ingeniería, donde uno de los propósitos principales es sin duda, impulsar la investigación. Asimismo, la videoconferencia no sólo es una realidad en la Máxima Casa de Estudios, ésta también posee la red de datos más importante, y desde 1992, la red de videoconferencia académica más grande del país, ya que cuenta con un tendido de fibra óptica extendido por toda Ciudad Universitaria, que permite la implantación del sistema.

Tomando como punto de partida lo expuesto anteriormente, esta tesis analiza el tema de la videoconferencia con fibra óptica como medio guía y propone diferentes tipos de redes para realizar conferencias, con base en las posibilidades que ofrece Red UNAM y los recursos disponibles en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, para hacer de esta propuesta un proyecto factible.

LIV ORGANIZACIÓN DEL TEXTO

Esta tesis se divide en cuatro capítulos. El primero describe un sistema de videoconferencia y los elementos básicos que lo conforman. Introduce la serie de recomendaciones H.32X de la ITU-T sobre sistemas y terminales audiovisuales de banda ancha, poniendo especial atención en el estándar H.323 para redes con calidad de servicio no garantizada. Analiza también los requisitos de este sistema en cuanto a ancho de banda y examina la topología de la Red UNAM para determinar la forma de conexión y posibles tipos de transmisión.

Los siguientes dos capítulos establecen las bases teóricas del enlace óptico de alta capacidad que servirá como medio de transmisión. El capítulo dos analiza el principio de funcionamiento del transmisor y del receptor, es decir, de la fuente óptica y del fotodetector, así como la influencia que tienen ciertos parámetros en el desempeño del enlace total. El capítulo tres profundiza en las particularidades de la fibra óptica, en los fenómenos que aseguran la reflexión de la luz para que se propague por este medio y en sus principios de operación. Posteriormente se lleva al plano práctico la teoría sobre estos dispositivos, para diseñar un sistema de comunicación óptico y realizar los cálculos necesarios que determinen su ancho de banda, margen energético y tasa de bits en error.

En el cuarto y último capítulo se presentan los resultados a los que conduce el análisis de la red del edificio Luis Valdés Vallejo, para determinar el tipo de videoconferencia que se puede implantar, las ventajas y limitantes de cada propuesta y su solución a futuro. Asimismo se detalla el diseño y el cálculo de los parámetros del enlace óptico para la transferencia de información multimedia.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos en las sesiones de videoconferencia de prueba, las conclusiones generales y las contribuciones que se obtienen de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA VIDEOCONFERENCIA Y SUS RECOMENDACIONES DE INTEROPERABILIDAD

El primer dispositivo capaz de manipular audio y video para comunicarse a distancia, surge en Alemania en 1937, pero fue 27 años después cuando se presentó el primer prototipo que antecede a la videoconferencia: el videoteléfono. Sin embargo, su uso estuvo limitado por carecer de líneas y medios con suficiente ancho de banda.

El estado actual de las telecomunicaciones, la evolución de la videoconferencia para acoplarse a diferentes tipos de redes, la disponibilidad de medios de transmisión con mayor capacidad y la posibilidad de comprimir la información, entre otros tantos factores, permiten emplear esta herramienta en un gran número de áreas; pero su influencia más revolucionaria y en la que promete grandes avances, es en la educación a distancia, toda vez que abre las fronteras al conocimiento y a la interacción entre universidades de todo el mundo. Sus aplicaciones son tan vastas, que esta herramienta se ha convertido en el centro de atención de las telecomunicaciones, razón suficiente para analizar a detalle sus características y tendencias futuras.

1.1 LA VIDEOCONFERENCIA

1.1.1 Definición, tipos y elementos esenciales de un sistema de videoconferencia

La **teleconferencia** es una forma de comunicación en tiempo real, generalmente interactiva y bidireccional, en donde dos o más individuos alejados geográficamente, comparten información en forma de texto, gráficas, audio y video (sin comprimir). La comunicación es interactiva y bidireccional si el participante tiene la capacidad de transmitir y recibir información en una conferencia punto a punto (entre dos terminales) o en una conferencia multipunto (entre tres o más terminales). En otros casos, el participante puede ser únicamente receptor de información.

Teleconferencia es un término genérico que abarca diferentes tipos de información en formato digital, tecnologías de transmisión y aplicaciones. La **videoconferencia** es un concepto más específico y completo, porque soporta la transferencia de video y audio comprimido, imágenes y datos, pero también el más demandante por el volumen de información que maneja [1].

Un sistema de videoconferencia consta de los siguientes **elementos** [2]:

- i. Red de comunicaciones
- ii. CODEC
- iii. Sala de videoconferencia

i. La **red de comunicaciones** se refiere al medio de transporte de la información entre el transmisor y el receptor, el cual deberá ser una conexión digital bidireccional con bastante ancho de banda como para transmitir datos, audio y video, y que introduzca el menor retraso posible para evitar la desincronización entre las señales de audio y video. Las posibilidades en cuanto a tecnologías de transmisión son amplias: una línea analógica, la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI), un enlace satelital, redes de área local (LAN) o

de área ancha (WAN), entre otras. El optar por una en particular, depende de las características de la comunicación.

ii. El **CODEC**, acrónimo de codificador/decodificador, es el dispositivo que en un extremo de la conexión, codifica, comprime y multiplexa las entradas de audio, video y datos del usuario, para su transmisión a una sala de videoconferencia remota. En el extremo opuesto realiza la función inversa y dirige la información a los dispositivos periféricos de salida en la sala de videoconferencia local.

Cuando las señales se comprimen, disminuye significativamente el volumen de información por transferir, lo que facilita su envío, alivia la saturación en el medio de comunicación y permite un mejor manejo del ancho de banda disponible. Pero el problema se traslada a la etapa de compresión, que requiere mayor tiempo y poder de procesamiento, hecho que añade un retraso a la señal y exige a su vez mayor capacidad de sincronización. De ahí que la función del CODEC y las características de la red de comunicaciones estén relacionadas para determinar conjuntamente la calidad del video y del sonido, a través de modificaciones a la resolución de la imagen, la velocidad de transmisión y la tasa de compresión [3].

iii. El último elemento es la **sala de videoconferencia** o el área especialmente acondicionada para alojar tanto a los participantes, como al equipo de control, audio y video, que permitirá capturar y controlar las señales que habrán de transmitirse y desplegar las recibidas. Su análisis está fuera del alcance del presente trabajo de investigación.

Se distinguen principalmente dos tipos de sistemas de videoconferencia:

- I. Videoconferencia de escritorio
- II. Sistema de videoconferencia interconstruido

I. La **videoconferencia de escritorio** [4] se lleva a cabo en una computadora personal con capacidad multimedia; requiere de una videocámara digital, un micrófono, una tarjeta de audio, software para teleconferencias y según sea el caso, una tarjeta de red o una línea digital de banda ancha que permita la transferencia de la información.

La cámara se conecta a la computadora por un puerto o a través de una tarjeta de captura de video; sus características en cuanto a resolución, formato de imagen y tasa de transmisión, determinan las necesidades mínimas de la terminal en cuanto a velocidad de procesamiento, memoria RAM y memoria de video.

La función del CODEC se hace con software, no con hardware. Por las características del equipo, es ideal para soportar sesiones individuales punto a punto o multipunto.

II. Un **sistema de videoconferencia interconstruido** [4] consta de una o más cámaras de video, equipo de audio con cancelación de eco, micrófonos, bocinas y amplificadores, uno o más monitores, un sistema de control para la manipulación de los dispositivos y periféricos, así como de un CODEC para transmitir imágenes estáticas o en movimiento.

El equipo se dispone en un lugar fijo especialmente diseñado para captar a los participantes de la videoconferencia. Los periféricos empleados comprenden reproductores de 35 mm, gráficas computacionales, cámaras adicionales, monitores, fuentes de video, videograbadoras, pizarrones electrónicos, microscopios, dispositivos de imágenes médicas, equipo médico, etc. Aparentemente no existe límite alguno, a no ser por el ancho de banda

disponible del medio de transmisión. Soporta sesiones grupales y generalmente usa enlaces dedicados para transmitir y recibir información multimedia, o un enlace compartido pero con un ancho de banda fijo.

1.1.2 Información multimedia manipulada en una videoconferencia

Durante una sesión de videoconferencia se manipulan diferentes tipos de objetos multimedia, desde un simple texto hasta imágenes tridimensionales, pasando por música, voz, video, imágenes digitalizadas, datos, animaciones y realidad virtual, entre otros. La necesidad de ancho de banda aumenta exponencialmente con el volumen de información manejado y la complejidad de su procesamiento en tiempo real [5].

La mayoría de estos objetos posee una enorme cantidad de información. Por ejemplo, el tamaño de una simple imagen digitalizada sin comprimir, varía entre los 10 y 500 kbit, dependiendo de su resolución, dimensiones, detalles y colores. En ciertas aplicaciones de la medicina y del arte, la alta resolución de la imagen implicaría procesar un archivo mayor a los 60 Mbit.

De manera más específica, una imagen digitalizada con una resolución VGA de $640 \times 480 = 307,200$ pixels y máximo 24 bits de color, cuenta con una paleta de 16.7 millones de colores y requiere 7.4 Mbit de datos para su representación. Transmitir este archivo sin comprimir tardaría aproximadamente un minuto en un canal de 128 kbit/s, tres veces el tiempo necesario para transferir un archivo con 8 bits de color. Usando una tasa de compresión 10:1, la velocidad de transmisión de la imagen de 24 bits se reduce a 5.7 segundos en el mismo canal. Además, si se desea crear la sensación de movimiento, se procesan 30 imágenes por segundo con cambios de píxeles entre escenas adyacentes, lo que equivaldría a manipular un torrente de datos del orden de los 27 Mbytes/s, únicamente para la señal de video.

Si a este volumen de información le añadimos el correspondiente al audio, datos, imágenes y demás objetos manipulados en tiempo real durante la sesión de videoconferencia, se puede concluir que no existe equipo alguno capaz de manejar tales tasas de transmisión y mucho menos que cuenten con semejante ancho de banda. Por esta razón es necesario hacer un convenio entre la **calidad de la señal**, el **ancho de banda** o tasa de transmisión del medio y la **tasa de compresión** utilizada, de tal forma que si el uso de técnicas de compresión deterioran en cierto grado la calidad de la señal, dentro de límites aceptables según sea la aplicación, su uso también permita un mejor manejo del ancho de banda disponible, para la transmisión fiable de la información.

1.1.3 Canales de comunicación y modos de conferencia

Para la transmisión de datos durante una sesión de videoconferencia, se cuenta con tres canales de comunicación que se clasifican en: canal de conmutación de circuitos, de conmutación de paquetes y la combinación de los anteriores. Su selección depende del tipo de información que se maneje y de qué tan susceptibles pueden ser al retraso o al error, tal y como se muestra en la siguiente tabla [6].

Tipo de información	Retraso	Confiabilidad
Datos	NO	SI

Audío	SI	NO
Video	SI	SI
Imágenes	NO	SI

Tabla 1.1 Información multimedia y su susceptibilidad al retraso y al error

En forma genérica, los datos no son sensibles al retraso pero sí a la confiabilidad, cuando un archivo viaja a través de una red, interesa más que éste llegue sin errores que en determinado periodo. El audio, por el contrario, permite la pérdida de cierta información siempre que viaje a una velocidad constante que garantice su coherencia. Las imágenes no son sensibles al retraso pero sí necesitan ser confiables, de lo contrario, no pasarán inadvertidos los defectos que deterioren su calidad.

El video comprimido es altamente vulnerable al retraso. Cuando se elimina la redundancia de la señal durante el proceso de codificación, cualquier error en la secuencia de las imágenes recibidas degradan significativamente su calidad. Este aspecto deberá considerarse cuando se transmite video por un canal de comunicación poco fiable. Algunas técnicas de compresión compensan esta pérdida transmitiendo periódicamente información de la señal que permite su pronta restauración ante cualquier imprevisto. Tal es el caso del software diseñado para operar sobre Internet. Éste posee un mecanismo de actualización que transmite bloques de datos en forma periódica, aun cuando la información no haya cambiado. Lo anterior permite al receptor recobrar a partir de estos bloques algunos paquetes perdidos en el trayecto y recuperar la secuencia completa a los participantes que se unen a la sesión.

A. En un **canal de conmutación de circuitos** la información se transmite en forma de datos por una trayectoria de comunicación dedicada, a la cual se le asigna cierto ancho de banda para uso exclusivo. La comunicación se establece previamente al intercambio de información, se mantiene abierta durante la sesión y al terminar ésta, se cierra el canal liberando el ancho de banda ocupado.

La ventaja de usar estos canales radica en que el canal es totalmente fiable y el ancho de banda disponible es constante durante toda la videoconferencia. Pero el que la conexión sea punto a punto y la necesidad de dispositivos especiales para participar en una conferencia multipunto, además del desperdicio de ancho de banda en momentos inactivos de la sesión, constituyen algunas de las desventajas en la utilización de este tipo de enlaces.

B. En un **canal de conmutación de paquetes** la información se divide en paquetes que portan una identificación y una dirección destino. Éstos se transmiten individualmente a través de la red y, dependiendo de las condiciones, pueden tomar diferentes rutas y llegar en desorden. No utiliza un ancho de banda dedicado, más bien uno compartido con los demás usuarios de la red.

Su principal ventaja es la capacidad de participar en conferencias multipunto, pero las desventajas tienen mayor peso. El tiempo de entrega de los paquetes es impredecible, lo que causa graves problemas en la sincronía del audio y del video. En el primer caso, los paquetes se almacenan en la memoria del receptor, se reordenan y ejecutan a una velocidad

constante; aun así existe un retraso perceptible en detrimento de la calidad de la comunicación.

C. La tercera opción que combina las mejores cualidades de ambos canales, usando ATM como técnica de conmutación, es la **Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha (RDSI-BA)**. Dentro de sus virtudes se encuentra el uso de paquetes de longitud fija (53 bytes), conocidos como celdas; soporta diferentes velocidades de transmisión, multiplexa varios tipos de señales y provee distintas clases de servicio, capacidades que satisfacen por mucho las necesidades de transferencia de datos que se generan en la videoconferencia. Este tipo de canal de comunicación, aún en proceso de desarrollo, es la gran promesa del futuro para la transferencia de datos en tiempo real.

Con base en la clasificación hecha sobre los canales de comunicación y sus técnicas de conmutación, se encuentran entre los **modos de conferencia** más comunes, los que a continuación se mencionan:

a) El **servicio telefónico básico** provee un canal de conmutación de circuitos sobre cables de cobre, en modo analógico, que permite el acceso a la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC) y requiere el uso de un modem para transmitir datos digitales.

Posee el menor ancho de banda disponible pero como forma parte de la red de telecomunicaciones más amplia del mundo, es el más usado. Ofrece varias tasas de transmisión que van desde los 1200 hasta los 56000 bit/s, razón por la cual maneja señales multimedia con muy baja resolución y como máximo a 10 fps.

Una amplia gama de productos para videoconferencia de escritorio opera a estas tasas aunque con mala calidad de señal; sin embargo, el trabajo en esta área progresa con el desarrollo del estándar de la ITU-T H.324.

b) La **Red Digital de Servicios Integrados de Banda Estrecha (RDSI-BE)** es un servicio digital que provee una conexión punto a punto y transporta voz, datos, gráficos, texto y video en la misma línea. Ofrece dos tasas de acceso, la BRI (Basic Rate Interface) o tasa básica y la PRI (Primary Rate Interface) o tasa primaria. La BRI provee dos canales B de datos de 64 kbit/s y un canal D de señalización de 16 kbit/s. Mucho equipo en el mercado trabaja con RDSI-BRI, el problema es que no es un servicio disponible en todo el mundo y mucho menos en México. La tasa PRI provee 23 ó 30 canales B de 64 kbit/s y uno D de 64 kbit/s. Esta tasa es cara, razón por la cual su uso para videoconferencia es limitado.

c) Una **LAN** [7] o red de área local, comparte los recursos en áreas extensas como campus o grandes compañías. Transmiten generalmente a 10 Mbit/s con Ethernet o a 100 Mbit/s con Fast Ethernet. La mayoría de los productos de videoconferencia de escritorio son para conexiones en red y manejan una amplia variedad de protocolos, además de cumplir con el estándar de la ITU-T H.323.

d) Para la red global **Internet** [8], se desarrolló un protocolo denominado IP sobre el cual operan dos protocolos de transporte: TCP (Transmission Control Protocol) y UDP (User Datagram Protocol). El primero provee un servicio fiable punto a punto, con corrección de errores y reordenamiento de paquetes, mientras que el segundo es poco fiable y no detecta ni corrige errores. La mayoría de las aplicaciones de videoconferencia de escritorio operan

sobre la Internet usando UDP para la transmisión de audio y video. El uso de TCP se reduce sólo a archivos de texto, en otro tipo de datos no resulta práctico por su mecanismo de corrección de errores; si se retransmiten los paquetes perdidos, llegarán siempre demasiado tarde para su procesamiento.

e) Otra opción es utilizar un **enlace satelital** con una terminal VSAT (Very-Small-Aperture Terminal), que provee un rango de tasas de transmisión variable, generalmente entre los 15 y 56 kbit/s. La calidad del video no es la óptima, la tasa de transmisión de tramas es relativamente baja y el retardo de la señal es muy severo, pero resulta muy útil en algunas aplicaciones pese a estas limitantes.

f) **Mbone** es una red virtual que utiliza la capa de transporte de Internet para transmitir en tiempo real y a diferentes destinos, audio, video y datos. Está compuesta por islas con una dirección IP clase D de multidifusión (en el rango 224.0.0.0 a 239.255.255.255), conectadas entre sí por túneles en enlaces punto a punto. La información se transmite a un grupo en especial y los que deseen unirse deberán enlazarse a él. Posee un reducido ancho de banda, de 500 kbit/s y 250 paquetes por segundo, razón por la cual se satura fácilmente. Es una tecnología experimental que empieza a ser adoptada por diferentes grupos a nivel mundial. Estimaciones recientes describen el tamaño de la Mbone en 20,000 usuarios en 1500 redes en 30 países[9,11].

g) La **Red Nacional de Videoconferencia (RNVC)** posee un backbone propio de fibra óptica que corre por Ciudad Universitaria, con punto central de procesamiento en la DGSCA, donde se conmuta la señal a diversas salas del país y del mundo, de manera punto-punto o punto-multipunto.

A ella se conectan actualmente 148 salas de videoconferencia, localizadas no sólo en la República Mexicana, también en algunas ciudades centroamericanas como Guatemala, Panamá, Honduras, El Salvador y Costa Rica. Se enlazan mayoritariamente instituciones académicas y hospitales, vía RDSI, satélite, enlace dedicado o directamente a Red UNAM por fibra óptica, a una velocidad máxima de 384 kbit/s. El ancho de banda está en función de las necesidades del usuario y de ser necesario, éste puede aumentar.

1.1.4 Medios de transmisión de banda ancha

El término banda ancha proviene de la telefonía y se refiere a cualquier señal digital que exceda los 64 kbit/s, ancho de banda típico de un canal de voz de 4 kHz, que por el Teorema de Nyquist se muestrea al doble de su frecuencia y se codificado por PCM con 8 bits/muestra [12].

La información multimedia ha sobrepasado por mucho este ancho de banda y maneja archivos de hasta millones de bits por segundo. Los medios físicos que poseen suficiente capacidad como para transportar este tipo de información, son el par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica.

En el área de redes, el estándar 802.3 para Ethernet establece las características esenciales de estos medios, en términos de su velocidad binaria y la máxima distancia de un enlace sin necesidad de repetidores intermedios. Esto se muestra en la siguiente tabla.

Estándar	Tipo de cable	Distancia máxima entre secciones
10baseT 100baseT	Par trenzado (Categoría 5)	100 m
10base2 100base2	Coaxial delgado (50 Ω)	185 m
10base5 100base5	Coaxial grueso (50 Ω)	500 m
10baseF 100baseF	Fibra óptica	2000 m

Tabla 1.2 Medios de transmisión de banda ancha usadas en redes bajo el estándar 802.3 de Ethernet [12]

El cable coaxial y el par trenzado son medios de transmisión viables para un enlace digital, pero presentan inconvenientes que les resta valor frente a uno óptico.

El primero de ellos es un cable grueso comparado con el cobre y con la fibra óptica, aún cuando posee un revestimiento de material aislante no es totalmente inmune al ruido, la longitud del enlace es de corto alcance por su alto coeficiente de atenuación. Su uso se limita a la conexión del equipo terminal al concentrador, pero no como medio principal para la transmisión de la información.

Algo similar sucede con el par trenzado categoría 5, el más usado en redes. Aun cuando es más ligero, su peso y tamaño son considerablemente grandes con respecto a la fibra óptica; es de mayor diámetro, posee altos coeficientes de atenuación que permiten la transmisión digital a no más de 100 metros, lo que exige el uso de un gran número de repetidores a lo largo de todo el enlace. Para contrarrestar estos inconvenientes, han surgido otras categorías (6 y 7) de mayor capacidad pero para distancias que no logran exceder los 200 metros.

La razón de mayor peso que obliga a descartar su uso, es que no son medios escalables, es decir, no se acoplan a las necesidades cambiantes de ancho de banda. La fibra óptica es el único medio cuyo funcionamiento está garantizado en los próximos 15 ó 20 años, para diferentes protocolos y tecnologías de comunicación, que demanden mayores tasas de transmisión binaria [12].

1.1.5 Estructura y características de Red UNAM

La UNAM tiene una red de audio, video y datos que conecta tanto a las facultades, institutos y bibliotecas que se localizan en Ciudad Universitaria, como aquéllas que se encuentran fuera de ésta pero forman parte del sistema [13]. La figura 1.1 muestra su estructura completa.

Consta de una delta de fibra óptica multimodo con enlaces redundantes, en cuyos extremos se encuentran los tres principales nodos de interconexión: la **DGSCA**, el **IIMAS** y la **Zona Cultural (ZC)**.

Se creó en 1989 para cubrir el tráfico telefónico y de datos, bajo el estándar FDDI a 10 Mbit/s; en 1994 comienza a manejar video para incorporar aplicaciones de videoconferencia y educación a distancia. En 1997 entró en operación bajo la tecnología ATM, inicialmente para tráfico de datos y actualmente para audio y video. Emplea una

jerarquía digital síncrona (SDH) con una portadora óptica OC-3 de SONET, que transmite a una velocidad de 155.2 Mbit/s.

En los tres nodos hay conmutadores ATM para direccionar el tráfico y ruteadores para dar acceso a usuarios externos o permitir la salida a la WAN. Sólo en la DGSCA y en la Zona Cultural hay unidades de control multipunto (MCU) para procesamiento de videoconferencias.

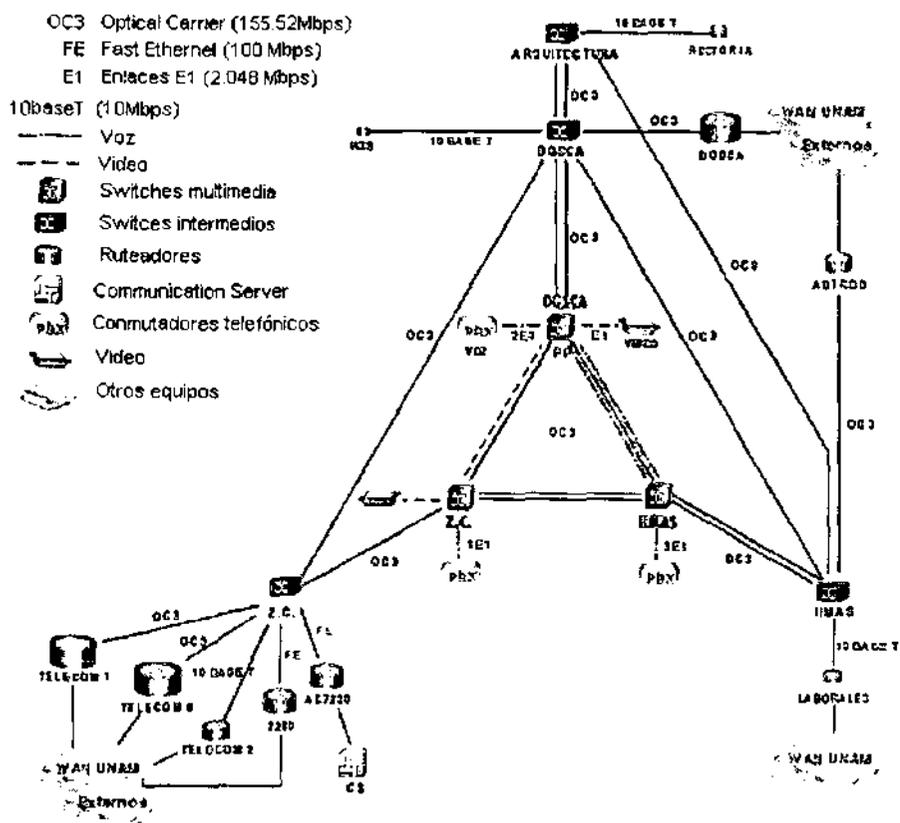


Figura 1.1 Estructura de Red UNAM [13]

Actualmente, la UNAM cuenta con una red nacional privada satelital, formada por siete estaciones terrenas para transmisión de voz y datos; tiene trece enlaces internacionales a los Estados Unidos para la conexión a Internet, cada uno con capacidad de transmisión de 125 Mbit/s; ofrece enlaces por microondas, canales BRI o PRI para la RDSI y acceso a la Red Nacional de Videoconferencia (RNVC).

En los próximos años tendrá acceso a una red de alta velocidad basada en la tecnología Internet2 que emplea una nueva versión del protocolo de Internet (IPv6), inicialmente como área de investigación y posteriormente para desarrollo de nuevos proyectos y servicios relacionados con la educación a distancia [14].

Lo anterior, aunado al uso de tecnología de punta, consolida el liderazgo de Red UNAM en el área de las Telecomunicaciones y la coloca como la más grande e importante de América Latina.

1.2 RECOMENDACIONES DE INTEROPERABILIDAD PARA EQUIPO DE VIDEOCONFERENCIA

A partir de la introducción del uso de la videoconferencia en la década de los 60, diversas empresas se dieron a la tarea de diseñar equipo con características propias que sólo permitía la comunicación con dispositivos similares en determinadas áreas geográficas. Pero no fue sino hasta los 80's cuando comienza la transición y las telecomunicaciones dejan a un lado el nicho nacional y amplían su cobertura a nivel internacional. Ésto, aunado al creciente desarrollo de las tecnologías de comunicación, exige la creación de estándares de interoperabilidad que regulen las características técnicas básicas de los equipos de videoconferencia para su intercomunicación.

Existen múltiples grupos que trabajan con este propósito, a decir, la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la ISO (International Standards Organization), el IMTC (International Multimedia Teleconferencing Consortium), el PCWG (Personal Conferencing Working Group) y la ITCA (International Teleconferencing Association), pero el más importante en el área de comunicaciones multimedia, es el Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (CCITT) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), miembro de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) desde 1947. Su objetivo es la creación de recomendaciones técnicas en el área de telefonía, telegrafía y transferencia de datos, a escala mundial. A través de estos estándares pretende asegurar la eficiencia y calidad de las telecomunicaciones internacionales, así como su compatibilidad[1,3].

1.2.1 Serie H.32X de la ITU-T y recomendaciones complementarias

Para cubrir de manera genérica los requisitos básicos de sistemas y terminales audiovisuales de banda ancha, así como la configuración y descripción del sistema, la ITU-T (Sector de Telecomunicaciones) emitió la recomendación H.310. Con ella como referencia, se formó la **serie H.32X** pero para diferentes tecnologías de transmisión de información, según se observa en la siguiente tabla.

Rec.	Título
H.320	Sistemas y equipos terminales videotelefónicos de banda estrecha (05/99).
H.321	Adaptación de los terminales videotelefónicos H.320 a los entornos de la Red Digital de Servicios Integrados de banda ancha (02/98).
H.322	Sistemas y equipos terminales videotelefónicos para redes de área local que dan una calidad de servicio (QoS) garantizada (03/96).
H.323	Sistemas de comunicaciones multimedia basados en paquetes (02/98)
H.324	Terminal para comunicaciones multimedia a baja velocidad binaria (02/98).

Tabla 1.3 Serie H.32X de la ITU-T [15]

En estas recomendaciones, se hacen las modificaciones necesarias a la H.310 para adaptar el equipo a la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) de banda ancha (BA) o de banda estrecha (BE), a una red de conmutación de paquetes con calidad de servicio (QoS) garantizada o sin ella, y a la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC).

Según sea el caso, cada recomendación de la serie H.32X se complementa con otras para definir las funciones básicas de la entidad, como son el procesamiento de audio y video, la señalización de llamada y los protocolos de control de comunicación multimedia, entre otras. Las recomendaciones complementarias de la ITU-T se mencionan en la siguiente tabla.

Recomendación	H.320	H.321	H.322	H.323 V1/V2	H.324
Aprobado en:	1990	1995	1995	1996/1998	1996
Tipo de red	RDSI de banda estrecha	RDSI de banda ancha	Red de conmutación de paquetes con calidad de servicio garantizada	Red de conmutación de paquetes sin calidad de servicio garantizada	Sistema telefónico analógico
Video	H.261 H.263	H.261 H.263	H.261 H.263	H.261 H.263v	H.261 H.263
Audio	G.711 G.722 G.728	G.711 G.722 G.728	G.711 G.722 G.728	G.711 G.722 G.728 G.723 G.729	G.723
Señalización	H.221	H.221	H.221	H.225.0	H.223
Control	H.230 H.242	H.242	H.242 H.230	H.245	H.245
Datos	T.120	T.120	T.120	T.120	T.120
Interfaz de comunicación	I.400	AAL I.363 AJM I.361 PHY I.400	I.400 TCP/IP	TCP/IP	Módem V.34

Tabla 1.4 Recomendaciones complementarias de la serie H.32X de la ITU-T[16]

La Internet está formada por un gran número de redes de área local sin calidad de servicio garantizada, que aún cuando se extienden por todo el mundo y dan acceso a millones de usuarios, continúan creciendo y promueven el uso de herramientas de comunicación más complejas. Se sabe que en este tipo de redes es donde tiene mayor aceptación la videoconferencia, razón por la cual se le confiere especial importancia a la recomendación H.323, misma que a continuación se analiza.

1.2.2 Recomendación H.323 de la ITU-T

La recomendación H.323 cubre los requisitos técnicos necesarios para transmitir de datos y realizar comunicaciones de audio y video, en redes de área local con calidad de servicio no garantizada. Sin importar a qué tipo de red pertenecen, los terminales pueden interfuncionar con terminales H.323, tal y como se muestra en el siguiente diagrama.

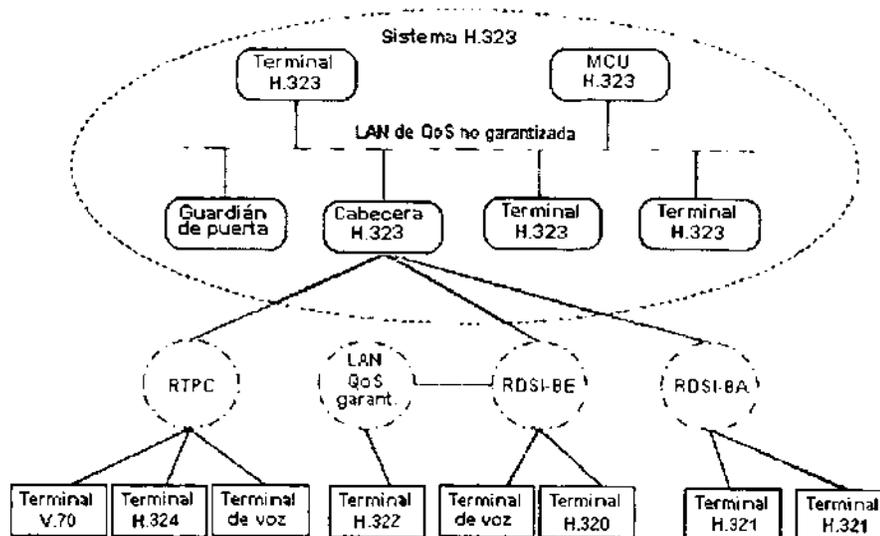


Figura 1.2 Interfuncionamiento de terminales H.323 [15]

Las funciones básicas del equipo terminal o de las entidades que constituyen un sistema H.323, así como su fecha de aprobación, se describen en las recomendaciones complementarias que se listan en la siguiente tabla.

Recom.	Título
	Señalización y empaquetado
H.225.0	Protocolos de señalización de llamada y empaquetado de trenes de medios para sistemas de comunicaciones multimedia por paquetes (02/98).
	Protocolo de control para comunicación multimedia
H.245	Control de las comunicaciones entre sistemas de videotelefonía y equipos terminales (09/98).
	CODEC de video
H.261	CODEC de video para servicios audiovisuales a p x 64 kbit/s (03/93).
H.263	Codificación de video para la comunicación a baja velocidad binaria (02/98).
	CODEC de audio
G.711	Modulación por impulsos codificados (PCM) de frecuencias vocales (11/88).
G.722	Codificación de audio de 7 kHz dentro de 64 kbit/s (11/88).
G.723.1	Codificación de voz de velocidad doble para comunicación multimedia con transmisión de 6.3 y 5.3 kbit/s (03/96).
G.728	Codificación de señales vocales a 16 kbit/s utilizando predicción lineal con excitación por código de bajo retardo (09/92).
G.729	Codificación de la voz para comunicación multimedia a 8 kbit/s mediante predicción lineal con excitación por código algebraico de estructura conjugada (09/98).
	Protocolos de comunicaciones multimedia
T.120	Protocolos de datos para conferencias multimedia (1996).

Tabla 1.5 Recomendaciones relacionadas con la H.323 de la ITU-T [15]

1.2.3 Descripción de los estándares de control, video, audio, datos y señalización de la recomendación H.323

La comunicación multimedia entre dos puntos extremo H.323, comienza con el establecimiento de la llamada y termina con su desconexión. Entre estos dos eventos tienen lugar otros procedimientos que dan a conocer la situación de la comunicación y de los terminales participantes. La **señalización** se realiza con mensajes definidos en la **recomendación H.225.0** que se transmiten al extremo opuesto por un canal de comunicación fiable. La misma recomendación da formato a los trenes de información de video, audio, datos, control de la comunicación y control de la llamada; posteriormente los envía a la interfaz de red para transferirlos a través de una trayectoria que incluye una o más redes de conmutación de paquetes sin calidad de servicio garantizada. Así mismo, procesa y corrige los errores de la información recibida en la interfaz de red.

Dos **protocolos de comunicación multimedia** tienen lugar en una entidad H.323: el de control descrito en la **recomendación H.245** y el de datos de la **recomendación T.120**.

Al comienzo y durante la comunicación, el protocolo de control rige el funcionamiento del equipo y realiza la negociación en banda para intercambiar capacidades audiovisuales y de datos, solicitar la transmisión de un modo determinado, gestionar los canales lógicos utilizados en la transferencia de información, establecer qué terminal es el director y cuál el subordinado, con fines de gestión de los canales lógicos bidireccionales; para transportar distintas señales de control e indicación, controlar la velocidad de bits de los canales lógicos individuales y medir el retardo de ida y vuelta entre un par de terminales.

El segundo protocolo es el que indica cómo se realiza la transferencia de datos entre dos o más terminales H.323 o entre uno H.323 y otro de la serie H.32X, para compartir información y lograr la interoperabilidad.

El **procesamiento de la señal de video**, está a cargo de un CODEC, cuyo funcionamiento se detalla en dos recomendaciones: la **H.261** y la **H.263**.

La primera es clave para la videoconferencia de banda estrecha porque describe un método de codificación y decodificación de señales de video a una velocidad de $n \times 64$ kbit/s, donde n toma valores de 1 a 30. Introduce además un formato intermedio común (CIF) y un cuarto de éste (QCIF), para cubrir con una sola recomendación los estándares de televisión a color de 525 líneas a 60 Hz y 625 líneas a 50 Hz. Estos formatos operan a una velocidad menor a los 30 cuadros por segundo (fps) para líneas digitales con un ancho de banda limitado.

La segunda recomendación es una mejora a la H.261 y fue diseñado con el propósito de mejorar sustancialmente la calidad del video por debajo de los 64 kbit/s. El codificador fuente introduce nuevos formatos, además de los utilizados por H.261, que sirven como enlace entre las dos recomendaciones.

Formato de video	Tamaño de la imagen en píxeles	H.261	H.263
Sub-QCIF	128 X 96	no especificado	requerido
QCIF	176 X 144	requerido	requerido

CIF	352 X 288	opcional	opcional
4CIF	702 X 576	no especificado	opcional
16CIF	1408 X 1152	no especificado	opcional

Tabla 1.6 Formatos de video de las recomendaciones H.261 y H.263 de la ITU-T [5]

Actualmente, los sistemas de videoconferencia manejan **tres técnicas de compresión de audio** en tiempo real:

- a) PCM con codificación por ley A o ley μ
 - b) PCM Aditivo Diferencial
 - c) Codificación por predicción lineal (LPC) y Codificación por predicción lineal con excitación por código (CELP)
- a) La técnica PCM con cuantizador uniforme, no comprime la señal, sólo representa a cada muestra con una palabra código. Cuando se cambia el espaciamiento entre los niveles del cuantizador, en forma logarítmica de acuerdo a la ley A o la ley μ , se logra una tasa de compresión de 1.75:1 (cantidad de información original:cantidad de información después de la compresión). Esta transformación permite manejar 8 bit/muestra mientras que con PCM uniforme se utilizarían 14 para representar el mismo rango de valores. Los métodos de cuantización y codificación por la ley A y la ley μ , así como la conversión entre ellas, se detallan en la **recomendación G.711** [17].
- b) La segunda técnica propuesta en la **recomendación G.722** [18], describe las características de un sistema de codificación de audio en la banda de los 50 a los 7000 Hz, para señales vocales de alta calidad. Este sistema de codificación utiliza una modulación por impulsos codificados diferencial adaptiva de sub-banda (ADPCM-SB) a una velocidad binaria de hasta 64kbit/s. En la técnica ADPCM-SB empleada, la banda de frecuencias se divide en dos sub-bandas: superior e inferior, y las señales de cada una se codifican utilizando la ADPCM.
- A diferencia del primer método, éste predice el valor de la próxima muestra con base en el valor de muestras adyacentes anteriores y codifica la diferencia entre éstas para disminuir a cuatro el número de bits por muestra. Además, el codificador se adapta a las características de la señal cambiando los parámetros de predicción del cuantizador, de ahí que se denomine adaptivo. Con esta técnica se logra una tasa de compresión de 2:1 comparada con PCM uniforme.
- El sistema maneja tres velocidades binarias de codificación de audio: 64, 56 y 48 kbit/s. Los dos últimos modos permiten obtener, respectivamente, un canal de datos auxiliar de 8 y 16 kbit/s.
- c) En la última técnica de compresión, se emplea una codificación de predicción lineal donde el codificador analiza la señal de acuerdo a un modelo analítico simple y los mejores parámetros se utilizan para generar una señal sintética similar a la original. Posee una tasa de compresión 8:1 y una velocidad de 16 kbit/s. En otros casos se usa la predicción lineal con excitación por código, que sigue la misma técnica pero ahora calcula el error entre la señal vocal de entrada y el modelo analítico. Se transmiten los

parámetros del modelo y una representación de los errores, señalados como índices en un código compartido entre el codificador y el decodificador. Maneja una velocidad de 8 kbit/s y junto con la técnica anterior, su operación se detalla en las recomendaciones G.728 y G.729 de la ITU-T.

1.2.4 Entidades de un sistema H.323

Como se ilustra en la figura 1.2, un sistema de comunicaciones de red H.323 se compone de cuatro entidades [15,16]:

- A. Terminal
- B. Cabecera (Gateway)
- C. Guardián de puerta (Gatekeeper)
- D. Unidad de Control Multipunto (MCU)

A. La primera, un **terminal**, es el equipo de usuario en una red que provee comunicaciones en tiempo real y de forma bidireccional, con otro terminal, cabecera o unidad de control multipunto H.323. La comunicación consta de control, indicaciones, audio, imágenes de video en color y en movimiento y/o datos entre los terminales. Cuenta con diferentes modos de operación para la comunicación con otros terminales y maneja diferentes estándares de audio, video y datos.

La configuración de este punto extremo, según se describe en la recomendación H.323, se muestra en la figura 1.3.

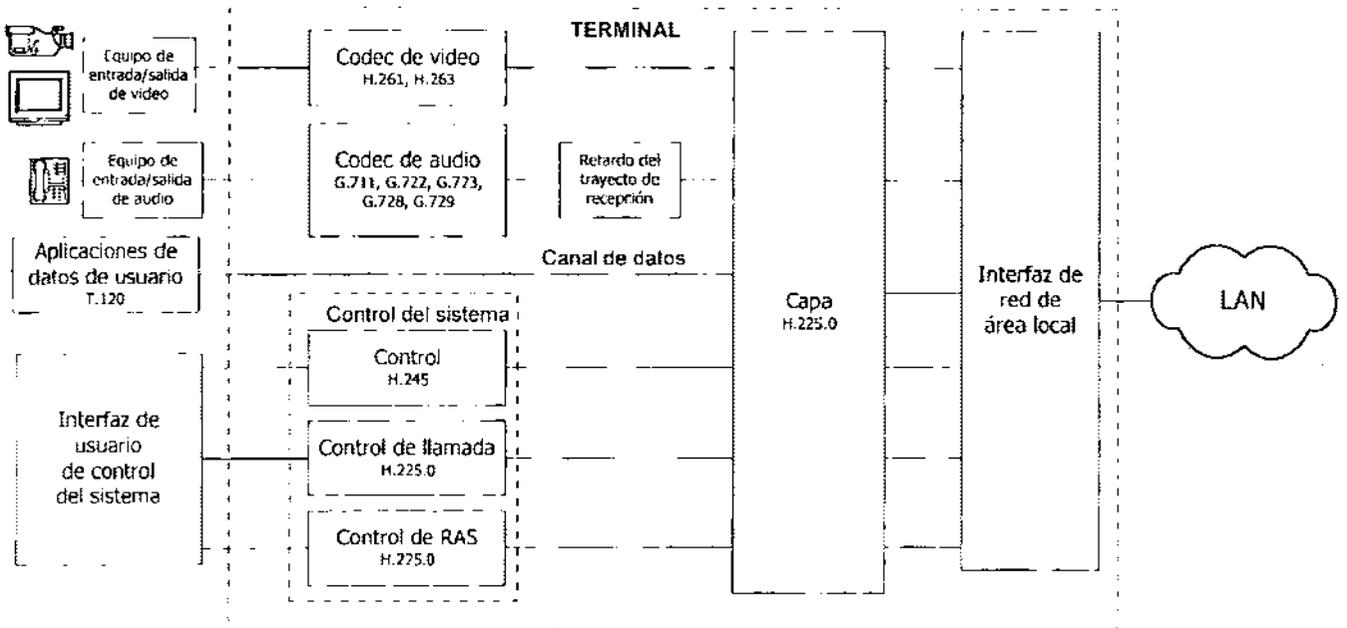


Figura 1.3 Equipo terminal H.323

Los elementos que conforman un equipo terminal H.323, son:

- a) El CODEC de video
- b) El CODEC de audio
- c) El canal de datos
- d) La unidad de control del sistema
 - ✓ Control H.245
 - ✓ Control de llamado H.225.0
 - ✓ Control de RAS H.225.0
- e) El retardo del trayecto de recepción
- f) La capa H.225.0
- g) La interfaz de LAN

a) El **CODEC de video** digitaliza, codifica y comprime la señal analógica proveniente de la fuente para transmitirla por un canal digital hacia el extremo opuesto de la comunicación. El proceso inverso se realiza con la información recibida para su presentación visual. Su funcionamiento y métodos de compresión utilizados, se detallan en las recomendaciones H.261 y H.263. Durante el intercambio de capacidades, al principio de la conexión, el codec determina cuántos canales de video, qué velocidad binaria, formatos de imagen y algoritmos puede manejar, y si le es posible trabajar de forma asimétrica, es decir, transmitir a cierta velocidad, con un formato y algoritmo específico y recibir con otros diferentes.

b) En audio, el método es similar al anterior pero mucho menos complejo. La señal vocal analógica que se adquiere mediante un micrófono, se procesa y digitaliza con un **CODEC de audio**, como se muestra en el siguiente diagrama a bloques:

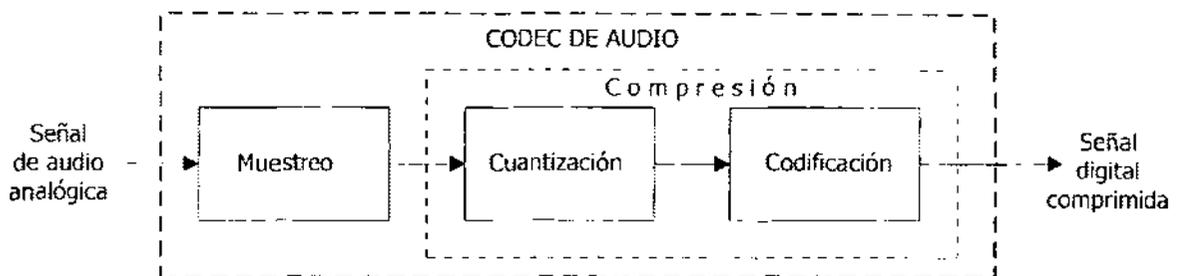


Figura 1.4 Diagrama a bloques del codec de audio

Los sistemas de videoconferencia están diseñados en su mayoría para manipular señales vocales en el rango de los 40 a los 4000 Hz. Esta señal analógica se muestrea de acuerdo con la teoría de Nyquist, al doble de su frecuencia máxima, es decir, a 8000 muestras por segundo. Después se cuantifica la señal muestreada en un número discreto de niveles, dependiendo del número de bits que se asignen a cada muestra; para audio digital, se encuentra en el rango de 8 (256 niveles) a 16 (65536 niveles) bits por muestra. Finalmente se realiza la codificación al generar palabras de código que representan los valores previamente cuantificados. Se utiliza el método de modulación por impulsos codificados donde según la uniformidad con la que se espacian los niveles de cuantificación, será el nivel de compresión de la señal [19].

Un terminal maneja el algoritmo de compresión descrito en la recomendación G.711, los demás son opcionales, y durante el intercambio de capacidades, al igual que el CODEC de video, determina su modo de operación e informa si puede trabajar de manera asimétrica.

c) El **canal de datos** permite compartir información en aplicaciones telemáticas, tales como pizarrones electrónicos, transferencia de imágenes fijas, intercambio de archivos y acceso a bases de datos, entre otras. La transmisión puede ser unidireccional o bidireccional, dependiendo de qué tipo de difusión y conferencia se emplee.

d) Como se mencionó anteriormente, la señalización para el óptimo funcionamiento del terminal H.323, está a cargo de la **unidad de control del sistema** con tres tipos de control:

- ✓ A través de un canal fiable se envían mensajes de **control H.245** entre extremos participantes en la conferencia, para regir el funcionamiento de la entidad H.323. Entre ellos está el control de la llamada, el intercambio de capacidades, la transmisión de mensajes, la apertura, cierre, señalización y descripción completa de los canales lógicos, peticiones de modo preferido, determinación principal-subordinado, mensajes de control de flujo e instrucciones o indicaciones generales.
- ✓ Para establecer una conexión entre dos puntos extremo H.323 o entre un punto extremo y un guardián de puerta, se emplea el **control de llamada H.225.0**.
- ✓ La función de **Control de RAS** (Registration/Admission/Status) **H.225.0**, utiliza mensajes para llevar a cabo procedimientos de registro, admisión, cambio de ancho de banda, situación y desligamiento entre puntos extremo y guardianes de puerta. Si éste último no forma parte del sistema H.323, no se utiliza la señalización RAS.

e) El **retardo del trayecto de recepción** es el retardo añadido al tren de audio, para mantener la sincronización con el video. Esto tiene lugar en el trayecto de recepción pero no en el de transmisión.

f) La **capa H.225.0** da formato a los trenes de video, audio, datos y control transmitidos en mensajes de salida hacia la interfaz de la red y recupera los trenes recibidos en la misma. También lleva a cabo la alineación de trama lógica, la numeración secuencial, la detección de errores y la corrección de los mismos según el medio.

La transmisión y recepción de información se hace a través de un canal lógico unidireccional e independiente, que se identifica mediante un número de canal lógico (LCN) comprendido entre 0 y 65535. Cada uno tiene un límite de velocidad de transmisión determinado por la capacidad de transmisión y de recepción de los puntos extremo. Sus características están dadas por la recomendación H.225.0 y el formato por la H.245.

g) Por último, está la **interfaz de LAN**, fuera del alcance de la recomendación H.323. Su función es proporcionar los servicios descritos en la el estándar H.225.0, es decir, el servicio fiable de extremo a extremo (TCP, SPX) para los canales de datos, el canal de señalización de llamada, el servicio no fiable de extremo a extremo (UDP, IPX) para los canales de audio, los canales de video y el canal de RAS. Estos servicios pueden ser

unidireccionales o bidireccionales, de unidifusión o multidifusión, dependiendo de la aplicación, la capacidad de los terminales y la configuración de la LAN.

B. La **cabecera** es la segunda entidad de un sistema H.323. Este punto extremo en la red de área local proporciona comunicaciones bidireccionales y en tiempo real, entre un terminal H.323 de la LAN y otro de la serie H.32X, o entre cabeceras H.323. Es un elemento prescindible si la comunicación se establece entre puntos extremo de la misma LAN y no con terminales de la red de circuitos conmutados (RCC). Realiza la conversión entre formatos de transmisión (V. H.225.0 a H.221), entre procedimientos de comunicaciones (V. H.245 a H.242) y opcionalmente, entre formatos de trenes de video, audio y datos; además, lleva a cabo el establecimiento y la liberación de la llamada en el lado LAN y en el lado RCC.

Por lo general, la finalidad de la cabecera consiste en reflejar las características de un punto extremo de LAN a un punto extremo de RCC, y a la inversa, de manera transparente.

C. El **guardián de puerta** es una entidad opcional en un sistema H.323 que actúa como un conmutador virtual, y de estar presente, presta los siguientes servicios:

- ✓ **Conversión de dirección:** efectúa la conversión de dirección de alias a dirección de transmisión mediante un cuadro de conversión que se actualiza con mensajes de registro.
- ✓ **Control de admisiones:** autoriza el acceso a la LAN utilizando mensajes de petición/confirmación/rechazo (ARQ/ACF/ARJ) de admisión de la recomendación H.225.0. La autorización depende de algún criterio, pero también puede ser una función nula que admita todas las peticiones.
- ✓ **Control del ancho de banda:** admite mensajes de petición/confirmación/rechazo (BRQ/BCF/BRJ) basándose en la gestión del ancho de banda. Puede ser una función nula que acepte todas las peticiones de cambio de ancho de banda.
- ✓ **Gestión de zona:** proporciona las funciones anteriores para terminales, MCUs y cabeceras que sean administradas por un mismo guardián de puerta.

El guardián de puerta está separado lógicamente de los puntos extremo pero físicamente puede coexistir con una terminal, MCU, cabecera, servidor u otro dispositivo de LAN que no sea H.323. Para el soporte de conferencias multipunto, el guardián de puerta puede recibir los canales de control H.245 de los terminales de una conferencia punto a punto, pero cuando se convierte en multipunto, reencamina el canal de control a un controlador multipunto.

D. El cuarto y último elemento, es la **unidad de control multipunto (MCU)** que permite que tres o más terminales participen en una conferencia multipunto. También puede conectar dos terminales en una conferencia punto a punto que más tarde pasa a ser multipunto. Consta de dos partes: un **controlador multipunto (MC)** obligatorio y **procesadores multipunto (MP)** opcionales.

El MC realiza funciones de control para sustentar la conferencia multipunto, hace intercambio de capacidades comunes de procesamiento de audio y video, determina el

modo de comunicación seleccionado y controla los recursos de la conferencia para determinar qué trenes de audio y video, serán multidifundidos.

El MP realiza el procesamiento de los trenes de audio, video y/o datos que recibe de los puntos extremo en una conferencia multipunto, facilita el mezclado y la conmutación de éstos bajo el control del MC. El MP puede procesar un solo tren o múltiples trenes de medios, dependiendo del tipo de conferencia soportada y siempre apegado a las normas establecidas en las recomendaciones relacionadas con la H.323.

1.2.5 Tipos de conferencia

Un sistema H.323 es capaz de transmitir audio con base en la recomendación G.711 y recibir con la G.722, soporta uno o más de canales de información de manera simultánea, recibe video en un formato y envía en otro, y además maneja diferentes tipos de conferencia. Se distinguen dos tipos: **punto a punto**, entre dos terminales, y **punto a multipunto**, de una fuente a múltiples destinos. También es posible que una conferencia empiece siendo punto a punto y en algún momento de la llamada, se amplíe a conferencia multipunto [15].

Dentro de las conferencias multipunto, hay tres modalidades. Cuando todos los participantes se comunican de manera punto a punto con una MCU y le transmiten sus trenes de control, audio, video y datos, se llama **conferencia multipunto centralizada**. El MC gestiona la conferencia usando funciones de control H.245 para definir la capacidad de cada terminal y el MP mezcla el audio y el video, distribuye los datos y los transmite hacia los otros participantes, y permite la comunicación entre diferentes CODECS a diferentes velocidades de transmisión.

Por el contrario, si cada terminal participante multidifunde su audio y video a todos los demás participantes sin utilizar una MCU, se llama **conferencia multipunto descentralizada**. Los terminales receptores procesan los múltiples trenes de audio y video que llegan y seleccionan uno o más para su presentación. En este caso, los terminales usan el canal de control H.245 para indicar a un MC cuántos trenes de audio y video pueden decodificar simultáneamente. La capacidad de un terminal no limita el número de señales que se pueden manejar una conferencia. El tren de datos sí es procesado de manera centralizada por la MCU y no se necesita un MP de audio o video.

Una tercera opción es la unión de las dos anteriores, una **conferencia multipunto mixta** en la que algunos terminales participan en un modo centralizado mientras que otros participan en un modo descentralizado. Los terminales desconocen la naturaleza mixta de la conferencia, sólo conocen el tipo de conferencia en la que cada uno de ellos participa. La MCU es el puente entre los dos tipos de conferencia.

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR EN UN ENLACE ÓPTICO

La manipulación de audio, video y datos en un enlace de comunicaciones, demanda un gran ancho de banda que por diversas razones, sólo un enlace óptico puede ofrecer completamente. Los bajos niveles de atenuación de la fibra óptica, la siempre creciente rapidez de los componentes activos y las técnicas de multiplexación en longitud de onda, son entre otros tantos factores, los responsables de manejar actualmente tasas de transmisión que rebasan los Terabits por segundo. Esto ha ocasionado que la tecnología adopte tintes ópticos, al grado de hablar de redes fotónicas con capacidades antes inimaginables.

Tomando en cuenta que la videoconferencia es una aplicación multimedia de banda ancha y que por su continuo desarrollo requiere medios de transmisión más veloces, se propone el uso de un enlace óptico que satisfaga los requisitos antes planteados, pero que también garantice su correcto funcionamiento ante futuros cambios. A continuación se estudian sus componentes básicos, así como sus características esenciales.

Un enlace óptico es un sistema de comunicación donde a la fibra óptica se le denomina componente pasivo, mientras que a la fuente óptica y al fotodetector, se les denomina componentes activos; en su forma más simple está constituido por tres elementos básicos [22]:

- i. Un transmisor, cuya función es convertir la información en forma de señal eléctrica, a información en forma de luz. Contiene una fuente óptica, ya sea un diodo electroluminiscente o un diodo láser.
- ii. Un canal de transmisión o guía de onda, que es la fibra óptica.
- iii. Un receptor que transforma la señal óptica recuperada en información con forma de señal eléctrica. Posee un fotodetector tipo *p-i-n* o APD (de avalancha).

2.1 TRANSMISOR ÓPTICO

Las **fuentes ópticas** son transductores que generan la onda portadora óptica modulada por una señal analógica o digital. Para su aplicación, deberán cumplir con ciertos requisitos:

- Ser pequeñas para un mejor acoplamiento con la fibra óptica
- Bajo consumo de potencia
- Un ancho espectral lo más angosto posible para incrementar la capacidad de la fibra
- Un rápido tiempo de respuesta o capacidad de ser modulada a altas velocidades
- Producción de potencia estable que no varíe con la temperatura o con las condiciones ambientales
- Longitud de onda de la luz emitida dentro del rango de la ventana de bajas pérdidas de la fibra óptica y alta pureza espectral
- Potencia de salida lo suficientemente intensa para realizar comunicaciones a larga distancia

2.1.1 Tipos de fuentes ópticas

Las fuentes que se emplean con la fibra óptica, son elementos semiconductores hechos de cierto material, de banda que facilita la recombinación de electrones-huecos para generar fotones (luz) por emisión espontánea o forzada, y generalmente son de dos tipos:

- A. LED (Diodo electroluminiscente)
- B. LD (Diodo laser)

A. Un **LED** es esencialmente un diodo semiconductor que opera en polarización directa. Su estructura está compuesta por una capa *p* y una capa *n*, con una zona de transición justo en la unión, llamada región activa. En esta área se lleva a cabo un proceso de recombinación radiativa que genera luz en forma aleatoria, debido a un mecanismo de emisión espontánea.

Para controlar y confinar la generación de luz a la región activa se utilizan diferentes tipos de estructuras multicapas, simples o dobles, con materiales de diferentes índices de refracción para lograr un efecto guíaonda.

A causa de la radiación aleatoria, no es de esperar que los fotones emitidos (luz) tengan la misma frecuencia y fase, porque cada emisión es independiente de cualquier otra en su generación. Esto implica que unas anulen total o parcialmente a otras y que la potencia neta de salida se vea reducida por estos fenómenos de interferencia. Por eso la luz generada en un LED tiene un amplio ancho de banda espectral, un bajo nivel de potencia óptica y una velocidad de modulación limitada, factores que le restan eficiencia y los hacen útiles en aplicaciones donde la atenuación y dispersión en la línea no son críticas, así como para transmitir moderadas tasas de información. Sin embargo, su ventaja más apreciable es el costo.

El **SLED**, **diodo electroluminiscente de emisión por superficie** o **tipo Burrus**, emite luz de forma isotrópica. Su estructura se ilustra en la figura 2.1.

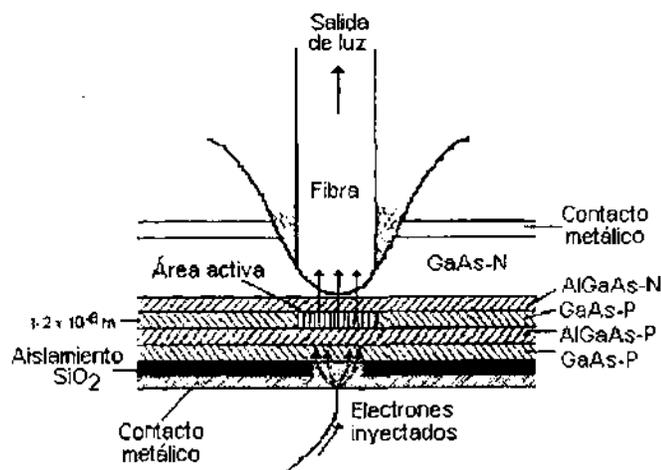


Figura 2.1 Estructura del LED de emisión por superficie [22]

Generalmente son homouniones o heteroestructuras, simples o dobles, con un área activa pequeña que sólo tiene contacto con una pequeña porción de la superficie p . El SiO_2 aísla el contacto metálico de esta capa p , de tal forma que al hacer fluir corriente eléctrica por un área pequeña, la densidad de corriente aumenta y mejora la eficiencia de radiación.

Los dos primeros sustratos p , sirven como reflectores de luz y restringen la recombinación a la unión $p-n$. La superficie circular en la capa n , concentra la luz emitida por la región activa y favorece el acoplamiento con la fibra.

El diodo tipo **ELED** o **diodo electroluminiscente de emisión de borde**, emite la luz por el mismo plano de la unión $p-n$, gracias al efecto de guía que provoca la heteroestructura doble. Una estructura típica de emisión de borde se ilustra en la figura 2.2

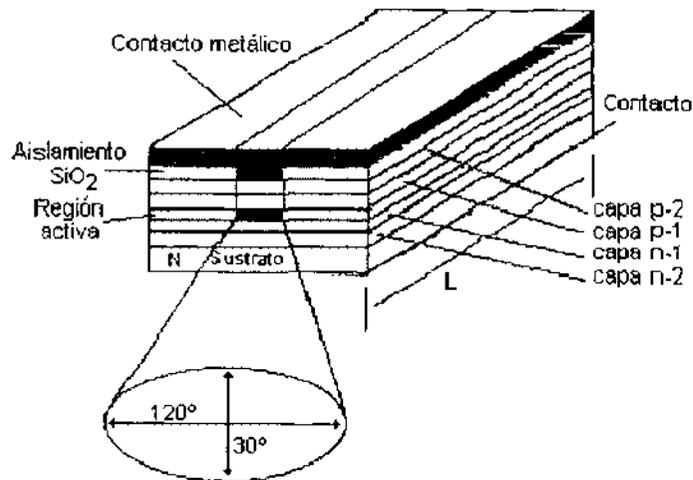


Figura 2.2 Estructura de un LED de emisión de borde [22]

Las múltiples capas persiguen dos objetivos: las capas p_1 y n_1 , concentran la recombinación al área activa, mientras que las capas p_2 y n_2 , dificultan la salida de fotones en planos perpendiculares y mantienen la luz generada cerca de esta región. Así, la concentración electrones-huecos es mayor y se emite más luz.

La luz emitida en el borde se genera a lo largo L de la estructura. Produce un haz más angosto que permite un mejor acoplamiento con fibras multimodo de baja apertura numérica.

En este tipo de LED también se concentra la inyección de corriente eléctrica a una pequeña región, para mejorar la generación de luz. Al ser más direccional la radiación que en el LED de emisión por superficie, las pérdidas de acoplamiento a la fibra óptica son menores; también el ancho espectral del haz emitido por este tipo de LED, es menor que en uno tipo SLED, debido a la presencia parcial de la emisión forzada.

B. El **diodo laser** usado en la técnica óptica se basa en los fenómenos de emisión que ocurren en una unión $p-n$ bajo determinadas circunstancias.

Las condiciones que debe cumplir un diodo para lograr el fenómeno laser, son:

- i. Semiconductor con región activa óptica que posea una fuente externa de bombeo

- ii. Corriente de excitación (I_p) mayor que la corriente de umbral (I_{th})
- iii. Cavidad Fabry-Perot con dimensiones adecuadas.

La fuente externa de bombeo inyecta electrones en la estructura $p-n$ y la somete a una fuerte excitación para que los electrones asciendan a un nivel de energía superior. A este proceso se le llama **inversión de la población**.

A partir de esta condición, se genera una gran densidad de fotones, de los cuales, una parte sale de la estructura a través de un espejo semitransparente y actúa como fuente de luz, y la otra se almacena para realimentar el proceso de radiación forzada. De tal forma que cuando un fotón incide en un electrón de alta energía, se emite un nuevo fotón con la misma fase y frecuencia del incidente. Se logra entonces un fenómeno de **emisión forzada** o **amplificación** de luz y una elevada potencia de salida concentrada en un pequeño margen de longitudes de onda.

Para que las ondas subsistan en la cavidad resonante, con un espejo colocado en cada extremo, la luz debe producir interferencias constructivas, lo que implica que la longitud (L) de la cavidad debe ser igual a un múltiplo entero de veces la media longitud de onda (λ) de la luz emitida.

Un sistema óptico de comunicaciones emplea un diodo laser con heteroestructura doble, cuando requiere una pequeña área de emisión, alta potencia de salida, un diagrama de radiación reducido, un ancho espectral muy angosto y alta velocidad de modulación. Pero hay un único inconveniente frente a tantas ventajas, la alta densidad de fotones en la región activa genera una gran cantidad de calor que es preciso evacuar con circuitería externa o dispositivos extras.

La estructura básica de un diodo laser, se ilustra en la figura 2.3.

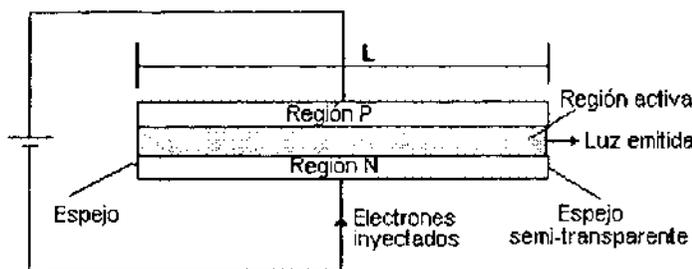


Figura 2.3 Estructura básica de un diodo laser [22]

Los fotones generados por la corriente inyectada al dispositivo, viajan a lo largo del área activa, pero son reflejados por los espejos colocados en los extremos. El proceso de agotamiento tiene lugar en ciertas longitudes de onda, relacionadas con la longitud L de la cavidad. Esto significa que L debe ser múltiplo de $\lambda/2$. Con base en la relación entre L y $\lambda/2$, la estructura simple del laser radia a cierto número de longitudes de onda.

La estructura de un diodo laser de heterounión es más compleja. En la figura 2.4 se observa la heteroestructura doble de un laser, formada por dos capas *P* y dos capas *N*, con diferente nivel de dopado. Una capa delgada de GaAs tipo *p* o *n*, con salto energético menor que el de las capas externas, se coloca en la región activa por ser un material altamente radiativo. Las capas *P*- y *N*-, son regiones con un ligero dopado y su índice de refracción n_2 , es menor al índice n_1 de la región activa. Estas tres capas forman una guía de onda (n_2, n_1, n_2) para confinar la luz generada a lo largo de la región activa.

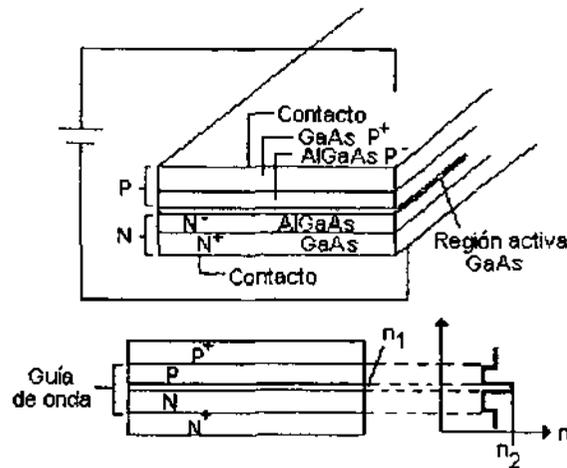


Figura 2.4 Heteroestructura doble de un diodo laser [22]

Para disminuir el número de los modos transversales, se reduce el ancho de la región activa; para disminuir el número de los modos longitudinales emitidos, se reduce la longitud de la cavidad resonante. Un diodo laser **multimodo** tiene diversas líneas espectrales que están relacionadas con los modos longitudinales de la cavidad resonante; un diodo laser que emite un sólo modo longitudinal, se llama **monomodo**.

2.1.2 Potencia emitida

Una de las características más importantes de un LED es la **eficiencia interna**, que relaciona la potencia eléctrica disipada y la potencia óptica generada internamente, no la emitida. En la práctica, la eficiencia interna varía entre el 50 y 80%; esto indica que aproximadamente el 50% de electrones inyectados en la estructura producen fotones.

Se define como:

$$\eta_q = \frac{P_{int}}{P_{el}} \quad (2.1)$$

Otro parámetro importante es la **eficiencia externa**, que relaciona la potencia óptica emitida por la fuente (P_{out}) y la potencia eléctrica disipada (P_{el}). Se define como:

$$\eta_{pr} = \frac{P_{out}}{P_{el}} \quad (2.2)$$

La luz emitida por el LED (P_{out}) es sustancialmente menor que la luz generada internamente (P_{int}), debido a las pérdidas existentes en las capas adyacentes a la región activa y a las

reflexiones causadas en la interfaz del acoplamiento. Sólo una pequeña fracción es emitida, del 0.5% al 5%.

2.1.3 Diagrama de radiación

En términos generales, un LED es una fuente Lambertiana, es decir, su intensidad está relacionada con el coseno del ángulo de la dirección; para $\theta=0$, dirección perpendicular a la superficie de emisión, la radiación es máxima y conforme aumenta el ángulo, disminuye la intensidad relativa.

En un diodo laser se distinguen dos ángulos, el de haz vertical y el haz horizontal, como se muestra en la figura 2.5. El ángulo del haz sólo puede medirse a cierta distancia de la superficie emisora (zona lejana).

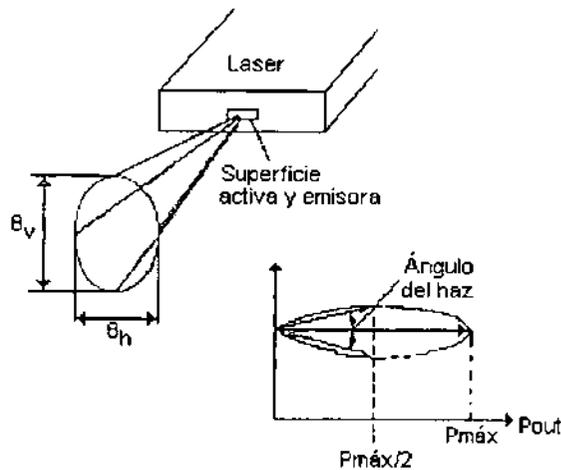


Figura 2.5 Ángulos de radiación de un diodo laser [28]

2.1.4 Espectro de radiación

En una fuente se diferencian dos parámetros espectrales: la **longitud de onda pico** (λ_p), que corresponde a la longitud de onda central del pico radiado y el **ancho espectral** ($\Delta\lambda$), que corresponde al rango de longitudes de onda emitido a media potencia.

El ancho espectral de un LED es relativamente más grande que el de un diodo laser. Es importante resaltar que a mayor ancho espectral, mayor la dispersión de la fibra óptica, lo que disminuye sustancialmente su ancho de banda y tasa de transmisión.

Algunos valores típicos del ancho espectral de las fuentes ópticas se muestra en la tabla 2.2

En un diodo laser, la longitud de onda central λ_p es muy sensible a las variaciones de temperatura y a los cambios de potencia emitida.

Las fuentes ópticas empleadas en sistemas de telecomunicaciones operan en el área infrarrojo del espectro electromagnético y operan en longitudes de onda compatibles con las ventanas de transmisión de la fibra óptica, es decir, en los 850, 1300 y 1550 nm.

2.1.5 Relación voltaje-corriente (V-I)

El LED y el diodo laser, tienen una relación voltaje-corriente (V-I) similar a la de un diodo. Sus valores típicos de voltaje y corriente, se reúnen en la siguiente tabla.

	Voltaje de ruptura (V_R)	Corriente de excitación (I_F)
LED	1.3 V – 2 V	50 mA – 100 mA
LD	1 V - 1.5 V	10 mA – 50 mA

Tabla 2.1 Valores típicos de voltaje y corriente.

2.1.6 Relación corriente - potencia óptica emitida

Una diferencia importante entre el LED y el diodo laser, es que el primero se utiliza para transmisiones digitales o analógicas, mientras que el laser es exclusivamente para aplicaciones digitales. La causa radica en sus relaciones corriente-potencia óptica emitida. El LED, como se ilustra en la figura 2.6, tiene una amplia región lineal que facilita la modulación analógica. En el laser, la región lineal es muy angosta como para permitir operación analógica. Cualquier desplazamiento en la corriente de polarización, distorsionará la proporcionalidad de la modulación. No así en aplicaciones digitales, ya que cualquier cambio en la corriente de polarización producirá ligeras variaciones en la potencia de salida.

Un parámetro que distingue al diodo laser, es la **corriente de umbral** I_{th} que se define como la mínima corriente de excitación requerida para producir el agotamiento. Para corrientes menores a I_{th} , el laser se comporta como un LED.

Estos valores han disminuido sustancialmente desde la fabricación de los primeros diodos laser, lo que simplifica la circuitería y reduce la disipación interna del dispositivo. El exceso de potencia disipada, incrementa la temperatura interna del diodo, desplaza su curva de potencia óptica de salida (P_{out}) vs. corriente de excitación (I_F) y afecta la corriente de umbral.

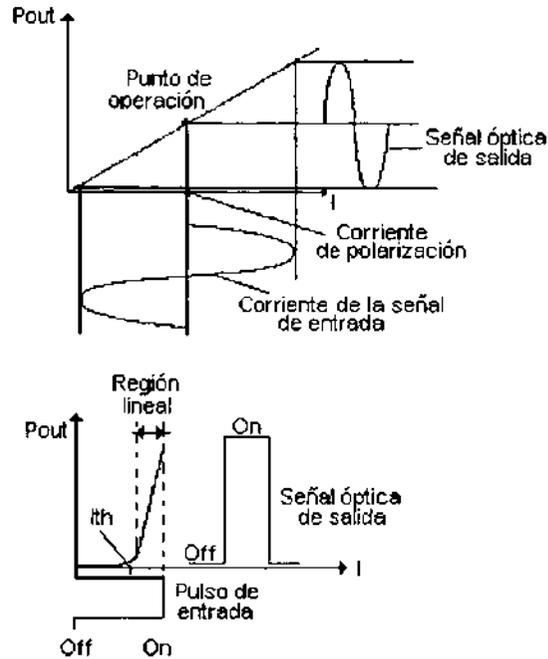


Figura 2.6 Relación corriente-potencia óptica emitida para un LED y un diodo laser [22]

2.1.7 Velocidad de modulación (tiempo de subida)

La **velocidad de modulación** es la velocidad a la cual se puede variar la intensidad de luz de la fuente; en el caso digital, se refiere a la conmutación entre ceros y unos.

El **tiempo de subida** (t_r) es el tiempo que le toma a la fuente llegar del 10% al 90% de su potencia óptica total. La relación entre el ancho de banda óptico y el tiempo de subida, está dado por:

$$B_{opt} = \frac{0.35}{t_r} \quad (2.3)$$

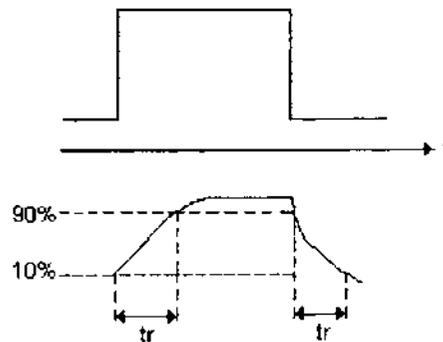


Figura 2.7 Tiempo de subida [22]

La modulación se realiza variando la corriente de excitación del diodo, para lo cual se utiliza un circuito que proporciona corriente modulada de niveles altos.

Sus valores típicos se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	LED	ELED	LASER
Ancho de banda	10-50 MHz	50-200 MHz	< 5 GHz
Potencia emitida (mW)	1	< 3	5 - 20
Longitud de onda (λ)	850 – 1300 nm	850 – 1300 nm	800 1550 nm
Ancho espectral ($\Delta\lambda$)	30 – 110 nm	10 – 50 nm	0.1 – 6 nm

Tabla 2.2 Parámetros típicos de las fuentes ópticas [22]

2.1.8 Circuitos de modulación. Estabilización de la potencia

Los circuitos de excitación para el LED y el diodo laser, convierten el voltaje de la señal a transmitir en una corriente modulada con un valor pico adecuado a las características normales de operación de la fuente óptica en uso.

Los LED son dispositivos más lineales que los diodos laser y, por consiguiente, se utilizan en la comunicación analógica. Mientras que los diodos laser emiten un flujo energético mayor, poseen un diagrama de radiación más directivo, un ancho espectral reducido y pueden modularse a muy altas frecuencias, por lo cual se emplean en comunicaciones digitales de alta capacidad. En ambos casos, el flujo energético emitido depende de la corriente que los atraviesa.

En la **modulación analógica**, se prefieren los LED debido a que son más lineales. A este dispositivo se le debe suministrar una corriente de polarización que fije el punto de operación y una corriente de modulación proporcional a la señal por transmitir. De esta forma, las variaciones de la señal transmitida causarán cambios en la intensidad de la luz transmitida por la fibra óptica.

En la **modulación digital**, se utilizan por igual los LED que los diodos laser. Un circuito de control de fuentes ópticas para modulación digital comprende:

- a) Un circuito de polarización
- b) Un convertidor voltaje-corriente muy rápido que convierta los pulsos de voltaje de la señal por transmitir en pulsos de corriente que modulen el flujo energético emitido. En el caso de un diodo laser, es necesario un circuito de estabilización del flujo, debido a la gran sensibilidad del valor del umbral laser con respecto a las variaciones de temperatura.

Este tipo de modulación se basa en la conmutación de la fuente, es decir, en el cambio entre dos estados: prendido y apagado. Para ello se utiliza un transistor que conmutado por una señal digital de entrada, polariza la fuente para que genere luz, a una velocidad determinada por la configuración del circuito y por las características del LED o diodo laser.

La mayoría de los circuitos que emplean diodos laser, están diseñados para estabilizar su corriente y minimizar los efectos de la temperatura. La figura 2.8 muestra el diagrama a bloques de un circuito estabilizador para un diodo laser.

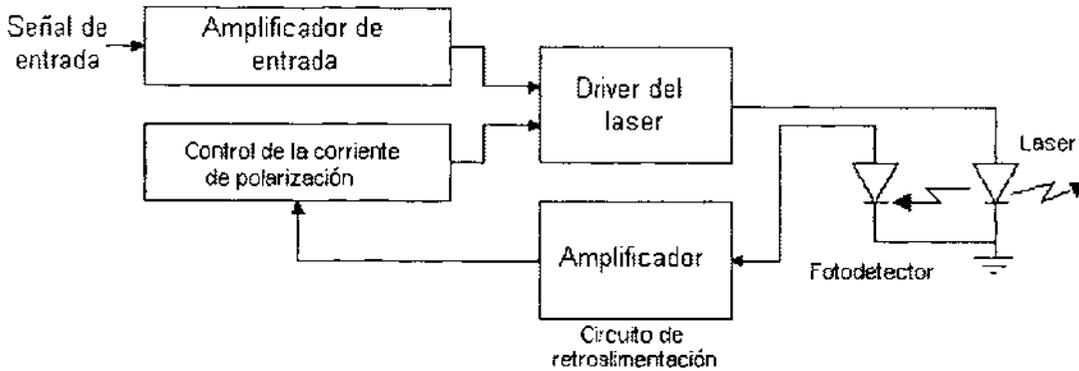


Figura 2.8 Diagrama a bloques de un circuito de estabilización de temperatura

El fotodetector se coloca en un circuito de retroalimentación para sensar la potencia de salida y asegurarse de que su valor no varíe con la temperatura. De ser así, el driver disminuye la corriente del diodo laser hasta que su potencia se estabilice.

El diseño de un circuito de modulación depende de múltiples factores y las opciones pueden ser infinitas [22,25]. El constante desarrollo de la óptica y de la electrónica, proponen continuamente cambios que mejoran sustancialmente la transmisión de la señal y disminuyen su consumo de potencia. De esta etapa depende que la señal llegue hasta el otro extremo del enlace y pueda ser recuperada para su posterior procesamiento.

2.2 RECEPTOR ÓPTICO

Un **fotodetector** realiza la función inversa de un LED: absorbe fotones y emite electrones para generar una corriente eléctrica. Cuando la luz penetra en el material semiconductor, ésta puede absorberse si la energía del fotón incidente es suficiente como para que los electrones suban de la banda de valencia a la banda de conducción. Si se recupera el electrón en un circuito exterior, antes de que se recombine con un hueco, hay producción de corriente eléctrica.

Un fotodetector deberá tener las siguientes características:

- Alta sensibilidad en su ancho de banda espectral de operación
- Un tiempo de respuesta corto
- Linealidad en la característica fotocorriente-potencia óptica
- Mínimo ruido interno

2.2.1 Tipo de fotodetectores

El tipo más sencillo de detector corresponde a la unión $p-n$ de un semiconductor, cuyo intervalo de energía entre la banda de valencia y la de conducción, es pequeño y permite que un fotón incidente en la unión tenga suficiente energía para crear un par electrón-hueco. Las cargas se mueven por el voltaje de polarización inverso, aplicado a través de la unión. La figura 2.9 muestra el diagrama de un fotodetector tipo $p-n$.

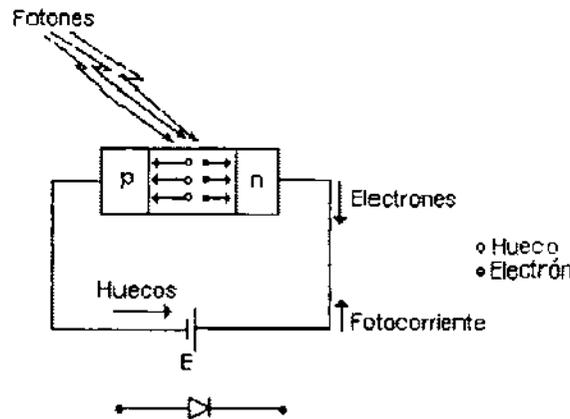


Figura 2.9 Fotodetector tipo $p-n$ [22]

Algunos fotones pueden ser absorbidos en las regiones p y n , fuera de la zona de transición. Las cargas regresan por difusión hacia esta zona, a una velocidad tan lenta que la mayoría se recombina en su trayectoria, contribuyendo muy poco a la generación de fotocorriente.

Se puede mejorar la eficiencia del detector con una estructura $p-i-n$, donde una región intrínseca se sitúa entre las otras dos. Al incrementar el área fotosensible del detector por la introducción de la región intrínseca, aumenta la sensibilidad y mejora el tiempo de respuesta del dispositivo. Estas son las dos principales ventajas del detector tipo $p-i-n$ sobre los tipo $p-n$.

Si a un dispositivo $p-i-n$ se le aplica un voltaje de polarización inverso, se crea una zona desértica (libre de portadores) en la región intrínseca. Cuando un fotón llega a esta zona, libera energía y excita a un electrón para que pase de la banda de valencia a la de conducción. Se generan entonces fotoportadores (pares electrón-hueco) que son separados por la fuerza de un campo eléctrico presente en esta región para generar fotocorriente.

La aplicación de altos voltajes de polarización inverso en la unión $p-n$, genera un campo eléctrico de gran intensidad que acelera a los fotoportadores, los cuales se desplazan rápidamente para liberar nuevos portadores secundarios que también son acelerados y producen nuevos portadores. Este mecanismo de multiplicación de cargas se conoce como **efecto avalancha** y sólo se produce si el campo eléctrico es superior al umbral de ionización del material; genera una corriente bastante elevada que está limitada por el creciente valor del ruido y la máxima capacidad de disipación del dispositivo [22]. El umbral depende de la banda prohibida del material escogido y de su nivel de impurificación.

Para un fotodetector de avalancha se maneja un **factor de multiplicación M** que se define como la relación entre la corriente suministrada por el diodo en régimen de avalancha y la corriente suministrada por el diodo en bajo voltaje, es decir, cuando no hay efecto avalancha y se define como:

$$I = MI. \quad (2.4)$$

I es la corriente producida por el diodo en avalancha,
 I_s es el valor de la corriente generada por el fotodiodo en respuesta al flujo energético, cuando funciona como un diodo común.

2.2.2 Sensibilidad del fotodetector

La **sensibilidad** del detector S_d se define como la relación entre la corriente eléctrica I_s suministrada por el detector y el flujo energético o potencia promedio P_0 que recibe, con unidades [A/W].

$$S_d = \frac{I_s}{P_0} \quad (2.5)$$

La sensibilidad del fotodetector aumenta junto con la longitud de onda, esto se debe al hecho de que hay más fotones por Watt en las grandes longitudes de onda, que en las pequeñas.

En un fotodiodo de avalancha, la corriente I que entrega el dispositivo, depende del factor de multiplicación M , de la forma:

$$S_d = \frac{I}{P_0} = \frac{M \cdot I_s}{P_0} \quad (2.6)$$

Por lo tanto, debe especificarse el valor de M para el cual se da la medida.

2.2.3 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta de un fotodiodo, lapso que tarda la señal en pasar del 10% al 90% de su valor máximo, depende de dos parámetros importantes:

- A. La capacitancia
 - B. El tiempo de tránsito de los portadores producidos.
- A. Un fotodetector polarizado inversamente tiene las características de un capacitor, donde las zonas impurificadas (p y n) constituyen las placas y la zona de transición es el dieléctrico, como se ilustra en la figura 2.10.

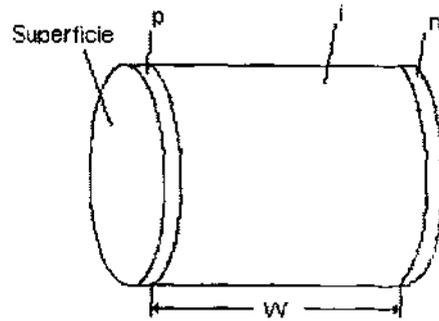


Figura 2.10 Capacitancia de un diodo *p-i-n*

Su capacitancia es igual a:

$$C = \epsilon \frac{A}{W} \quad (2.7)$$

ϵ es la permisividad dieléctrica del semiconductor,
 W es el ancho de la zona de transición o zona intrínseca,
 A es el área de la superficie del detector.

El fotodetector presenta también una resistencia R_s , llamada resistencia en serie, constituida por dos partes: la resistencia de la parte *n* y la resistencia entre el contacto eléctrico y la región *p*. La resistencia R_s y la capacitancia C , forman un circuito integrador RC. Se puede asociar a este circuito RC una constante de tiempo $\tau = R_s \cdot C$. La frecuencia de corte a -3 dB de este circuito paso bajo, es:

$$f_c = (2\pi\tau)^{-1} \quad (2.8)$$

El tiempo de subida t_r , está dado por:

$$t_r = 2.2\tau \quad (2.9)$$

Para aumentar f_c es necesario reducir R_s y C . C puede reducirse disminuyendo A o aumentando W ; sin embargo, A no puede tener un valor inferior a la sección de la fibra y W no debe ser muy grande porque aumenta el tiempo de difusión de los portadores. Estas dos condiciones demuestran la utilidad de la estructura *p-i-n* con respecto al ancho de la región de transición W .

B. Una vez formado un par electrón-hueco por la absorción de un fotón, el electrón y el hueco deben alcanzar los contactos para producir corriente eléctrica. Los portadores tardan un tiempo considerable según el lugar en que son generados.

En la zona de transición hay un campo eléctrico de gran intensidad; si éste es grande (mayor a 10^6 V/m), los portadores se mueven en la zona de transición con una velocidad límite v_l constante, del orden de $1 \cdot 10^5$ m/s para el Si, el Ge, el GaAs o InP. El tiempo máximo de tránsito t_t de los portadores, es el tiempo empleado en atravesar toda la zona de transición de longitud W , a la velocidad v_l , es decir:

$$t_t = \frac{W}{v_t} \quad (2.10)$$

Si los portadores se generan en una zona donde no hay campo eléctrico. Emigran hacia la zona de transición por el lento proceso físico de difusión. El tiempo t_d necesario para alcanzar la zona de transición depende de la distancia x entre la zona de absorción y la zona de transición, y de una constante D del semiconductor llamada difusividad de los portadores. Se tiene entonces:

$$t_d = \frac{x^2}{D} \quad (2.11)$$

A este tiempo de difusión, se asocia una frecuencia de corte de -3 dB, dada por:

$$f_c \approx \frac{2.9}{2\pi t_d} \quad (2.12)$$

con t_d evaluado para el mayor valor de x .

El tiempo de difusión es mayor al tiempo de tránsito, porque el primero es un fenómeno muy lento que es necesario evitar cuando la zona de transición es grande y las zonas impurificadas muy estrechas.

Para un fotodetector de avalancha, el tiempo de tránsito es aproximadamente el doble de un diodo $p-i-n$. El proceso avalancha tarda un cierto tiempo que puede, en algunos casos, afectar la rapidez del fotodiodo.

2.2.4 Corriente de oscuridad

Un fotodetector es un diodo polarizado inversamente. En la oscuridad, la corriente que circula en el diodo es la corriente inversa o corriente de saturación I_s ; se origina por razones térmicas y disminuye si se limita la superficie del diodo (A). Esta corriente varía con la temperatura proporcionalmente a $I_s = b \cdot e^{-E_g/2kT}$ donde b es una constante de proporcionalidad, E_g es la energía de la banda prohibida, T es la temperatura absoluta y k la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), lo cual provoca que entre más grande sea E_g , menor es la corriente de oscuridad. Resulta también que la corriente de oscuridad aumenta rápidamente con la temperatura.

A esta corriente de saturación es necesario agregar una corriente de fuga (I_f) que circula en la superficie y no en el volumen del semiconductor.

La corriente de oscuridad resulta igual a:

$$I_o = I_s + I_f \quad (2.13)$$

De modo similar a un fotodiodo *p-i-n*, un fotodetector de avalancha tiene una corriente de oscuridad I_o , causada simultáneamente por la creación térmica de portadores minoritarios (I_i) y por fugas en la superficie (I_f). La corriente I_i experimenta multiplicación por avalancha, mientras que la corriente I_f que circula en la superficie, no se ve afectada por la multiplicación.

$$I_o = M I_i + I_f \quad (2.14)$$

2.2.5 Circuitos de detección. Tipos de preamplificador

El flujo energético acoplado al detector óptico es en general muy pequeño, al igual que la corriente suministrada por el fotodiodo. Para utilizar la señal en etapas posteriores, debe amplificarse con un circuito de detección, formado por el detector óptico y un preamplificador [22].

En sistemas ópticos, se distinguen dos tipos:

1. Amplificador de voltaje
2. Amplificador de impedancia de transferencia de ganancia elevada

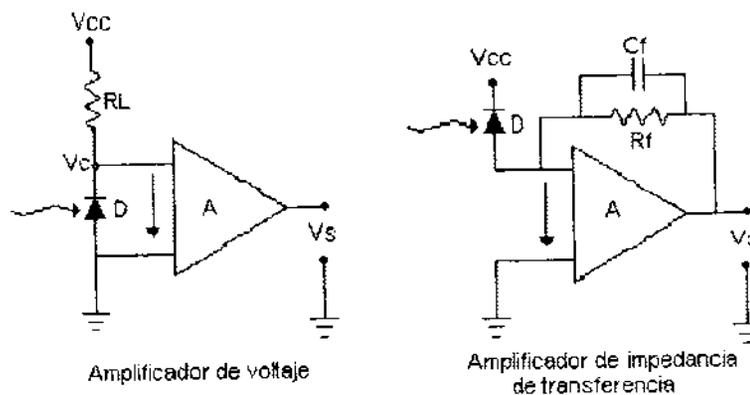


Figura 2.11 Preamplificadores para fotodetectores

Los preamplificadores empleados en la fotodetección deben tener una impedancia de entrada muy alta para limitar la generación de ruido, pero esta impedancia también significa una limitación en la banda de paso; deberán ser altamente sensibles, poseer un amplio ancho de banda o un tiempo de subida rápido y ser compatibles con la longitud de onda del dispositivo óptico transmisor.

2.2.6 Respuesta en frecuencia

Para conocer la respuesta en frecuencia del conjunto fotodetector-preamplificador, se analizarán los dos tipos mencionados anteriormente.

En corriente alterna, un **fotodiodo** puede representarse como un generador de corriente que entrega una corriente I_s , inducida por el flujo energético, en paralelo con la capacitancia C del fotodiodo cuyo valor depende del voltaje de polarización inverso. La resistencia dinámica R_p del fotodiodo, al voltaje de polarización elegido, es muy grande; mientras que

la resistencia en serie R_s , que incluye la resistencia de los contactos y del sustrato, es pequeña. El diagrama eléctrico equivalente de un fotodiodo es el siguiente:

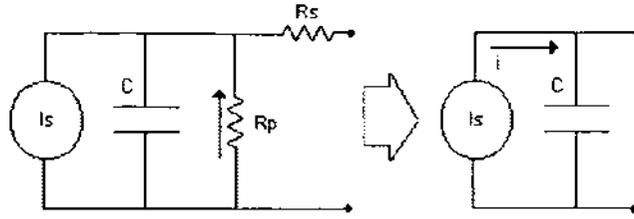


Figura 2.12 Diagrama eléctrico equivalente de un fotodiodo

1. Un **amplificador de voltaje** tiene una impedancia de entrada que se representa por una resistencia R_e en paralelo con una capacitancia C_e . Esta impedancia está en paralelo con la resistencia de carga R_L . El amplificador tiene una banda de paso f_o y una ganancia A , como se muestra en la figura 2.13.

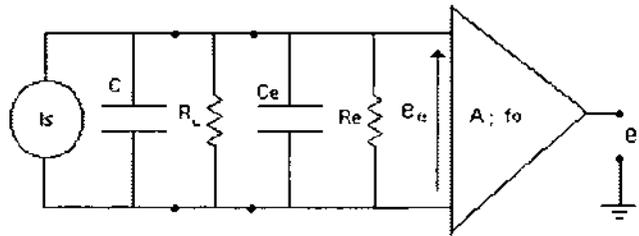


Figura 2.13 Diagrama eléctrico equivalente de un fotodiodo y un preamplificador de voltaje

Para este circuito tenemos a la entrada un filtro paso bajo con $e_e = R \cdot i_s$, donde $R = R_L // R_e$. La frecuencia de corte es:

$$f(-3dB) = \frac{1}{2\pi R(C + C_e)} \quad (2.15)$$

y el voltaje de salida es $e_s = A \cdot e_e$

2. Un **amplificador de impedancia de transferencia**, tiene una resistencia R_e en paralelo con la capacitancia C_e , y juntos determinan la impedancia de entrada del amplificador operacional. A diferencia del caso anterior, tiene una resistencia R_f y un capacitor C_f de retroalimentación. El voltaje de salida es $e_s = -i_s \cdot R_f$ y la frecuencia máxima de corte del conjunto es:

$$f_o(-3dB) = \left[\frac{G \cdot BP}{2\pi R_e (C + C_e)} \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

donde $G \cdot BP$ es el producto ganancia-ancho de banda del amplificador operacional y se ha hecho con $C_f=0$. Tomando en cuenta el condensador C_f en paralelo con R_f , la frecuencia de corte es:

$$f_c(-3dB) = \frac{1}{2\pi R_f \cdot C_f} \quad (2.17)$$

Se debe tener $f_o > f_c$; este valor representa la frecuencia de la señal B_s ,

2.2.7 Ruido en la recepción

Como se mencionó anteriormente, en un sistema de telecomunicaciones por fibra óptica, el flujo energético acoplado al detector es muy pequeño, al igual que la corriente suministrada por el fotodiodo. Si el fotodetector entrega al mismo tiempo una corriente diferente a la de la señal y de naturaleza aleatoria (**ruido**), la información contenida en I_s puede ser prácticamente irrecuperable.

La amplitud de la corriente del ruido determina el flujo energético mínimo detectable por el fotodetector. Esta noción de flujo mínimo detectable, el cual depende de la sensibilidad del detector y del ruido, es fundamental ya que impone un límite a la longitud del enlace de telecomunicación. De ahí la importancia del ruido en la caracterización de un fotodetector. Cuando la señal es muy pequeña, es necesario amplificarla, por lo que el detector siempre va asociado a un preamplificador que también constituye una fuente de ruido [28].

En la recepción se distinguen tres **fuentes de ruido**:

- a) En el fotodetector
- b) En la resistencia de carga
- c) En el preamplificador

a) El **ruido del fotodetector** tiene dos orígenes principales:

✓ **Ruido cuántico debido a la corriente de señal I_s : $\langle i_s^2 \rangle$**

El flujo energético absorbido por el fotodetector está constituido por fotones. La transformación fotón-electrón es de naturaleza estadística ya que presenta fluctuaciones alrededor de un valor medio expresado por la relación $I_s = S_d P_0$. A las variaciones aleatorias de la intensidad de la corriente I_s alrededor de su valor medio, se le llama **ruido** y, debido a la naturaleza cuántica del flujo energético, se designa como **ruido cuántico**.

En un fotodiodo, el ruido cuántico es igual a:

$$\langle i_s^2 \rangle = 2eI_s M^{2+x} B_s \quad (2.18)$$

✓ **Ruido debido a la corriente de oscuridad I_0 : $\langle i_o^2 \rangle$**

Se sabe que la corriente de oscuridad se compone de una corriente de saturación I_t de origen térmico, y de una corriente de fuga I_f que circula en la superficie.

En un fotodiodo, el valor medio de la corriente de oscuridad es igual a:

$$\langle i_o^2 \rangle = \langle i_t^2 \rangle + \langle i_f^2 \rangle \quad (2.19)$$

donde

$$\langle i_t^2 \rangle = 2eIM^{2+x}B_N \quad (2.20)$$

$$\langle i_f^2 \rangle = 2eIB_N \quad (2.21)$$

De las relaciones anteriores:

e es la carga del electrón 1.6×10^{-19} A·s

P_0 es el flujo óptico promedio que llega al fotodetector

I_s es el valor de la corriente generada por el fotodiodo en respuesta al flujo energético P_0 , I_0 es la corriente de oscuridad, I_t es la parte de origen térmico e I_f es la parte de la corriente superficial.

M es el factor de multiplicación (ganancia) de un fotodiodo avalancha

x es el factor de exceso de ruido de multiplicación

B_N es la banda efectiva del ruido.

La **banda efectiva del ruido B_N** no es igual a la banda de paso a -3 dB ($f-3$ dB) de la función de transferencia de un filtro pasa bajos o de un amplificador. Es la de un filtro de "característica rectangular" que da la misma potencia de ruido que la que se tiene después de aplicar la función de transferencia del amplificador.

Si ésta es de primer orden: $B_N = \pi/2(f-3dB)$ (2.22); para filtros de orden superior (más rectangulares): $B_N \approx (f-3dB)$ (2.23)

Al comparar estos ruidos con los de un fotodiodo $p-i-n$, se constata que $\langle i_f^2 \rangle$ no ha cambiado porque la corriente no se ve afectada por el proceso de multiplicación. Por el contrario, $\langle i_s^2 \rangle$ e $\langle i_t^2 \rangle$ están multiplicados por el factor M^{2+x} a causa de la amplificación. Si este fenómeno no fuera aleatorio y no introdujera ruido suplementario, se tendría $x=0$. Si los coeficientes de ionización de los electrones y de los huecos son iguales en un material dado, entonces $x=1$. Mientras más grande sea la diferencia entre estos coeficientes, más pequeña será x y, por tanto, el fenómeno de avalancha contribuirá, en menor medida, al ruido.

b) Ruido de la resistencia de carga

El movimiento aleatorio de los electrones en una resistencia, es una fuente de ruido de origen térmico y es ruido blanco. Para este dispositivo el promedio del cuadrado de la amplitud de esa corriente de ruido sobre un gran periodo de tiempo, es:

$$\langle i_r^2 \rangle = \frac{4kTB_N}{R} \quad (2.24)$$

k es la constante de Boltzman $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T es la temperatura absoluta de la resistencia en grados Kelvin

B_N es la banda efectiva de ruido (Hz)

c) Ruido del preamplificador

En el amplificador se agrega un ruido $\langle i_A^2 \rangle$ al ruido térmico, que se representa con el factor de ruido F .

$$\langle i_A^2 \rangle = \frac{4kTB_N(F-1)}{R} \quad (2.25)$$

El valor de R varía dependiendo del tipo de preamplificador como:

$\frac{1}{R} = \frac{R_L + R_c}{R_L \cdot R_c}$	amplificador de voltaje (2.26)
$R = R_c$	amplificador de impedancia de transferencia (2.27)

Para minimizar este ruido, se escoge la resistencia de carga R más grande, siempre y cuando sea compatible con el ancho de banda del sistema; es decir, para un amplificador de voltaje:

$$R = \frac{1}{2\pi B_N(C + C_c)} \quad (2.28)$$

En este caso se dice que la resistencia de carga ha sido optimizada.

La corriente de ruido del circuito de amplificación con resistencia de carga óptima, es la suma de las corrientes de ruido térmico y del amplificador:

$$\langle i_c^2 \rangle = \langle i_R^2 \rangle + \langle i_A^2 \rangle = \frac{4kTB_N F}{R} \quad (2.29)$$

En resumen, si todas las fuentes de ruido son aleatorias y sin correlación, entonces la potencia total de ruido $\langle i_T^2 \rangle$, se define como:

$$\langle i_T^2 \rangle = \langle i_s^2 \rangle + \langle i_o^2 \rangle + \langle i_c^2 \rangle \quad (2.30)$$

2.2.8 Tasa de errores y umbral de detección para un sistema digital

Los parámetros fundamentales que determinan la calidad de una transmisión digital, son la tasa de errores de los bits (BER, Bit Error Rate) y el umbral de detección P_{om} . El primero depende del ruido y es igual a la probabilidad de que ocurra un error de decisión, mientras

que el segundo se define como el flujo energético mínimo necesario para tener una BER determinada.

El valor de la BER se encuentra a partir del coeficiente Q, un coeficiente que relaciona el umbral de detección ($I_c/2$) y la corriente total de ruido para cada estado de la señal; se escribe como:

$$Q = \frac{I_c}{\sqrt{\langle i_T^2 \rangle_h} + \sqrt{\langle i_T^2 \rangle_b}} \quad (2.31)$$

El flujo energético posee un valor pico $P_c = 2P_o$ durante el estado alto (h) y un valor nulo durante el estado bajo (b). La corriente producida por un fotodiodo de avalancha, tiene entonces un valor pico I_c , de:

$$I_c = MS_d P_c \quad (2.32)$$

De la misma forma, durante un estado alto, la corriente total de ruido es la suma de la corriente de ruido de granalla de la señal $\langle i_s^2 \rangle$, del ruido de oscuridad $\langle i_o^2 \rangle$ y del ruido del circuito $\langle i_c^2 \rangle$. Durante un estado bajo, la corriente de señal que produce el fotodiodo es nula y la corriente total de ruido es sólo el ruido de oscuridad y el ruido del circuito.

$$\begin{aligned} \langle i_T^2 \rangle_h &= \langle i_s^2 \rangle + \langle i_o^2 \rangle + \langle i_c^2 \rangle \\ \langle i_T^2 \rangle_b &= \langle i_o^2 \rangle + \langle i_c^2 \rangle \end{aligned} \quad (2.33)$$

Para determinar el umbral de detección a partir de una BER fija, haciendo $M=1$ para un fotodiodo p-i-n y $M>1$ para un fotodiodo de avalancha, se despeja $P_o = P_{om}$ de la ecuación 2.31, término que se encuentra tanto en el numerador como en el denominador.

En este cálculo se pueden presentar diferentes casos, el primero sucede cuando la corriente de la señal es despreciable y la corriente total en estado alto es similar a la de estado bajo; es decir:

$$\sqrt{\langle i_T^2 \rangle_h} \approx \sqrt{\langle i_T^2 \rangle_b} \approx \sqrt{\langle i_c^2 \rangle} \quad (2.34)$$

En ambos estados de transmisión predomina el ruido del circuito sobre la señal y el flujo energético promedio P_o es igual a:

$$P_o = \frac{Q}{MS_d} \sqrt{\langle i_c^2 \rangle} \quad (2.35)$$

Cuando la señal no es despreciable con respecto al ruido del circuito, como sucede con un diodo de avalancha, se tiene:

$$P_o = \frac{eQ}{S_d} \left[QM^x B_N + \frac{\sqrt{\langle i_c^2 \rangle}}{eM} \right] \quad (2.36)$$

Para este caso, existe un valor óptimo del factor de multiplicación M , que minimiza el flujo energético necesario para una BER determinada y se obtiene al derivar P_o con respecto a M , buscando el valor de M que anula la derivada, como:

$$M_{opt} = \left[\frac{\langle i_c^2 \rangle}{exQB_N} \right]^{1/1+x} \quad (2.37)$$

Este valor de M_{opt} sustituido en la ecuación 2.36, proporciona el flujo energético mínimo o umbral de detección para un valor de Q fijo.

En conclusión, con resistencia de carga y factor de multiplicación optimizados, y con la banda de paso de ruido B_N , el flujo energético mínimo para un fotodiodo $p-i-n$ y para uno de avalancha, se rige respectivamente por las siguientes fórmulas:

$$P_{om} = \frac{eQ}{2S_d} \cdot B_s \left[Q + \frac{\sqrt{8\pi kTF(C+C_c)}}{e} \right] \quad (2.38)$$

$$P_{om} = \frac{x+1}{2x} \frac{R_s}{S_d} \left[Q^{2+x} ex(8\pi kTF(C+C_c))^{x/2} \right]^{1/1+x} \quad (2.39)$$

El análisis del detector implica profundizar en el diseño del amplificador y en las características técnicas del fotodiodo, para conocer principalmente su comportamiento en términos de potencia y tasa de errores. Los dos componentes pasivos estudiados en este capítulo influyen significativamente en el enlace total y son los responsables directos, junto con la fibra óptica, de la capacidad del medio y la calidad de la transmisión.

A continuación se examinará el funcionamiento del canal óptico, sus características y principios, así como sus efectos en el cálculo del enlace para un sistema de videoconferencia.

PCAPÍTULO 3. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CON FIBRA ÓPTICA.

Los continuos progresos en la tecnología fotónica, principalmente en la fabricación de mejores fibras ópticas de baja atenuación, permiten la implantación de sistemas de telecomunicación que emplean este delgado filamento de vidrio como canal de transmisión. Antes de adoptarla como tal en un sistema de videoconferencia, es importante conocer las ventajas potenciales de su uso, sus principios básicos de funcionamiento y características esenciales, como se hace en el presente capítulo.

3.1 FIBRA ÓPTICA

3.1.1 Estructura de la fibra óptica y ventajas potenciales de su uso

La fibra óptica es el elemento pasivo de un enlace y estructuralmente se compone de un conductor central o **núcleo**, elaborado de vidrio de cuarzo o de plástico, rodeado uniformemente por un material cuyo índice de refracción es menor, al que se le llama **cubierta**. Es justamente la diferencia entre los índices de refracción lo que permite que un rayo de luz incidente no escape de la fibra sino que rebote en la frontera del núcleo y la cubierta, para que siga su camino a lo largo de ésta.

Las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza, con un grosor similar al de un cabello humano. Son fabricadas a alta temperatura con base en silicio; el proceso de elaboración es controlado por medio de computadoras para evitar las impurezas y lograr que los índices de refracción sean uniformes.

Con respecto a los sistemas tradicionales de comunicación que emplean cable coaxial o de cobre, los sistemas por fibra óptica poseen ciertas características que las hacen un excelente medio de transmisión. Algunas de sus ventajas sobre otro tipo de cables, son:

Ancho de banda: la capacidad potencial de transportar información crece con el ancho de banda del medio de transmisión y con la frecuencia de la portadora.

Las fibras ópticas tienen un ancho de banda experimental que alcanza 1 THz, maneja altas tasas de transmisión y por ende transporta grandes volúmenes de información.

Bajas pérdidas: las pérdidas limitan la distancia a la cual la información puede ser enviada. En un cable de cobre, la atenuación crece con la frecuencia de modulación. En una fibra óptica, las pérdidas son las mismas para cualquier frecuencia de la señal, lo que permite entregarla de manera confiable al extremo opuesto, después de atravesar grandes distancias.

Inmunidad electromagnética: la fibra no irradia ni es sensible a las radiaciones electromagnéticas, esto las hace un medio de transmisión ideal cuando el problema a considerar son las interferencias electromagnéticas. Además, como están hechas de materiales aislantes (vidrio, plástico), no conducen electricidad, no son

corrosivas, son inalterables por sustancias químicas y no producen chispas o cortocircuitos que ocasionen graves daños.

Seguridad: Es extremadamente difícil intervenir una fibra, y virtualmente imposible hacer la intervención indetectable, por ello es altamente utilizada en aplicaciones militares.

Bajo peso: Un cable de fibra óptica, aun cuando reúna a varias fibras en el mismo cable, es delgado y muy ligero. Esto facilita su instalación y libera espacio en los ductos que la conducen.

Entre las limitaciones que presenta su uso, se encuentra su reducida movilidad en comparación con los sistemas de radiocomunicación, la dificultad de constituir sistemas multipunto por los grandes niveles de atenuación que introducen las derivaciones pasivas, la no linealidad de los dispositivos ópticos y el más importante, su precio, que excede por mucho el costo de un cable coaxial o de cobre. Sin embargo, como es común en el área de las telecomunicaciones, con el tiempo disminuyen los costos y su uso se hace cada vez más accesible.

Originalmente, la fibra óptica fue propuesta como medio de transmisión debido a su ilimitado ancho de banda; sin embargo, con el tiempo se ha planteado su uso en un amplio rango de aplicaciones además de las comunicaciones, entre ellos la automatización industrial, la computación, los sistemas de televisión, los servicios militares, la transmisión de información astronómica y la medicina, entre otros.

3.1.2 Teoría de reflexión y refracción de la luz

La luz es una onda descrita por tres parámetros: longitud de onda (λ), frecuencia (f) y velocidad (v), que se relacionan como:

$$v = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

Su velocidad de propagación en el vacío (c), es aproximadamente igual a 300,000 km/s. En un medio dieléctrico, se propaga a una velocidad (v) menor. La relación entre estas dos velocidades se llama **índice de refracción** (n) del dieléctrico y es un parámetro que caracteriza al medio. Se tiene entonces:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{con } n > 1 \quad (3.2)$$

Cuando la luz incide en la superficie de separación que existe entre dos medios diferentes, su dirección inicial sufre una desviación y el rayo se puede reflejar o refractar, de acuerdo con las propiedades de la geometría óptica [22].

La **ley de la reflexión** establece que si la luz incide sobre una superficie plana reflectora, por ejemplo un espejo metálico, el ángulo de reflexión θ_r , es igual al ángulo de incidencia θ_i , medidos desde una normal a la superficie.

La **ley de la refracción** indica que la luz se desvía cuando atraviesa la interfaz de dos medios dieléctricos con diferentes índices de refracción (n_1 y n_2), de tal forma que la relación entre el seno del ángulo de incidencia θ_1 y el seno del ángulo de refracción θ_2 , es constante y está definida por la **ley de Snell** como:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ó} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.3)$$

Cuando la luz pasa de un medio dieléctrico con índice n_1 a otro medio con índice n_2 , se tienen dos casos para la ley de la refracción:

\Rightarrow Si $n_1 < n_2$, existe un valor máximo del ángulo de refracción θ_{2c} que corresponde a un ángulo de incidencia de $\theta_1 = 90^\circ$. Este valor máximo se conoce como ángulo crítico de refracción y está dado por:

$$\theta_{2c} \leq \arcsen \frac{n_1}{n_2} \quad (3.4)$$

\Rightarrow Si $n_1 > n_2$, para un ángulo de refracción $\theta_2 = 90^\circ$ corresponde un ángulo crítico de incidencia θ_{1c} conocido como ángulo mínimo de reflexión total interna, dado por:

$$\theta_{1c} \geq \arcsen \frac{n_2}{n_1} \quad (3.5)$$

Esto indica que si la luz alcanza la interfaz con un ángulo superior a θ_{1c} , ya no se refracta, por el contrario, se refleja totalmente en el medio original con índice n_1 y se tendrá entonces una **reflexión total interna**.

3.1.3 Propagación de la luz y apertura numérica de la fibra óptica

Para que la luz se propague y permanezca dentro del canal de transmisión, debe sufrir reflexiones cada vez que llegue a la interfaz entre la fibra y el medio exterior. La superficie no debe tener defectos, de lo contrario la luz puede refractarse fuera de la fibra y, en consecuencia, perderse.

Este inconveniente se evita al envolver la fibra con otro material dieléctrico para formar dos círculos concéntricos. El cilindro interno, con índice n_1 , se llama **núcleo** de la fibra y el cilindro externo, con índice n_2 (menor que n_1), se conoce como la **cubierta** de la fibra.

La luz que se propaga en este medio, cumple las condiciones de la **reflexión total interna**, es decir, llega a la interfaz con un ángulo superior al ángulo crítico θ_{1c} . Además, esta forma de confinar la luz dentro de la fibra, se hace por reflexiones sin pérdidas, razón por la cual se utiliza confiablemente en transmisiones a larga distancia [22].

La figura 3.1 ilustra el corte longitudinal de una fibra óptica y la propagación de la luz a través de la reflexión total interna.

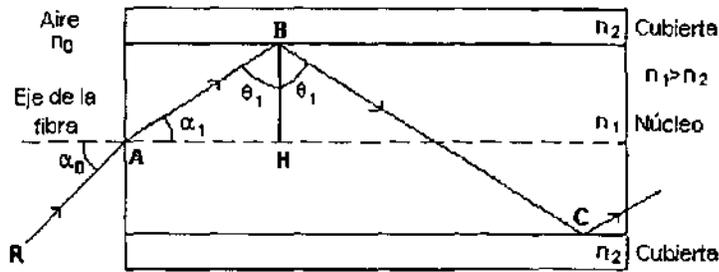


Figura 3.1 Corte longitudinal de una fibra óptica y propagación de la luz

En el punto A, en la interfaz aire-núcleo de la fibra, un rayo luminoso se refracta y continúa su trayectoria con un ángulo α_1 menor al ángulo de entrada α_0 . El rayo llega al punto B, a la interfaz núcleo-cubierta, con un ángulo mayor al ángulo crítico y experimenta una reflexión total, este fenómeno se repite sucesivamente y hace que la luz se propague en zigzag hasta el extremo opuesto de la fibra óptica.

La propagación de la luz dentro de la fibra óptica, a través de una sucesión de reflexiones totales, sólo existe para la incidencia de rayos luminosos con ciertos valores del ángulo de entrada α_0 .

En el punto A de la figura 3.1, la ley de Snell indica que:

$$n_0 \text{sen } \alpha_0 = n_1 \text{sen } \alpha_1 \quad (3.6)$$

Con base en esta misma figura, la ecuación anterior también puede escribirse como:

$$n_0 \text{sen } \alpha_0 = n_1 \text{sen } \alpha_1 = n_1 \cos \theta_1 \quad (3.7)$$

Por otro lado, para tener reflexiones totales a partir del punto B, se debe cumplir:

$$\text{sen } \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1} \quad (3.8)$$

Como $\text{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$, esta condición se escribe también de la forma:

$$\cos \theta_1 \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (3.9)$$

De las ecuaciones 3.6 y 3.9 se obtiene:

$$n_0 \text{sen } \alpha_0 \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.10)$$

La desigualdad indica el valor máximo del ángulo de entrada α_0 para que la luz pueda reflejarse sucesivamente y por consecuencia, propagarse.

Esta luz contenida en un espacio tridimensional cuyo ángulo medio al vértice es $\alpha_{om} = \arcsen \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ para $n_0=1$, se llama **cono de admisión** y se ilustra en la figura 3.2.

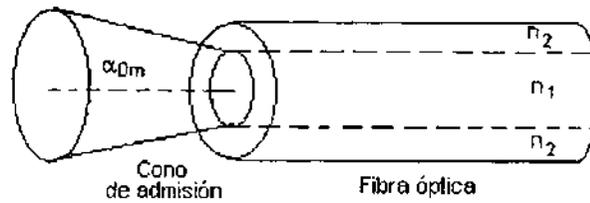


Figura 3.2 Cono de admisión

Con base en el mismo desarrollo, se define un parámetro llamado **apertura numérica** de la fibra óptica, dado por la ecuación:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_0 \text{ sen } \alpha_{0m} \quad (3.11)$$

Este parámetro también puede expresarse en términos de la **diferencia relativa de índices** entre el núcleo y la cubierta, definido por:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (3.12)$$

En el caso en que $n_1 \cong n_2$, la AN puede escribirse como:

$$AN = \sqrt{2\Delta}n_1^2 = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3.13)$$

La apertura numérica, es un parámetro que determina la capacidad de una fibra óptica para recolectar la luz y propagarla. De tal forma que una fibra con AN de 0.3, propaga toda la luz que incide en su entrada con un ángulo menor que 17.5° . Cabe resaltar que este parámetro depende de los índices de refracción de la fibra, pero no de sus dimensiones físicas [30].

3.1.4 Modos de propagación, acoplamiento de modos y distancia de equilibrio

No todas las direcciones de propagación contenidas en el cono de aceptación, pueden ocurrir en la realidad. La naturaleza ondulatoria de la luz hace que existan interferencias entre diversas ondas en el interior de la fibra óptica. Para que exista propagación efectiva de energía, estas interferencias deben ser constructivas, es decir, que no se anulen los campos eléctricos o magnéticos entre sí.

Las direcciones de propagación realmente permitidas y deducidas a través de un análisis de óptica ondulatoria, constituyen lo que se llama **modos de propagación**. A cada modo de orden m , le corresponde un valor de θ que debe satisfacer igualmente la condición de la reflexión total (3.5) y la condición para la propagación de un haz en un plano meridional de la fibra con interferencia constructiva, que a continuación se indica:

$$2\varphi_1 + 4\pi m \frac{d}{\lambda} \cos\theta = 2\pi m \quad \text{con } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.14)$$

donde ϕ_1 es el defasamiento introducido por la reflexión total, d es el diámetro del núcleo de la fibra, n_1 es el índice de refracción del núcleo y λ es la longitud de onda de la luz que se inyecta al canal.

Los modos con un **ángulo de propagación** cercano al ángulo α_{0m} , se **llaman modos de orden alto**. Los que corresponden a un ángulo de propagación cercano a cero, se **llaman modos de orden bajo**.

De ambas condiciones se concluye que se puede aumentar el número de modos de propagación, si se incrementa el diámetro (d) del núcleo de la fibra o el ángulo mínimo de reflexión total interna (θ_{1c}).

En una fibra ideal, al inyectar luz en determinada dirección, se introduce un modo bien definido que se recobra al final de la fibra. Pero en la práctica, una fibra presenta microcurvaturas, macrocurvaturas y centros de difusión, que producen una mezcla entre las diversas direcciones o ángulos de propagación permitidos. En esas condiciones se dice que hay conversión o **acoplamiento de modos**.

Estos defectos en la fibra ocasionan que un modo de orden elevado se convierta en uno de orden bajo, y viceversa, que algún modo se atenúe totalmente o que el modo inicial se transforme en varios al chocar con un centro de difusión.

La distribución de los modos o la cantidad relativa de energía óptica acarreada por cada modo, se ve sustancialmente alterada por el acoplamiento. Sin embargo, esta distribución de energía encuentra un estado estable cuando alcanza la **distancia de equilibrio** de la fibra. Esto significa que la distribución de los modos es relativamente constante a partir de este punto.

La distancia de equilibrio varía desde unos cuantos metros hasta algunos kilómetros, según la calidad de la fibra y la longitud de onda de la luz inyectada. Por ejemplo, si es de mala calidad, tiene una distancia de equilibrio corta y el acoplamiento de modos tiene lugar pocos metros después del inicio [22].

3.1.5 Frecuencia normalizada

En vista de que existe una gran variedad de fibras con diferentes características, es conveniente generalizar y comparar los fenómenos de propagación de cada una; con este propósito se introduce un parámetro llamado **frecuencia normalizada** V , definida como:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2\pi \frac{a}{\lambda} AN \quad (3.15)$$

La función V relaciona el radio del núcleo a , los índices de refracción de la fibra y la longitud de onda (λ) de la luz inyectada al canal.

3.1.6 Tipos de fibras ópticas

Son dos los parámetros que caracterizan a una fibra óptica:

- El número de modos de propagación
- El perfil del índice de refracción

El primer parámetro se calcula a través de la frecuencia normalizada V . Para diferentes valores de n_1 , n_2 y de a , que hacen a $V \leq 2,405$, resulta la transmisión de un modo fundamental, por lo que se llaman fibras **monomodo**. Por el contrario, si $V \gg 2,405$, aumenta en miles el número de modos transmitidos y la fibra se conoce como **multimodo**.

El **perfil del índice de refracción**, es la variación del índice con respecto al radio. Este segundo parámetro determina el comportamiento de la fibra durante la propagación de los modos.

A. Fibras multimodo

• Fibra óptica de índice escalonado

Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio o de plástico; se llama así porque su índice de refracción experimenta un salto al pasar del núcleo a la cubierta. Los modos se propagan por reflexión total, en trayectorias tipo zigzag.

La fibra de índice escalonado y su perfil de índice se muestran en la figura 3.3.

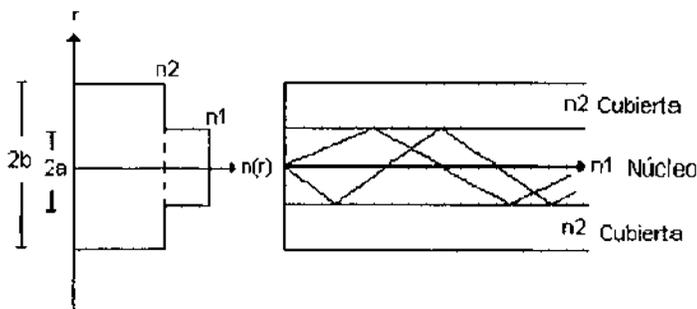


Figura 3.3 Fibra de índice escalonado

Físicamente es la más simple pero también la menos eficiente. Se utilizan para transmisiones de corta distancia. Sus características más importantes, se muestran en la tabla 3.1.

Dependiendo del valor de su AN, este tipo de fibras puede propagar una gran cantidad de modos, por lo cual aumenta su dispersión modal y disminuye notablemente su capacidad para transmitir información.

- **Fibra óptica de índice gradual**

Es la fibra cuyo índice aumenta gradualmente de la cubierta hacia el centro del núcleo; la variación no es continua, aumenta en forma de pequeños saltos sucesivos. Un caso específico se muestra en la figura 3.4.

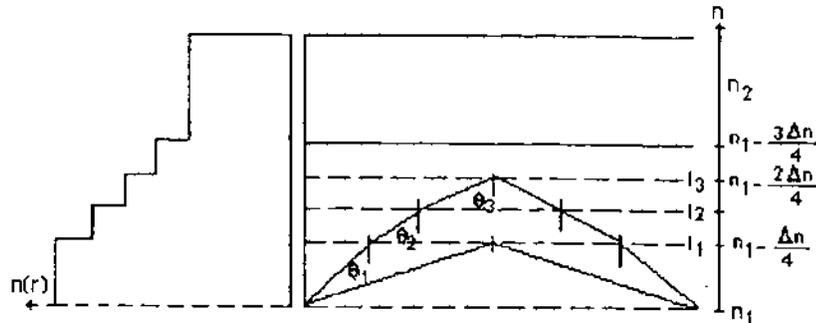


Figura 3.4 Modos de propagación en una fibra de índice gradual

El índice tiene saltos sucesivos igualmente espaciados, de tal forma que la luz parte del eje del núcleo y en su trayectoria encuentra escalones de diferente índice. Al llegar a cada interfaz, la luz se refracta y deja esta frontera con un ángulo superior al ángulo de incidencia. Cuando el rayo alcanza la última interfaz, el ángulo es lo suficientemente grande como para reflejarse totalmente y regresa hacia el eje de la fibra refractándose nuevamente en cada frontera. De ahí que la propagación de los modos sea en trayectorias con curvatura gradual, como se muestra en la figura 3.5

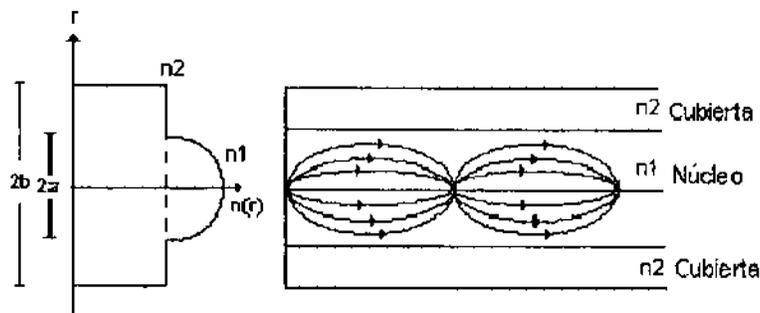


Figura 3.5 Fibra de índice gradual

Este tipo de fibra es más difícil de fabricar pero es más eficiente. Se utiliza para enlaces de alta capacidad de información. Sus características más importantes, se muestran en la tabla 3.1.

La dispersión modal en la fibra de índice gradual con perfil óptimo, es mínima. El retraso total está en función de la optimización del perfil del índice, del ancho de banda espectral y de la longitud de onda de la fuente óptica utilizada [31].

B. Fibra monomodo

Todavía dentro del campo de las investigaciones, es la fibra más eficiente y la que ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Posee diferentes tipos de índice, generalmente escalonado y un diámetro muy angosto.

Sus características más importantes, se muestran en la tabla 3.1.

Parámetro	Multimodo de Índice escalonado	Multimodo de Índice gradual	Monomodo
Diámetro del núcleo	50 - 300 μm	50, 62.5, 85, 100 μm	3 - 10 μm
Diámetro de la cubierta	125 - 350 μm	125, 130 μm	125 μm
Apertura numérica (AN)	0.2 - 0.3	0.2 - 0.25	0.002 - 0.1
Dispersión total (Δt)	2 - 20 ns/km	200 - 800 ps/km	3 - 10 ps/km
Banda pasante (Δf)	6 - 200 MHz/km	200 - 1500 MHz/km	>50 GHz/km

Tabla 3.1 Características generales de las fibras ópticas [22,26]

La fibra monomodo y su perfil de índice se muestran en la figura 3.6.

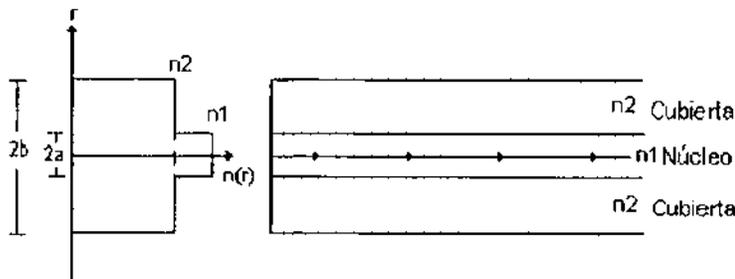


Figura 3.6 Fibra monomodo

El único modo que se propaga a lo largo de la fibra, lo hace en línea recta, de ahí el nombre de monomodo.

3.1.7 Atenuación y pérdidas en una fibra óptica.

La propagación por reflexiones totales internas, idealmente no genera pérdidas. En la práctica, por el contrario, existen fenómenos que contribuyen a degradar la información, de modo que la señal recibida no coincide con la originalmente transmitida.

Se trata en primer término, de las pérdidas por **atenuación** en el interior de la fibra y se define como la relación entre la potencia luminosa a la salida y a la entrada, expresada en dB y calculada para determinada longitud de onda (λ).

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{in}}} \quad [\text{dB}] \quad (3.16)$$

Como las pérdidas aumentan con la longitud de la fibra, se define el **coeficiente de atenuación** por unidad de longitud a esa misma longitud de onda:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{in}}} \quad [\text{dB/km}] \quad (3.17)$$

Para clasificar los diversos tipos de atenuación, es conveniente diferenciar los que contribuyen a las pérdidas de energía dentro de la fibra y los de origen externo.

Las **pérdidas intrínsecas** son causadas por dos efectos físicos: la **absorción por rayos ultravioletas (UV) e infrarrojos (IR) y la difusión** [22,26]. La primera se debe a la interacción existente entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo. La absorción debido a la radiación UV de la luz transmitida, decrece exponencialmente con la longitud de onda y es despreciable a partir de los 1000 nm, mientras que la absorción debida a los rayos IR, crece exponencialmente con la longitud de onda pero no es apreciable hasta los 1300 nm.

Los cambios en el índice de refracción, debido a variaciones de densidad en el material, o el encuentro de la luz con obstrucciones cuyo diámetro es menor a la longitud de onda, provocan el fenómeno de difusión. Cuando la luz choca con una partícula o pasa por un lugar con diferente índice, parte de la energía de la señal es absorbida y la restante es reflejada en varias direcciones. Las pérdidas de energía producidas por difusión, decrecen exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda y son las pérdidas de mayor influencia para las longitudes de onda comprendidas entre los 300 y 1100 nm.

Dentro de las **pérdidas de origen externo** se observa la **absorción por impurezas, la curvatura de la fibra, las pérdidas por microcurvaturas y la atenuación por cableado, ambiente y envejecimiento**.

Las impurezas más comunes en el silicio de la fibra, son las metálicas y los iones de hidroxilo (OH⁻). Las primeras, causan pérdidas de 1 dB/km a una concentración de una partícula por millón (ppm), pero pueden reducirse al mínimo en el proceso de fabricación. No así los iones de hidroxilo, que a 2720 nm entran en resonancia con la estructura atómica del silicio, transfiriendo de esta forma, los fotones su energía a los iones. Este fenómeno produce tres picos de pérdidas en 930, 1250 y 1300 nm.

Si la curvatura de la interfaz núcleo-cubierta no es geoméricamente uniforme, se anula el principio de reflexión total y se produce una fuga de modos hacia la cubierta.

Esta atenuación varía exponencialmente con el radio de la curvatura y tiene lugar al sobrepasar el límite crítico. Por lo anterior, es importante conocer el valor del radio de curvatura mínimo posible para un cable de fibra.

Las microcurvaturas producen irregularidades entre el núcleo y la cubierta, variaciones del diámetro y del eje de la fibra. Afectan a toda la banda de información y casi no varía con la longitud de onda.

Cuando se realiza la instalación, las curvaturas en el cableado, los agentes climáticos y el envejecimiento del cable, contribuyen en cierto grado a incrementar las pérdidas y a acortar la vida de la fibra óptica.

Además de las pérdidas antes mencionadas, también tienen lugar las ocasionadas por la conexión, fusión y acoplamiento entre segmentos de fibra, básicamente por la mala alineación de los núcleos e impurezas entre éstos.

3.1.8 Ventanas de transmisión de bajas pérdidas

Al juntar todas las pérdidas antes mencionadas en una gráfica, se obtiene una curva como la de la figura 3.7. En ella se observa:

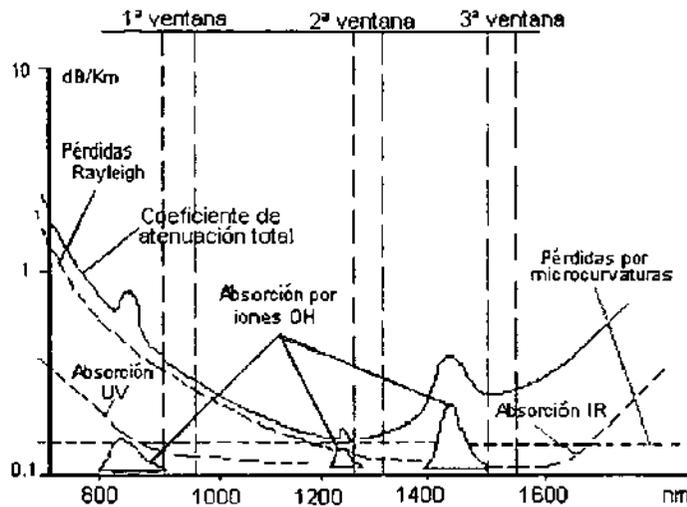


Figura 3.7 Atenuación en una fibra óptica [22]

- Una zona de alta atenuación por debajo de los 800 nm que presenta atenuación por rayos UV
- Una zona por arriba de los 1600 nm que presenta atenuación por rayos IR.
- Tres zonas de mínima atenuación llamadas **ventanas**, que determinan las longitudes de onda de operación de los dispositivos ópticos. Se encuentran aproximadamente en las longitudes de 850, 1300 y 1550 nm.

Para lograr el máximo desempeño del sistema, la selección de la longitud de onda de la luz, deberá estar basada en la minimización de pérdidas y dispersión.

En la tabla 3.2 se muestra la atenuación en las ventanas de transmisión.

Ventana	λ (nm)	Pérdidas (dB/Km)
I	820-880	2.3 – 6.0
II	1200-1320	0.3 – 1.5
III	1550-1610	0.25 – 0.9

Tabla 3.2 Atenuación según la ventana de transmisión

La tendencia actual es la utilización de láseres en la tercera región, alrededor de los 1550 nm, porque la vida del láser aumenta con su longitud de onda.

3.1.9 Definición de dispersión y factores que la generan.

El término **dispersión** se utiliza para describir el efecto de ensanchamiento de los pulsos ópticos gaussianos, que se produce conforme la señal viaja a través de la fibra, debido a diversos fenómenos de propagación.

Si se introduce un pulso con duración $\Delta T_1 \cong 0$ a la fibra, el ancho del pulso de salida tendrá una duración ΔT_2 , y será únicamente resultado de su dispersión. Si por el contrario, el pulso de entrada tiene una duración ΔT_1 , la forma de calcularla la dispersión es:

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_2^2 - \Delta T_1^2} \quad (3.18)$$

Este efecto obliga a reducir considerablemente la frecuencia máxima a la cual es posible emitir pulsos y limita la capacidad de una fibra para transmitir información.

Para pulsos de formas gaussianas, lo más común en transmisiones por fibra ópticas, se hace la siguiente aproximación:

$$\Delta f \cong \frac{0.35}{\Delta T} \quad (3.19)$$

Donde Δf es la banda de paso a -3dB y ΔT es la longitud a media altura del pulso gaussiano. Esta relación demuestra que mientras menor sea la dispersión, mayor será el ancho de banda de esa fibra.

El fenómeno global de dispersión, se debe a dos factores:

- Dispersión modal (Δt_m)
- Dispersión cromática (Δt_c)

La primera está relacionada con la propagación de la onda en forma de modos y la segunda es una consecuencia de que la luz esté constituida por varias frecuencias.

La **dispersión modal** se define como la diferencia de tiempo que tardan los diversos modos en recorrer una longitud dada de fibra. En otras palabras, si dos modos diferentes se inyectan al mismo tiempo en la entrada de una fibra de longitud L , el modo de orden más bajo llegará primero al otro extremo y el de orden más elevado llegará con un retraso:

$$\Delta t_m = \frac{n_1 \Delta}{c} \cdot L = \frac{(AN)^2}{2cn_1} \cdot L \quad (3.20)$$

Experimentalmente, el retardo c aumenta linealmente con la longitud L de la fibra, como:

$$\Delta t_m(L) \cong L \quad \text{si } L < L_{eq} \quad (3.21a)$$

y proporcionalmente a la raíz cuadrada de la longitud, como:

$$\Delta t_m(L) \cong \sqrt{L} \quad \text{si } L > L_{eq} \quad (3.21b)$$

donde L_{eq} es la longitud de equilibrio de la fibra óptica.

La dispersión modal está directamente relacionada con la apertura numérica de la fibra. Al aumentar la AN o el ángulo de aceptación, se incrementa la dispersión y se reduce la tasa de transmisión de información.

La **dispersión cromática** es la consecuencia directa de que la luz en la fibra no sea monocromática, sino que está compuesta por ondas de diferentes frecuencias. Tiene dos componentes importantes: la **dispersión intramodal o espectral** y la **dispersión por efecto guíaondas**.

La primera se define como el retardo entre las diferentes longitudes de onda en el extremo de la fibra. Se debe básicamente a que el índice de refracción del material de la fibra, varía con la longitud de onda, lo que da por resultado una velocidad de propagación para cada una de ellas. La luz que se inyecta en la fibra está compuesta por varias longitudes de onda, por lo tanto, su velocidad varía dependiendo de cada componente espectral.

El retardo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta t_c = \frac{\lambda_0 \Delta \lambda}{c} \left(\frac{d^2 n_1}{d \lambda^2} \right)_{\lambda_0} \cdot L = M(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L \quad (3.22)$$

donde λ_0 es la longitud de onda central de la fuente y $\Delta \lambda$ el ancho de banda espectral a media intensidad de la fuente.

El retardo Δt_c depende del ancho de banda de la fuente y del índice de refracción del núcleo. Disminuye sustancialmente si el ancho espectral de la fuente óptica es más angosto. Este tipo de dispersión es menos importante que la dispersión modal.

La **dispersión por efecto guíaondas** nace del hecho de que correspondiendo a cada longitud de onda un índice de refracción diferente, el ángulo que forma la trayectoria asociada a ellas será distinto, y también el camino recorrido por cada componente.

Este tipo de dispersión está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_g = -G(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L = - \frac{\lambda}{4\pi^2 n_1 a^2 c} \Delta \lambda \cdot L \quad (3.23)$$

donde $G(\lambda)$ es el **coeficiente de dispersión del guíaondas**. G disminuye a medida que aumenta a , y con ello la posibilidad de transmitir más modos.

Finalmente, el **valor cuadrático medio de la dispersión total**, está dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_m^2 + \Delta t_c^2} = \sqrt{\Delta t_m^2 + (\Delta t_c + \Delta t_g)^2} \quad (3.24)$$

3.1.10 Reducción de la dispersión en una fibra óptica

La dispersión impone un límite a la capacidad de una fibra para transportar información; el retardo introducido por este fenómeno limita la frecuencia de transmisión, arriba de la cual se dificultará la recepción de la señal por la superposición de pulsos sucesivos. De ahí que la importancia de reducir sus efectos, sea el aumentar la capacidad de la fibra [22].

- **Fibra de índice gradual**

Con base en su funcionamiento mencionado anteriormente, se sabe que en este tipo de fibras, la longitud de las trayectorias recorridas por cada modo, se compensa por las diferencias de velocidad. Así, los rayos que parten en el mismo instante, llegan al mismo tiempo al otro extremo de la fibra. En consecuencia, la fibra de índice gradual reduce sustancialmente la dispersión modal.

Su perfil de índice gradual, se describe mediante la ecuación:

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2} \quad \text{si } 0 \leq r \leq a \quad (3.25a)$$

$$n(r) = n_2 [1 - 2\Delta]^{1/2} \quad \text{si } r \geq a \quad (3.25b)$$

donde r es la distancia axial desde el centro de la fibra, g es el coeficiente que caracteriza al perfil, n_1 es el valor del índice del núcleo para $r = 0$, n_2 es el valor del índice de la cubierta y a es el radio del núcleo.

El valor óptimo del coeficiente g para una fibra de índice gradual, es:

$$g \cong 2(1 - \Delta) \quad (3.26)$$

para el cual, la dispersión modal es mínima. Si la diferencia relativa del índice $\Delta \cong 1\%$, el valor del coeficiente es $g = 1.98$ y el retraso Δt_m está dado por la fórmula:

$$\Delta t_m = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} \cdot L = \frac{(AN)^4}{32cn_1^3} \cdot L \quad (3.27)$$

Cualquier variación de este parámetro alrededor de su valor óptimo, aumenta rápidamente la dispersión modal. Esta característica es la que dificulta su fabricación.

Lo anterior obliga a utilizar una fuente en una longitud de onda de emisión λ_0 , que corresponda a la de la fibra de dispersión mínima. Además, la fuente deberá tener un ancho espectral pequeño respecto a λ_0 .

La fibra de índice gradual queda sujeta a la dispersión cromática aún con perfil de índice optimizado.

Para un índice de fibra gradual sólo puede definirse una apertura numérica local, puesto que el índice de refracción del núcleo, está en función del radio (r). La expresión es la siguiente:

$$AN(r) = \text{sen } \alpha_{3M}(r) = \sqrt{n^2(r) - n^2(a)} \quad (3.28)$$

Con base en la ecuación del perfil gradual, la apertura numérica local se escribe como:

$$AN(r) = n_1(0) \cdot 2\Delta \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (3.29)$$

• Fibra monomodo

Otra forma de reducir la dispersión modal, es hacer que se propague un único modo en la fibra. Esto sucederá sólo si la frecuencia normalizada es $V \leq 2,405$.

Para que una fibra sea monomodo a una longitud de onda determinada, se puede variar el radio del núcleo (a) o la diferencia relativa de índices (Δ), de tal forma que si una fibra tiene una Δ grande (10^{-2}), debe tener un diámetro pequeño ($\cong 3 \mu\text{m}$ @ $0.85\mu\text{m}$), pero un núcleo tan pequeño dificulta la inyección de luz.

Si por el contrario, Δ es muy pequeña (10^{-3}), su diámetro puede ser muy grande ($\cong 30 \mu\text{m}$ @ $0.85\mu\text{m}$), pero si una diferencia de índices es pequeño, el ángulo crítico de reflexión total es muy grande y cualquier curvatura hace que no se cumpla la condición de reflexión total. Por lo anterior, es necesario tomar posiciones intermedia entre los dos extremos.

En una fibra monomodo no hay dispersión modal, solo dispersión cromática, pero en longitudes de onda cercanas a los 1300 nm, esta última es mínima. Con variaciones al perfil de índice de refracción, se intenta eliminar completamente los efectos de la dispersión cromática, de dos modos posibles:

1. Desplazando el punto de mínima dispersión hacia el de mínima atenuación (**técnica de dispersión desplazada**) y cuyos puntos de trabajo se sitúan ya en la tercera ventana (1550 nm). Ello se consigue a base de alterar el perfil del índice del núcleo y las condiciones de dopado del mismo.
2. Diseñando la fibra de modo que su curva de dispersión sea lo más plana posible y casi nula en la región de mínima atenuación (**técnica de dispersión aplanada**). Los mejores resultados se consiguen con perfiles segmentados, ya que con ellos aparecen, no ya uno, sino dos puntos de dispersión nula. El punto de trabajo se elegirá en la zona de mínima atenuación.

3.2 PRINCIPIOS DEL CÁLCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA

Las fibras ópticas se utilizan para transportar información en diferentes campos de aplicación, donde varía la longitud del enlace, el tipo de señal, la velocidad binaria de transmisión y el medio de implantación. En consecuencia, los sistemas serán realizados con emisores ópticos, fotodetectores, fibras, acopladores, conectores y equipo de telecomunicaciones, especiales para cada caso. La concepción y realización de cada uno debe adaptarse a un problema en particular y por ello deben conocerse las características esenciales del enlace óptico a diseñar, a fin de efectuar una selección juiciosa de los diversos elementos que lo constituyen.

3.2.1 Selección de los dispositivos ópticos

La primer decisión que debe tomarse es el tipo de fibra óptica que se usará como medio de transmisión: multimodo o monomodo. Ambas opciones tienen sus ventajas:

La **fibra monomodo** posee la máxima capacidad y ancho de banda posible, ideal para transmisiones a larga distancia con grandes volúmenes de información; cuenta con un coeficiente de atenuación menor que el de la fibra multimodo y en ocasiones es más barata que la de índice gradual, su rango de transmisión se encuentra entre los 1310 y los 1550 nm.

El equipo de comunicaciones para **fibra multimodo** es más común para distancias menores a los 2 km y es más barato que el equipo para fibra monomodo, básicamente por el tipo de dispositivos ópticos que utiliza. El proceso de fabricación de la fibra de índice gradual es más complejo, razón por la cual puede ser más caro. Es ideal para aplicaciones a corta distancia. La fibra multimodo con diámetro 62.5/125 es el estándar más común en redes de área local tales con Ethernet.

Al mismo tiempo que se escoge la fibra óptica, es necesario determinar qué tipo de fuente óptica y fotodetector deberá poseer el equipo de telecomunicaciones para integrar el sistema. El criterio de selección de estos dispositivos puede basarse en las características básicas del enlace, resumidas en la siguiente tabla:

Tasa de transmisión	Longitud del enlace	Longitud de onda	Fuente	Detector
Moderada	Corta	1ª ventana	LED	p-i-n
Moderada	Media	2ª o 3ª ventana	LED	p-i-n
Alta	Media	1ª ventana	Láser	Avalancha
Alta	Larga	2ª o 3ª ventana	Láser	p-i-n
Muy alta	Muy larga	2ª o 3ª ventana	Láser	p-i-n

Tabla 3.3 Criterio de selección de los dispositivos ópticos activos [31]

Una vez seleccionados los componentes ópticos, se realiza el análisis matemático que nos permita determinar la factibilidad del enlace. Los dos factores que se consideran son el ancho de banda máximo o banda de paso y el análisis energético.

3.2.2 Análisis del ancho de banda del sistema

El ancho de banda (B), el tiempo de subida (T) y la velocidad de transmisión binaria (R), son parámetros relacionados entre sí, de acuerdo con las ecuaciones de la siguiente tabla. Éstas nos permiten determinar si el enlace será capaz de transportar la cantidad de información que se maneja en determinada aplicación, con mínima distorsión de la señal.

Tiempo de subida	Ancho de banda / Tasa de transmisión
$T_r = \frac{0.7}{B}$	Modulación RZ $B_r = R$
	Modulación NRZ $B_r = \frac{R}{2}$

Tabla 3.4 Fórmulas para calcular el ancho de banda y tiempo de subida total del sistema

Este análisis depende de cuatro factores: el tiempo de subida de la fuente óptica (T_{SO}) y del fotodetector (T_{FD}), ambos datos proporcionados por el fabricante. Del tiempo de subida real de la fibra óptica (T_{FO}), aquél que toma en cuenta las características espectrales de la fuente óptica empleada en el enlace para calcular la dispersión total del cable y posteriormente su tiempo de subida. Y del volumen de información transmitida por unidad de tiempo (T_s). Tomando en cuenta estos elementos se puede calcular el tiempo de subida del enlace (T_T) como:

$$T_T \approx 1.1 \sqrt{T_{SO}^2 + T_{FO}^2} + T_{DO}^2 \leq T_s \quad (3.30)$$

La condición $T_s \geq T_T$ ó $B_s \leq B_T$ indica que el ancho de banda de la señal deberá ser menor al del sistema para garantizar su libre paso por el canal de comunicación.

El **tiempo de subida de la fibra óptica** depende de la dispersión modal y cromática para una del tipo multimodo y únicamente de la dispersión cromática, para una del tipo monomodo. Las fórmulas se detallan al principio del capítulo y se resumen en la siguiente tabla:

Dispersión modal	Fórmula
Fibra de índice escalonado ($g=\infty$)	$\Delta t_m = \frac{(AN)^2}{2cn_1} \cdot L$
Fibra multimodo de índice gradual con perfil óptimo ($g \approx 2(1-\Delta)$)	$\Delta t_m = \frac{(AN)^4}{32cn_1^3} \cdot L$

Fibra multimodo de índice gradual con perfil parabólico (g=2)	$\Delta t_m = \frac{(AN)^4}{8cn_1^3} \cdot L$
Dispersión cromática	Fórmula
Componente espectral	$\Delta t_s = M(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L$
Componente guíaondas	$\Delta t_g = -G(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L = -\frac{\lambda}{4\pi^2 n_1 a^2 c} \Delta\lambda \cdot L$

Tabla 3.5 Fórmulas para calcular la dispersión de una fibra óptica

Si los tiempos de subida debidos a la dispersión modal y cromática son del mismo orden de magnitud, la dispersión total de la fibra óptica se calcula como:

$$\Delta t_t = 1.1 \sqrt{\Delta t_m^2 + \Delta t_c^2} \quad (3.31)$$

y su tiempo de subida es:

$$T_{so} = \Delta t_t \cdot L \quad (3.32)$$

donde L es la longitud total del enlace. A partir de este dato se puede obtener el ancho de banda real de la fibra óptica, que decrece conforme aumenta la longitud del enlace.

Una vez calculada la rapidez del enlace y comparada con el tiempo de subida de la señal, es decir $T_s \geq T_T$, se sabe si el sistema será capaz de transportar la cantidad de información requerida por la aplicación sin distorsión alguna.

A manera de resumen, los datos necesarios para calcular la banda de paso de un sistema óptico, son:

Fibra óptica	
	Longitud del enlace (L)
	Apertura numérica (AN)
	Índice de refracción del núcleo (n_1)
	Radio del núcleo (a)
	Coficiente de dispersión del material ($M(\lambda)$)
Equipo	
	Velocidad binaria de transmisión (R)
	Técnica de modulación
	Ancho espectral de la fuente óptica ($\Delta\lambda$)
	Tiempo de subida de la fuente óptica (T_{SO})
	Tiempo de subida del fotodetector (T_{FD})
	Longitud de onda de operación (λ)

Tabla 3.6 Datos necesarios para calcular el ancho de banda de un sistema óptico

3.2.3 Análisis energético y umbral de detección

Después de examinar la banda de paso del sistema, se debe asegurar que la calidad de la información transmitida sea la deseada. Se realiza entonces un **análisis energético** que permite calcular la potencia óptica perdida en el enlace y conocer el **umbral de detección**, o sea, el flujo energético mínimo que debe llegar al receptor para que la señal de salida del amplificador posea la tasa de errores (BER) necesaria [22].

Éste último es el parámetro fundamental que determina la calidad de una transmisión digital y posee un valor estándar en equipo de telecomunicaciones ópticas de 10^{-9} .

La complejidad del enlace aumenta conforme se ven involucrados más parámetros del detector y varía según la aplicación, pero de forma general procede de tres maneras:

I. A partir del flujo energético modulado promedio (P_{in}) emitido por la fuente óptica y del umbral de detección del detector (P_{om}), ambos datos proporcionados por el fabricante del equipo, se calcula el margen óptico disponible (M_T) para determinar con qué rango de potencia se cuenta y seleccionar así el coeficiente de atenuación de la fibra óptica, el tipo de conectores y empalmes. Si se respeta el umbral de detección y por ende, el margen del enlace, se garantiza una tasa de bits en error menor a 10^{-9} .

II. La segunda opción consiste en calcular el flujo energético recibido (P_o) después de considerar todas las pérdidas de flujo que ocasionan las conexiones físicas y la atenuación de la fibra óptica, además de un margen de seguridad (M) que toma en cuenta imponderables como la degradación de los componentes y las variaciones de temperatura; generalmente se ubica entre 2 y 3 dB. La ecuación fundamental de este cálculo energético es:

$$P_o = P_{in} - A_{fio} - P_{conex} - M \quad (3.33)$$

donde los valores de la potencia están dados en dBm y el de la atenuación en dB.

Posteriormente es necesario conocer qué BER arroja este flujo energético recibido y su correspondiente umbral de detección, como se indica en el apartado de fotodetectores del segundo capítulo.

III. El cálculo más complejo requiere del análisis del conjunto fotodetector-amplificador, así como de la potencia de la señal y la potencia del ruido, para después determinar como en el caso anterior la tasa de errores y el umbral de detección. Este caso se presenta generalmente cuando es menester diseñar el circuito amplificador y seleccionar puntualmente los componentes pasivos, hecho poco común toda vez que en la mayoría de las aplicaciones se emplea equipo que cumple con cierta función

A manera de resumen, los datos necesarios para realizar este análisis, se mencionan en la siguiente tabla:

Cálculo energético	
Fotodetector	
	Capacidad (C)
	Sensibilidad (S_d)
	Corriente de oscuridad (I_0)
	Ganancia de corriente (M)
	Factor de exceso de ruido de multiplicación (x)
	Potencia óptica recibida (P_o)
	Umbral de detección (P_{om})
Amplificador	
	Banda efectiva del ruido (B_N)
	Factor de ruido (F)
	Impedancia de entrada (R_e, C_e)
	Resistencia de carga (R_L)
Fuente óptica	
	Potencia óptica máxima acoplada (P_m)
Enlace	
	Atenuación para cierta longitud de cable a la longitud de onda de operación ($A(\lambda)$)
	Pérdidas por empalme
	Pérdidas por conectores
	Pérdidas por otros componentes)
	Margen de seguridad (M_s)
	Tasa de bits en error (BER)

Tabla 3.7 Datos necesarios para el análisis energético

3.2.4 Cálculo total para un enlace con múltiples secciones

Hasta aquí, el análisis del enlace ha sido para una sección, pero existen casos en los que no es posible reproducir fielmente la señal recibida porque el flujo energético recibido a la entrada del fotodetector es muy escaso. El enlace total debe ser dividido en varios segmentos con un repetidor que regenere la señal y cada uno se analiza de manera individual.

Si los segmentos son iguales en longitud y poseen las mismas especificaciones técnicas, bastará con añadir el número de secciones (k) a la ecuación del tiempo de subida total del sistema, como a continuación se indica:

$$T_r = 1.1 \cdot k T_{sc} \quad (3.34)$$

Por el contrario, si cada segmento difiere en longitud o características, el tiempo de subida se calcula como:

$$T_r = 1.1 (T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_k^2) \quad (3.35)$$

Lo mismo sucede con la tasa de bits en error para segmentos iguales (3.36) o con diferentes (3.37), si la $BER_{sec} \ll 1$:

$$BER_T \cong 1.1BER_{sec} \quad (3.36)$$

$$BER_T \cong 1.1(BER_1 + BER_2 + \dots + BER_n) \quad (3.37)$$

Una vez que se ha determinado la banda de paso, el flujo energético y la tasa de bits en error, se hace un análisis de precios que permita conocer el posible costo del enlace, seleccionar los componentes y realizar las modificaciones necesarias antes de su implantación [31].

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE VIDEOCONFERENCIA CON FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN

4.1 Análisis de una red local de datos de la Facultad de Ingeniería

El propósito de este análisis es determinar qué tan factible es la implantación de un sistema de videoconferencia en el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, los posibles tipos de acuerdo con las características de Red UNAM y la capacidad del enlace óptico que le provee acceso a la red universitaria de datos o a la Red Nacional de Videoconferencia.

4.1.1 Estructura y funcionamiento de la red del edificio Luis Valdés Vallejo

La red de datos del edificio Luis Valdés Vallejo de la Facultad de Ingeniería, cuenta aproximadamente con 220 terminales que se conectan a través de diversos concentradores (hubs) al backbone del edificio, un enlace de fibra óptica de 10 Mbit/s, encargado de enviar y recibir la información del nodo en el IIMAS (Figura 4.1).

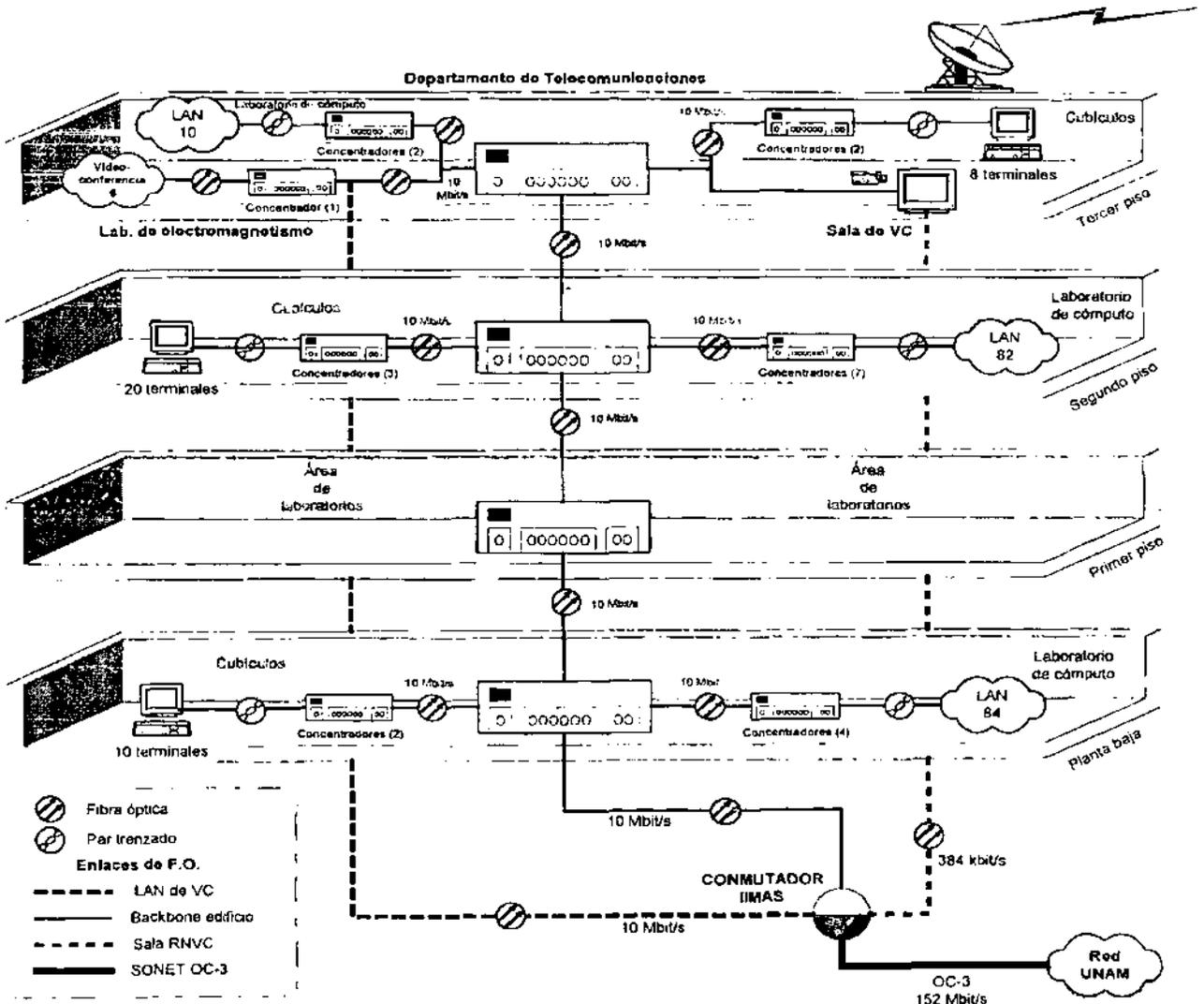


Figura 4.1 Diagrama de la red del edificio Luis Valdés Vallejo de la Facultad de Ingeniería.

El 80% de las terminales (176) se encuentra en los laboratorios de cómputo de la planta baja, segundo y cuarto piso del edificio; las restantes en cubículos de la planta docente y administrativa. Las terminales se conectan con UTP a una serie de concentradores (el número se indica entre paréntesis) que dispuestos en forma de cascada, se comunican a su vez con el concentrador principal de cada piso, mediante fibra óptica y bajo el estándar Ethernet a 10 Mbit/s.

El concentrador final que contacta con Red UNAM y a través del cual entra y sale la información del edificio hacia el conmutador en el IIMAS, se encuentra en el laboratorio de cómputo de la planta baja y cuenta también con un enlace óptico de 10 Mbit/s.

La sede del proyecto de videoconferencia será el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, localizado en el cuarto piso del edificio Luis Valdés Vallejo. En el Laboratorio de Electromagnetismo (extremo izquierdo) se instalará la red local de videoconferencia, mientras que en la sala de juntas del mismo piso (extremo derecho), se alojará la sala de videoconferencia.

El continuo uso de la red durante los días hábiles de la semana y su bajo desempeño, hacen pensar que la **velocidad** del enlace al conmutador del IIMAS, no es capaz de transferir los volúmenes de información que se generan en el edificio por tal número de usuarios; que la **estructura** de la red no es la adecuada, toda vez que la configuración de los concentradores en cascada genera cuellos de botella que impiden el libre tránsito de la información; y que el **equipo de redes** (concentradores en su mayoría) ya es obsoleto y ocasiona problemas.

Con estos antecedentes, se sabe que la realización de videoconferencias por IP a través del backbone del edificio Luis Valdés Vallejo, presentará algunos inconvenientes. Si una sesión logra apartar el ancho de banda necesario para establecer una comunicación bidireccional, el desempeño de la red se verá seriamente entorpecido. De manera contraria, si el tráfico en la red es alto, la transferencia de audio y video no podrá contar con la velocidad necesaria y constante para lograr una sesión simultánea.

Con el propósito de agilizar la tasa de transferencia de datos en el backbone de este edificio y permitir que a través de él se realicen videoconferencias por IP, no basta con aumentar la velocidad del enlace sin antes analizar detalladamente la configuración interna de la red y sustituir algunos concentradores que se encuentren o no en estado de obsolescencia, por equipo de conmutación (switch), que no sólo actúan como repetidores, ya poseen la capacidad de direccionar los paquetes al puerto destino. Posiblemente a partir de este análisis resulte conveniente aumentar la velocidad del enlace bajo el mismo estándar Ethernet, o dividir el tráfico del edificio en secciones independientes. Lo cierto es que la reconfiguración de la red requiere del esfuerzo conjunto de las autoridades del edificio y de la DGSCA, para que de manera coordinada se analice la problemática y se encuentre la solución más viable.

4.1.2 Características del nodo del IIMAS

Los edificios de Ciudad Universitaria se conectan al nodo más cercano de la delta de fibra óptica de Red UNAM. Siguiendo el criterio de la distancia, además de la Facultad de

Ingeniería y el IIMAS, la de Veterinaria, Geografía, Astronomía, Química, Biología, Biomédicas y Medicina, se conectan a este nodo, a 10 ó 100 Mbit/s (Figura 4.2). En él un conmutador ATM da acceso a la red de datos y se encarga de redireccionar la información hacia su destino, ya sea a nivel interno o externo.

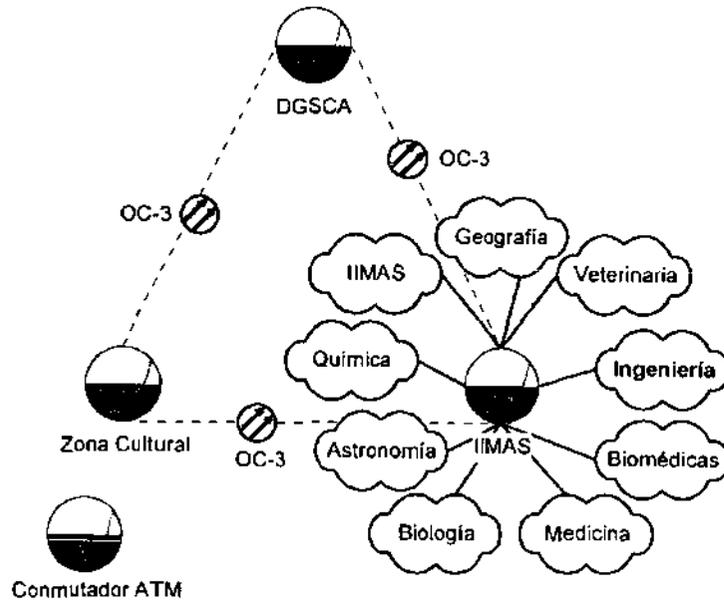


Figura 4.2 Facultades que se conectan al nodo del IIMAS

Este conmutador ATM maneja grandes volúmenes de información toda vez que más del 60% de los edificios de C.U. se conectan a él. El constante tráfico y los repentinos cuellos de botella, generarán algunos retrasos en la transmisión de audio y video, hecho que ocasionalmente entorpecerá las sesiones de videoconferencia que utilicen el backbone de Red UNAM como medio de transporte.

4.2 Sistemas de videoconferencia y modos de transmisión factibles en el Departamento de Telecomunicaciones

El análisis de las condiciones bajo las cuales se implantará un sistema de videoconferencia en el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, permiten inferir que los dos tipos de videoconferencia a los que se hace alusión en el primer capítulo de esta tesis, pueden implantarse en el edificio Luis Valdés Vallejo: la de escritorio y el sistema interconstruido.

Sus características esenciales se muestran en la figura 4.3, en la que se observan estos dos tipos de videoconferencia bajo diferentes modos de transmisión, todos ellos factibles en Red UNAM.

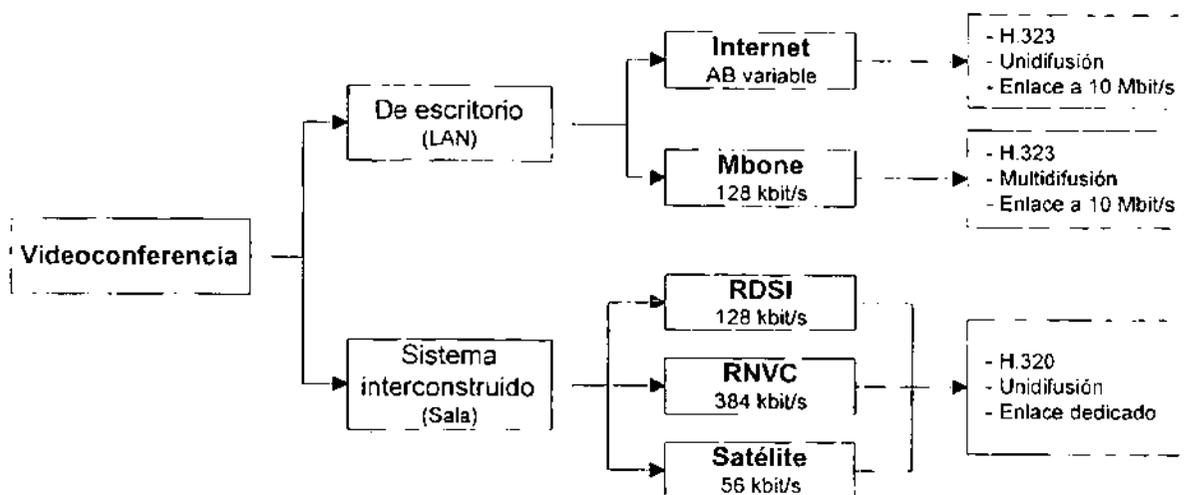


Figura 4.3 Tipos de videoconferencia bajo distintos modos de transmisión que pueden implementarse en el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería

La **videoconferencia de escritorio** requiere de computadoras personales que puedan acceder a la red universitaria de datos, a través del backbone del edificio Luis Valdés Vallejo. Sin embargo, la mejor forma de lograr una comunicación más cercana al tiempo real, será a través de un enlace propio, independiente y directo al nodo del HIMAS.

El verdadero potencial de este tipo de videoconferencia, recae en la posibilidad de crear una red para este propósito que accese a través del backbone universitario a dos tipos de redes: la **Internet** y **Mbone**, ambas operando bajo el estándar H.323.

El **sistema interconstruido** requiere de una sala especialmente acondicionada en cuanto a acústica e iluminación se refiere, para albergar a los participantes de la conferencia y todo el equipo encargado de capturar, controlar y desplegar la señal multimedia. Emplea un enlace dedicado de fibra óptica a la DGSCA, para establecer y controlar las videoconferencias, tanto punto a punto como multipunto, a través de la **RDSI** y la **RNVC**.

La Red UNAM cuenta con un canal primario (PRI) de 1920 kbit/s para sesiones de videoconferencia, pero asigna a ellas un ancho de banda máximo de 128 ó 384 kbit/s. El uso de la **RDSI** no ha tenido amplia aceptación en el país, por ello las conferencias se pueden realizar entre usuarios que se encuentren dentro de C.U. o con usuarios externos que cuenten con este servicio digital. Las videoconferencias multipunto sólo son posibles bajo el control de la DGSCA.

La Red UNAM también ofrece el servicio de la **RNVC** a una tasa de 384 kbit/s, con tan sólo conectarse a ella a través de un enlace de fibra óptica. El uso de este modo de transmisión permite realizar sesiones entre usuarios que se encuentren dentro de Ciudad Universitaria, aún en el mismo edificio y con un sitio externo, a nivel nacional e internacional. En cualquier caso, las comunicaciones punto a punto pueden o no manejarse de manera independiente, no así las multipunto, ya que éstas se rigen por un calendario de eventos que gestiona la DGSCA para transmitir por el canal en determinada fecha y por un

periodo establecido. Como receptores, se puede presenciar el evento siempre que esta Dirección esté enterada para poder conmutar la señal.

El **enlace satelital** proporciona un ancho de banda de 56 kbit/s, con baja resolución y una calidad de señal pobre. Requiere una interfaz de microondas que conecta el CODEC a la VSAT para transmitir la información al satélite. Este enlace es básicamente para comunicar dos puntos remotos que requieren de un enlace casi permanente, como sucede con observatorios, laboratorios, áreas administrativas y centros de investigación. El subir y bajar la señal al satélite ocasiona un retraso de 500 ms que limita la comunicación en tiempo real y la simultaneidad de la misma.

Aún cuando estos cinco modos de transmisión son factibles en Red UNAM, se profundiza sólo en tres: la **Internet**, **Mbone** y la **RNVC**, por su cobertura, facilidad de acceso y funcionalidad. A continuación se hace un análisis detallado de cada opción, mostrando las coincidencias y cambios en su diseño, así como las ventajas y desventajas potenciales de su uso.

4.2.1 LAN de videoconferencia por Internet

La Internet es el medio más simple y económico para realizar videoconferencias debido a su amplia cobertura y facilidad de acceso. El equipo necesario para este tipo de comunicación adquiere gran importancia a partir de 1995, cuando los precios disminuyen sustancialmente y la computadora personal deviene poderosa herramienta para procesar información digital. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos para videoconferencia de escritorio poseían características propias según el fabricante, lo que limitaba la interoperabilidad con otros usuarios. En respuesta a esta falta de compatibilidad, la ITU-T emite una serie de recomendaciones para lograr la intercomunicación, poniendo especial atención en el uso de IP como mecanismo de transporte, y es gracias al uso extendido de Internet que la videoconferencia de escritorio ha tenido grandes avances, basándose principalmente en el estándar H.323 que define la transferencia de video en redes de conmutación de paquetes.

A diferencia de los sistemas interconstruidos, el procesamiento de la información se hace por software. Además, se observa una clara tendencia a desarrollar aplicaciones de videoconferencia para Windows y ya no exclusivamente para plataformas UNIX, como se hacía anteriormente.

- **Funcionamiento**

Este tipo de comunicación se distingue por ser punto a punto, es decir, entre fuente y receptor (unidifusión). Para ello, la capa de transporte divide la información multimedia en datagramas o paquetes de longitud fija, teóricamente de 64 kbytes y prácticamente de 1500 bytes. Cada datagrama se transmite por Internet con una dirección. Cuando la información arriva al extremo indicado, la capa de red la restituye en orden para su procesamiento.

Las conferencias multipunto se realizan por software, es decir, éste a través de varias sesiones simultáneas, permite la comunicación entre distintos usuarios. El ancho de banda aumenta de manera proporcional con el número de sesiones.

El audio y los datos tienen mayor prioridad en su transmisión que el video, por ello se emplea un protocolo diseñado para proveer una conexión confiable entre extremos como TCP; para el video se utiliza UDP, protocolo no orientado a conexión y que no garantiza una comunicación fiable.

- **Características de la red y su topología**

La red local de videoconferencia con fibra óptica como medio de transmisión, requiere de un concentrador con puertos de fibra óptica y computadoras personales con una velocidad mínima de procesamiento de 120 MHz, además de software para teleconferencias, tarjeta de red con puerto de fibra óptica, una cámara digital de video, una tarjeta de captura de video, una tarjeta de audio, bocinas, micrófono y una dirección IP para unidifusión.

La topología de la red local es tipo estrella, donde cada terminal se conecta a un puerto del concentrador con dos cables de fibra óptica multimodo, uno para transmisión y otro para recepción. El cable usado para los segmentos es fibra óptica multimodo de tres posibles diámetros: 50/125, 62.5/125 y 100/140 μm . El equipo de telecomunicaciones ópticas opera en la primera y segunda ventana de atenuación, en las longitudes de onda cercanas a los 850 y 1300 nm, respectivamente.

Se emplean dos tipos de segmentos en la red, el FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link) y el 10BaseF. El primero es un estándar para Ethernet que aplica desde la década de los 80 y provee un enlace de hasta 1000 metros entre repetidores. El segundo, es la versión actual para realizar conexiones directas a la computadora, específicamente el 10BaseFL, que permite una conexión máxima de 2000 metros entre extremos, ya sea una computadora, un repetidor o ambos. Es la especificación más usada en el equipo de redes ópticas.

- **Ancho de banda de la señal multimedia**

Durante una videoconferencia se tiene la posibilidad de manipular todo tipo de información: audio, datos, video e imágenes fijas. El ancho de banda necesario aumenta considerablemente cuando se pasa de un simple archivo de texto a un video con imágenes tridimensionales y audio.

Durante el intercambio de capacidades del equipo H.323, se fija típicamente un ancho de banda de 435.19 kbit/s a cada terminal de una red de área local que realiza videoconferencias por Internet. Este valor cambia dependiendo de la aplicación y del tipo de conferencia empleado. En una con audio y video, la calidad de la señal, el tamaño de la imagen y el tipo de conversación, half-duplex o full-duplex, determinan el ancho de banda de la terminal y del sistema. Lo anterior se muestra con mayor detalle en la siguiente tabla.

Tipo de conferencia	Rango de ancho de banda (kbit/s)	
Datos	5 - 9500	
Audio y video	Baja calidad:	20-152
	Mediana calidad:	130-245
	Alta calidad:	700-900

De manejar una videoconferencia con una imagen tamaño medio, alta calidad de video, una comunicación full-duplex y transferencia de datos, una sola terminal requerirá aproximadamente de 1.5 Mbit/s. Si eso se multiplica por el número de terminales conectados al concentrador, el ancho de banda total del sistema será cercano a los 10 Mbit/s. Por esta razón es necesario gestionar ante la DGSCA un enlace directo e independiente, entre el nodo en IIMAS y la sede del proyecto en el edificio Valdés Vallejo.

- **Diagrama de conexión**

Unir la sede de la red local de videoconferencia con el nodo en el IIMAS, el que corresponde al departamento de Telecomunicaciones, para acceder a Red UNAM y posteriormente a Internet, se realiza a través de un enlace de fibra óptica, tal y como se muestra en la figura 4.4.

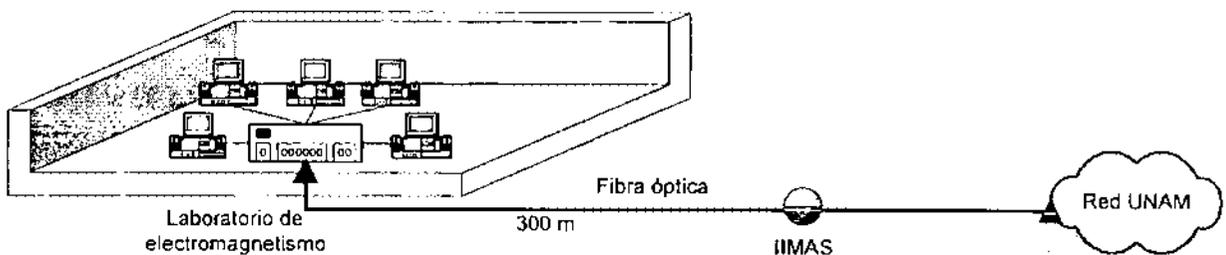


Figura 4.4 Acceso de la red local de videoconferencia a Red UNAM

- **Ventajas**

- El costo del equipo empleado para realizar videoconferencias de escritorio, es relativamente bajo comparado con el de un sistema interconstruido.
- El acceso a Internet está disponible toda vez que Red UNAM otorga la facilidad con sólo conectarse al nodo más cercano.
- Una red local de videoconferencia de escritorio es de fácil operación y administración.
- La posibilidad de contar con un enlace directo e independiente de 10 Mbit/s, agiliza el tráfico y evita congestiones en la red del edificio.
- Para enlazarse a Red UNAM no se requiere interfaz alguna dado que el backbone que se extiende por Ciudad Universitaria es de fibra óptica multimodo.
- El procesamiento de la señal digital se hace por software, no por hardware como en los sistemas interconstruidos, lo que elimina el uso de CODECS que aumentan sustancialmente el costo del equipo.
- El software empleado en este tipo de videoconferencia, permite establecer comunicaciones punto-punto y punto-multipunto, así como manipular varias señales simultáneamente.

- **Desventajas**

- La calidad de la señal de video y audio depende de la congestión de Red UNAM y de la Internet, factor impredecible y que impide repentinamente la comunicación bidireccional.
- Las tasas de compresión utilizadas para disminuir el ancho de banda de la señal, sobre todo la de video, distorsionan su calidad y ocasionan pérdidas perceptibles en la recepción.
- El uso del protocolo UDP como método de transferencia del video, ocasiona pérdidas y no garantiza la confiabilidad del enlace.

4.2.2 LAN de videoconferencia por Mbone (Multicast Backbone)

Sin perder de vista el potencial de Internet como modo de transmisión, surge una red virtual que utiliza su capa de transporte para multidifundir teleconferencias a todo el mundo.

Consta de islas unidas física o lógicamente por túneles. Cada isla representa a un grupo de usuarios y posee una dirección IP clase D, que le confiere la capacidad de transmitir y recibir información por multidifusión. Los túneles son los enlaces a través de los cuales se propagan los paquetes Mbone. En los extremos de cada uno hay un ruteador configurado manualmente para multidifundir información; lo anterior se debe a que actualmente los dispositivos de redes son diseñados únicamente para unidifusión. Cuando suceda lo contrario, los túneles ya no serán necesarios en la topología Mbone.

Estos ruteadores (mrouter) son típicamente estaciones de trabajo cuyo sistema operativo soporta multidifusión IP y a las cuales se les añade un programa especial ("demonio") para realizar el transporte de paquetes entre islas.

La tecnología de multidifusión que respalda a Mbone pretende transmitir una teleconferencia a múltiples destinos, en tiempo real y de manera simultánea. La información se genera en una fuente y se difunde por esta red virtual, de tal forma que cualquier miembro de un grupo podrá recibirlo si así lo desea. Asimismo, el uso del ancho de banda se optimiza, toda vez que la fuente envía una sola señal que viajará por los túneles y sólo será copiada por los ruteadores interesados. La técnica de unidifusión por el contrario, tendría que enviar la información a cada participante, congestionando rápidamente el medio de transporte. Para la transmisión de los paquetes se emplea el protocolo UDP.

El ancho de banda total de Mbone es de 500 kbit/s. Típicamente, el audio se transporta a 56 ó 64 kbit/s y el video de 4 fps a 128 kbit/s, aunque las tasas varían dependiendo de la calidad deseada de la teleconferencia. Esto implica que Mbone puede manipular simultáneamente no más de siete audioconferencias, tres videoconferencias o alguna combinación de ambas, siempre dejando ancho de banda disponible para la transferencia de datos. Un MODEM de 56 kbit/s no soporta estos anchos de banda, de tal forma que para participar en Mbone, se requiere un enlace digital de banda ancha.

La topología de Mbone varía constantemente debido a la unión de participantes en diversas áreas geográficas; los cambios se recolectan automáticamente por todos y cada uno de los nodos que ejecutan el programa de ruteo para multidifusión e informan de ellos al grupo

encargado del proyecto. Éste es un comité de expertos en diversas áreas de la ingeniería, que de manera voluntaria administran la red y analizan las posibles modificaciones a futuro. El tamaño de Mbone en 1995 se estimaba en 1700 redes y 48,500 subredes, a lo largo 20 países del mundo. Contaba en ese entonces con el tamaño que tenía Internet en 1990.

La mayoría de los eventos transmitidos por Mbone tienen como objetivo la divulgación de la ciencia y la cultura. Es el medio que utiliza no sólo la NASA para analizar y dar a conocer sus proyectos, también múltiples instituciones educativas de todo el mundo. Cuando se desea participar activamente en alguna conferencia, ya sea para transmitir o recibir información, se debe consultar el calendario de eventos programados para presenciar uno o varios de manera simultánea y notificar nuestra intención al administrador de red UNAM, o para solicitar el canal por el tiempo descado.

- **Funcionamiento**

La información que surja de la red local de teleconferencias para multidifundirse por Mbone, será transportada por Red UNAM hasta el ruteador, para después acceder a la capa de transporte de Internet. El audio, los datos y el video, en forma digital, serán encapsulados en datagramas IP y transmitidos por un túnel como paquetes de unidifusión, a la dirección del ruteador destino.

En el sentido contrario, toda la información que llegue al ruteador será analizada pero ahora con la posibilidad de determinar si es de unidifusión o multidifusión. En este último caso y de estar dirigida a la red local de videoconferencias, la copiará y realizará el proceso inverso al mencionado anteriormente, para encaminarla hacia el departamento de Telecomunicaciones.

El programa que se añade al ruteador para manejar la multidifusión, emplea el algoritmo DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) para analizar cuáles son los ruteadores más cercanos al local y por qué túneles se va a transmitir y recibir información. Lo anterior es con el propósito de actualizar y optimizar su topología cuando se conectan más subredes de grupo. Son dos o más los túneles existentes entre ruteadores, uno de ellos es la vía segura y los demás sirven de respaldo.

De manera periódica el ruteador preguntará a los usuarios de la red de teleconferencias, si están interesados en recibir información por determinado canal. De ser así, copia los paquetes que le llegan y los remite a la red; en caso contrario, le avisará al ruteador fuente que no desea recibirla y que libere el canal. A cada paquete se le asigna un tiempo de vida (TTL, Time to live) que disminuye conforme pasa por los ruteadores, así se evita que viaje indefinidamente y haga mal uso del ancho de banda disponible.

Estas son algunas generalidades en el funcionamiento del ruteador de multidifusión que deberá configurarse en la interfaz de la Red UNAM para permitir que la red local de videoconferencia forme parte activa de Mbone.

- **Características de la red y su topología**

De emplear Mbone como modo de transmisión para una red local de videoconferencia de escritorio, se diseñará una red en fibra óptica con las características indicadas en la sección anterior, para Internet (Figura 4.4), a excepción del tipo de dirección IP. En este caso se requiere una para multidifusión clase D.

- **Descripción del sistema**

Las opciones para conectarse a Red UNAM siguen siendo las mismas que en el caso anterior, sólo que ahora no para acceder a Internet, sino para formar parte de la red virtual Mbone. La configuración del sistema corre a cargo de la DGSCA, toda vez que en esta dirección se administra el ruteador que conecta la red de Ciudad Universitaria con Internet; al Departamento de Telecomunicaciones le corresponde realizar la propuesta y gestionar el proyecto.

La red de área local para videoconferencia, será configurada para transmitir y recibir información por multidifusión, a través de las tarjetas de red e instalando el software indicado para manipular teleconferencias por Mbone.

En la DGSCA, el administrador de Red UNAM deberá contactar con los nodos más cercanos de Mbone e informar su intención de unirse a la red, para obtener así datos relevantes y con ellos configurar un puerto del ruteador en modo multidifusión.

- **Ventajas**

- Una red local Ethernet a 10 ó 100 Mbit/s con Windows como sistema operativo, soporta la multidifusión IP sin necesidad de equipo especial o software extra.
- El programa “demonio” que se ejecuta en el ruteador para que opere en modo multidifusión, así como el software de configuración, se encuentra disponible en una gran variedad de sitios de Internet.
- Mbone es una red dedicada para difundir teleconferencias, hecho que asegura el ancho de banda de operación durante todo el evento.
- Facilita las telecomunicaciones simultáneas y en tiempo real como ningún otro medio lo ha hecho.
- Su adopción aumenta y con ello el desarrollo de equipo para multidifusión.
- La administración de Mbone está a cargo de todas y cada una de las redes que se unen a ella y no a nivel comercial.

- **Desventajas**

- La imposibilidad de manejar la multidifusión en equipo de redes, obliga a emplear alternativas que dificultan su rápida implantación.
- El uso de túneles requiere de la intervención de los administradores de redes en ambos extremos y pueden pasar semanas antes de decidir los nodos adyacentes, y más aún, el momento en que funcione de manera efectiva.
- El ancho de banda de Mbone no es suficiente para satisfacer la creciente demanda de eventos, además de que afecta la calidad del audio y del video por las altas tasas de compresión aplicadas a la señal.
- Existen retrasos durante la sesión de videoconferencia.
- Las herramientas empleadas para manejar una conferencia, todavía están en vías de desarrollo y corrección.

4.2.3 Sistema interconstruido de videoconferencia por la RNVC

La tercera y última propuesta, totalmente diferente de las dos anteriores, es emplear la Red Nacional de Videoconferencia (RNVC) para el sistema de teleconferencia.

- **Descripción del sistema**

Para integrarse a la RNVC se necesita una sala especialmente acondicionada que garantice el óptimo desempeño del equipo; un CODEC para procesamiento de audio y video, uno o más monitores de televisión, bocinas, uno o varios micrófonos con cancelación de eco, una cámara de video y un enlace de fibra óptica para acceder a esta red. La conexión es dedicada hasta el centro de procesamiento en la DGSCA.

El equipo empleado para este tipo de teleconferencias opera bajo el estándar H.320 de la ITU-T y opera tanto en redes digitales dedicadas ISDN o se conecta a la RNVC a través de un MODEM V.35/RS-366. Maneja tasas de transmisión que varían entre los 56 kbit/s y los 768 kbit/s.

- **Funcionamiento**

Para comunicar la sala de videoconferencia con la DGSCA, se requiere un MODEM síncrono con interfaz V.35 que realiza la conversión eléctrica-óptica y viceversa, entre el CODEC y el medio de transmisión. El que se emplea es el FOM-40 de RAD, el cual posee un rango de velocidades que oscila entre los 56 y los 2048 kbit/s, opera con fibra óptica multimodo en la primera ventana de atenuación (850 nm) y puede transmitir a largas distancias sin necesidad de repetidores.

Cuando la información llega a la DGSCA, la información es procesada y a través de un MCU o puente de video, se logra que tres o más terminales participen en una conferencia multipunto. Por una parte, realiza funciones de control para sustentar la conferencia, hace el intercambio de capacidades comunes de procesamiento de audio y video, determina el modo de comunicación seleccionado y controla los recursos de la conferencia para determinar qué trenes de información serán multidifundidos. También realiza el procesamiento de estos trenes, facilita su mezcla y conmutación. La operación de este equipo se basa en el estándar H.320 de la ITU-T.

Si en la conferencia participa una sala situada en el extranjero o en algún estado de la República, el ruteador se encarga de encapsular la información y enviarla a la dirección correcta. Para las salas que se encuentran dentro de C.U., el PBX se ocupa de conmutar la señal al sitio indicado. El diagrama a bloques que muestra la conexión entre la sala de videoconferencia y la DGSCA, se muestra en la figura 4.5.

- **Ventajas**

- Proporciona una conexión con un ancho de banda fijo, comúnmente de 384 kbit/s, entre salas distantes a nivel nacional e internacional.
- Además de proporcionar conexiones punto a punto, el verdadero potencial de la RNVC es la conferencia en su modalidad multipunto, donde tres o más salas remotas pueden intervenir simultáneamente.
- La sala puede albergar a un gran número de personas que deseen participar en una conferencia, esto dependerá de su tamaño y del equipo empleado para dar cobertura al grupo entero.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

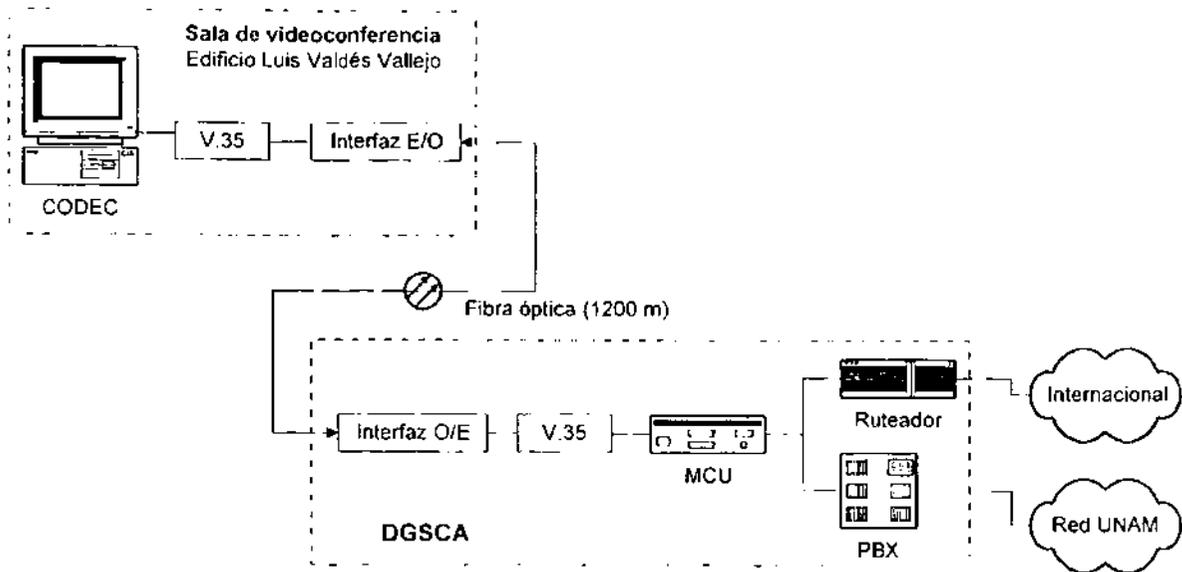


Figura 4.5 Diagrama a bloques del enlace entre la sala de videoconferencia y la DGSCA

- **Desventajas**

- La instalación del sistema requiere la adecuación de un espacio físico para el óptimo desempeño del equipo. En condiciones ideales esta sala deberá tener mobiliario especial, recubrimiento acústico y un adecuado nivel de iluminación.
- El ancho de banda empleado es proporcional al costo de la conexión, razón por la cual se utilizan bajas tasas de transmisión que deterioran la calidad del video.
- La señal no está exenta de retrasos debido al tráfico de la RNVC.
- El procesamiento de la señal multimedia se hace por hardware, lo que implica la adquisición de equipo complejo y costoso.
- La DGSCA se encarga de realizar la conexión, no es un sistema autónomo. El administrador del sistema de videoconferencia local deberá consultar el calendario de eventos antes de solicitar permiso para usar el canal.

4.3 Cálculo del enlace de fibra óptica

Después de examinar tres posibles modos de transmisión para el sistema de videoconferencia, se analizarán entonces las características técnicas del enlace que permita manipular información multimedia de manera punto a punto, entre la sede del proyecto y el nodo de Red UNAM en el IIMAS, así como entre una cámara remota de video y su centro de procesamiento en el edificio Luis Valdés Vallejo.

4.3.1 Enlace para la videoconferencia

Para acceder a Red UNAM y a través de ella enviar y recibir información multimedia para establecer comunicación con usuarios internos o externos, a nivel nacional e internacional, es necesario unir la sede del sistema de videoconferencia con el nodo en el IIMAS, mediante un enlace de fibra óptica cuya longitud se estima aproximadamente en 300 metros para la red local (Figura 4.4), con una velocidad de transmisión estándar de 10 ó 100 Mbit/s, y en 1200 metros para la sala (Figura 4.5).

- **Selección de la fibra óptica. Cálculo del tiempo de subida**

El equipo utilizado en telecomunicaciones ópticas posee una serie de parámetros estándares que determinan la selección de otros dispositivos y aporta algunos datos necesarios para el cálculo del enlace. Entre ellos se encuentran:

Tipo de cable	Fibra óptica multimodo de índice gradual
Diámetros	50/125, 62.5/125 y 100/140 μm
Ventana de atenuación	Primera y segunda
Longitud de onda de operación	820 nm y 1300 nm
Tasa de bits en error	10^{-9}
Distancia máxima del enlace	2000 m

Salvo algunas excepciones donde se requiere un medio de gran capacidad o un enlace cuya función no está relacionada con las telecomunicaciones, los parámetros antes mencionados podrían cambiar dependiendo de las necesidades del sistema óptico. Pero la mayoría del equipo empleado para la transferencia de información digital maneja estos datos de manera estándar. Otros, como el ancho espectral de la fuente, los niveles de potencia óptica transmitida y recibida, así como el tiempo de subida de los componentes pasivos, varían según el diseño del fabricante y de la aplicación final.

Los parámetros del equipo transmisor y receptor con que se cuenta para la red local de videoconferencia, son los siguientes:

CONCENTRADOR	SuperStack II de 3COM
Ventana de operación	Primera (820 nm)
Tipo de fuente y detector óptico	LED y FD PIN
Ancho espectral de la fuente óptica	75 nm
Tiempo de subida	10 ns
Potencia óptica transmitida	-15 dBm
Umbral de recepción	-28 dBm

Con estas especificaciones como antecedente, se seleccionó una fibra óptica multimodo de índice gradual con perfil óptico y diámetro de 62.5/125 μm , que posee las siguientes características:

Apertura numérica (AN)	0.2
Índice de refracción del núcleo (n_1)	1.46 (820 nm), 1.45 (1300 nm)
Ancho de banda (B)	160 MHz·km (820 nm), 500 MHz·km (1300 nm)
Coefficiente de atenuación (α)	3.5 dB/km (820 nm), 0.7 dB/km (1300 nm)

Como se indica en esta tabla de datos, la fibra óptica posee en la primera ventana de atenuación, un ancho de banda de 160 MHz/km proporcionada por el fabricante, pero en la práctica este valor cambia dependiendo del ancho espectral de la fuente óptica que se emplea en el enlace. El cálculo para determinar su banda pasante y después su tiempo de subida, depende de la dispersión como a continuación se muestra:

El primer término importante es la **dispersión modal** o el retraso que existe entre modos bajos y altos, después de recorrer toda la fibra de 1 km de longitud. Está dada por una variación de la ecuación 3.21 y para la fibra óptica multimodo de índice gradual con perfil óptico, se calcula como:

$$\Delta t_m = \frac{AN^4}{32n_1^3c} = \frac{0.2^4}{32(1.46)^3(3 \cdot 10^8)} = 0.05 \text{ ns / km}$$

Este parámetro está directamente relacionado con la apertura numérica de la fibra; si ésta última aumenta, mejora la aceptación de luz del canal pero incrementa notablemente la dispersión, efecto que reduce a su vez, la tasa de transmisión de información.

La luz que se inyecta con una fuente óptica en el núcleo de la fibra, está compuesta por varias longitudes de onda, contenidas todas dentro del ancho espectral $\Delta\lambda$, donde cada una posee una velocidad de propagación que ocasiona un retraso Δt_e , conocida como **dispersión espectral** y que se calcula como:

$$\Delta t_e = M(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 100 \cdot 10^{-9} \cdot 75 = 7.5 \text{ ns / km}$$

Este parámetro es proporcional al coeficiente de dispersión del material $M(\lambda)$ y al ancho espectral de la fuente óptica. Disminuye sustancialmente si la fuente es más directiva y se selecciona una fibra con bajo coeficiente de dispersión.

Para el silicio este coeficiente oscila entre los 80 y 120 ps/km·nm en la primera ventana y es aproximadamente de 20 ps/km·nm para la segunda ventana de atenuación, lo que resultaría en una dispersión mucho menor de 1.5 ns/km.

Finalmente, la **dispersión por efecto guíaondas** es un retraso que se debe a la componente espectral de cada modo de propagación debido a su longitud de onda. Es proporcional al coeficiente de dispersión por efecto guíaonda $G(\lambda)$, como se indica en la ecuación 3.24.

En una fibra óptica multimodo, este tipo de dispersión es muy baja (del orden de los picosegundos) comparada con la modal o espectral, razón por la cual se desprecia su valor en el cálculo.

El valor total de la dispersión, que involucra a las tres anteriores, posee el siguiente valor:

$$\Delta t_T = 1.1 \sqrt{\Delta t_m^2 + (\Delta t_e + \Delta t_g)^2} \approx 1.1 \sqrt{\Delta t_m^2 + \Delta t_e^2} = 1.1 \sqrt{(53.5 \cdot 10^{-12})^2 + (7.5 \cdot 10^{-9})^2} = 8.25 \text{ ns / km}$$

y un ancho de banda de 42 MHz·km.

Su tiempo de subida para una longitud de 300 m, es:

$$T_{FO} = \Delta t_T \cdot L = 8.25 \text{ ns / km} \cdot 0.3 \text{ km} = 2.5 \text{ ns}$$

Por lo tanto, el ancho de banda es:

$$B_{FO} = \frac{0.35}{T_{FO}} = \frac{0.35}{2.5 \cdot 10^{-9}} = 140 \text{ MHz para 300 metros}$$

El ancho de banda de la fibra óptica proporcionado por el fabricante, es de 160 MHz·km y 530 MHz para 300 metros. A partir del resultado anterior se comprueba que el ancho de banda ha disminuido a 42 MHz·km y 140 MHz para 300 metros, debido a las características espectrales de la fuente óptica del equipo transmisor.

• Velocidad de transmisión del enlace

Para determinar la máxima velocidad de transmisión del enlace, se toman en cuenta los tres elementos que lo constituyen: la fuente óptica, la fibra óptica y el fotodetector.

El tiempo de subida del LED y del FD es de 10 ns, según datos proporcionados por el fabricante del equipo empleado, mientras que el calculado para los 300 metros de fibra óptica es de 2.5 ns.

La rapidez del enlace completo se calcula entonces como:

$$T_T = 1.1 \sqrt{T_{FSO}^2 + T_{FO}^2 + T_{FD}^2} = 1.1 \sqrt{10 \cdot 10^{-9} + 2.5 \cdot 10^{-9} + 10 \cdot 10^{-9}} = 15.8 \text{ ns}$$

Por lo tanto, su ancho de banda es:

$$B = \frac{0.35}{T_T} = \frac{0.35}{15.8 \cdot 10^{-9}} = 22 \text{ MHz}$$

Si la técnica de modulación del equipo es tipo RZ, el ancho de banda es igual a su tasa de transmisión, es decir, de 22 Mbit/s. Si es NRZ, la tasa es el doble del ancho de banda, o sea, 44 Mbit/s.

Con base en estos resultados, cabe hacer algunos comentarios. La capacidad del equipo está limitada a 10 Mbit/s debido al estándar de red Ethernet. Esto nos permitiría optar por una fibra óptica de menor ancho de banda, toda vez que comparado con el de la fuente y del detector óptico, es considerablemente grande. Bastaría con una fibra de 28 ns de tiempo de subida o su equivalente, 12 MHz de ancho de banda, para usarla en este tipo de equipo.

Sin embargo, al tener la opción de contar con un puerto de comunicación de 100 Mbit/s para la información multimedia de la red local de videoconferencia, el uso de esta fibra óptica garantiza que se podrá cambiar de velocidad sin necesidad de hacer un nuevo tendido de cable. El equipo de red a 100 Mbit/s incluirá una fuente y un detector óptico con menor tiempo de subida para lograr esta velocidad ($\cong 1\text{ns}$), y será esta misma fibra el medio físico para conectar punto a punto, la red local con el nodo de Red UNAM.

• Cálculo energético

Pasando a otros términos en el análisis del enlace, corresponde ahora determinar la potencia óptica disponible en éste, después de diversas pérdidas debidas a la atenuación de la fibra óptica, a los conectores y de haberlos, a los empalmes.

Con base en los parámetros mencionados anteriormente, se sabe que la potencia óptica transmitida por la fuente (P_{tx}), es de -15 dBm , mientras que el umbral de recepción (P_{om}) es de -28 dBm , para una tasa de bits en error de 10^{-9} . Como se emplea una fibra óptica cuyo coeficiente de atenuación (α) es de 3.5 dB/km ($\lambda = 820\text{ nm}$), un conector en cada extremo del enlace, cada uno con pérdidas de 1 dB , y un margen de seguridad (M_s) de 3 dB , se concluye que la máxima longitud de la conexión es:

$$L = \frac{P_{om} - P_{tx} - P_{conec} - M_s}{\alpha} = \frac{28\text{dBm} - 15\text{dBm} - 2\text{dB} - 3\text{dB}}{3.5} = 2.2\text{km}$$

Resultado predecible por las características del equipo y porque es la distancia promedio que soporta el estándar 10BaseFL, suficiente para unir al edificio Valdés Vallejo y el nodo del IIMAS, longitud calculada en 300 metros.

4.3.2 Enlace para una cámara remota

Para ambos casos, tanto la sala como la red local de videoconferencia, se plantea emplear una cámara de video remota de 5 MHz , que se encuentre como máximo a 3000 metros de distancia, para cubrir eventos en distintos puntos de la Universidad. De acuerdo con el siguiente diagrama a bloques que muestra la configuración del enlace, la cámara se conecta directamente a un convertidor que digitaliza la señal y posteriormente a una interfaz eléctrica-óptica (E/O) que permita transmitir la información por fibra óptica. Una vez que se recibe en el área de videoconferencia se conecta al CODEC o a la computadora para su procesamiento y compresión, antes de ser enviada a Red UNAM o a la RNVC para su difusión.

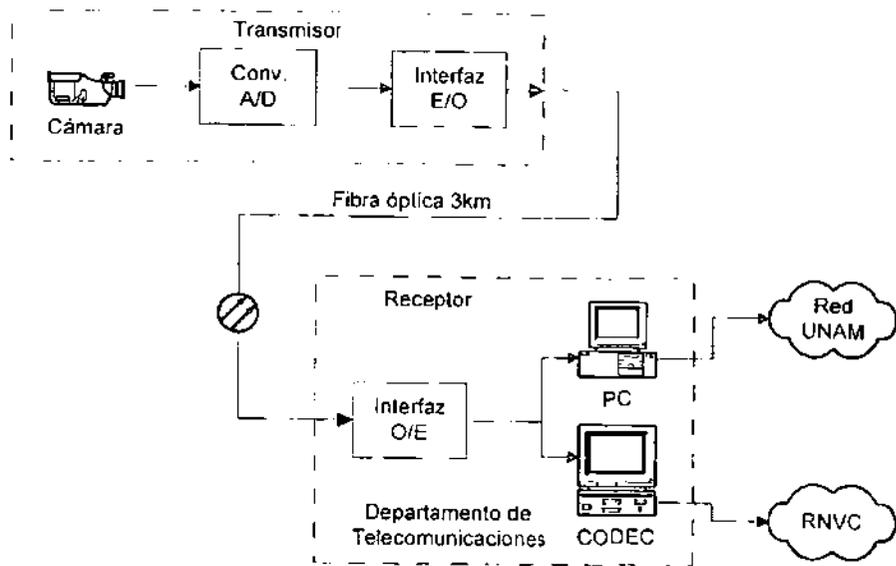


Figura 4.6 Diagrama del enlace de la cámara remota

La señal analógica de video de 5 MHz, se digitaliza y codifica a 8 bits por muestra, para obtener una señal digital de 80 Mbit/s. En la interfaz (E/O) cambia el ancho de banda de la señal a:

$$B_{opt} = \sqrt{2} B_{elec} = \sqrt{2}(80 \times 10^6) = 113 \text{ MHz}$$

La banda pasante del enlace total (de 3 km) debe ser mayor a la de la señal para evitar así distorsiones; es decir, $B_T > 113 \text{ MHz}$ ó $T_T < 3 \text{ ns}$.

Si a partir de la fórmula 3.32 se calcula el tiempo de subida de los componentes, considerando que no debe exceder el tiempo de subida del enlace total, resulta que:

$$T_{sec} = 1.1 \sqrt{T_{SO}^2 + T_{FO}^2 + T_{FD}^2} \leq 3 \text{ ns}$$

Si se selecciona una fibra óptica con $T_{FO} = 2.6 \text{ ns}$ y componentes activos con $T_{SO} = T_{FD} = 0.5 \text{ ns}$ para 3 kilómetros de enlace, entonces se cumple la condición anterior ($T_{secc} = 2.9 \text{ ns}$) y el ancho de banda del enlace es de 134 MHz (@ 3km), mayor al de la señal.

Las características deseadas de los componentes, son:

Dispositivo	Parámetros
Fibra óptica	B = 134 MHz @ 3 km B = 403 MHz @ 1 km
Fuente óptica	$T_{SO} = 0.5 \text{ ns}$
Fotodetector	$T_{FD} = 0.5 \text{ ns}$

Se requiere por otra parte, que la conexión posea una tasa de bits en error de 10^{-9} ($Q=6$); para ello se calcula el umbral de detección del fotodetector que nos garantiza esta calidad en la señal digital. De acuerdo con la ecuación 2.39, se calcula como:

$$P_{om} = \frac{eQB_{sec}}{2S_d} \left[Q + \sqrt{\frac{8\pi KTF(C+C_e)}{e}} \right]$$

El umbral de detección (P_{om}) depende de diversos factores. Para un amplificador de voltaje con un factor de ruido $F=1$, $C+C_e=10$ pF, un $B_{sec}=134$ MHz y un fotodetector con una sensibilidad $S_d=0.5$, el umbral de detección es de $0.8 \mu W$ ó -30 dBm.

Considerando que el enlace puede seccionarse con máximo 4 empalmes o conectores, cada uno con pérdidas de 1 dB, una fibra con coeficiente de atenuación de 0.7 dB/km y un margen de seguridad de 3 dB, el análisis energético arroja lo siguiente:

$$P_{tx} \leq P_{om} - \alpha \cdot L - 4P_c - M = -30 + (0.7 \cdot 3) + (4 \cdot 1) + 3 = -20.9 dBm$$

La potencia óptica de la fuente deberá ser menor a 21 dB, tomando como constante el margen del enlace (9.1 dB), para asegurar que la tasa de bits en error sea la deseada y que la potencia óptica que llega al detector, siempre estará debajo del umbral de detección.

En resumen, los parámetros mínimos de los componentes del enlace, son los siguientes:

Fuente óptica	Tiempo de subida	$T_{SO} = 0.5$ ns
	Potencia óptica transmitida	$P_{tx} \leq -20$ dBm
	Ancho espectral	$\Delta\lambda = 120$ nm
	Longitud de onda de operación	$\lambda = 1300$ nm
Fibra óptica	Diámetro	62.5/125 μm
	Coefficiente de atenuación	$\alpha = 0.7$ dB/km
	Ancho de banda	AB = 500 MHz·km
	Ventana de atenuación	Segunda
	Apertura numérica	AN = 0.2
	Índice de refracción del núcleo	$n_1 = 1.45$
Fotoreceptor	Coefficiente del material	$M(\lambda) = 20$ ps/km·nm
	Tiempo de subida	$T_{FD} = 0.5$ ns
	Umbral de detección	$P_{om} = -30$ dBm
	Sensibilidad	$S_d = 0.5$ A/W

Estos datos son los resultado del cálculo temporal y energético del enlace de la cámara remota; con base en ellos se diseña la conexión y se selecciona el equipo de video.

4.4 Sesiones de videoconferencia de prueba

Con el propósito de realizar **sesiones de videoconferencia de prueba**, se analizó con qué equipo y conexiones cuenta actualmente el Departamento de Telecomunicaciones para acceder a la RNVC o a Red UNAM.

Para la **sala de videoconferencia**, se dispone del equipo de comunicaciones (ViewStation V.35 de Polycom), el monitor y la sala de juntas, pero aún falta la interfaz eléctrica-óptica (FOM-40 de RAD) para la transferencia de información por fibra óptica y la conexión dedicada hasta la DGSCA que provee acceso a la RNVC.

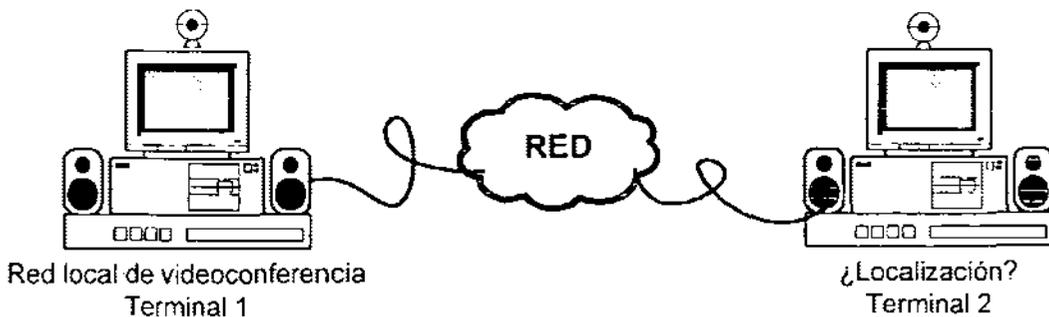
La **red local de videoconferencia (RLVC)** tiene mayores posibilidades, toda vez que cuenta con un concentrador de seis puertos y una computadora personal con tarjeta de red, ambos para fibra óptica bajo el estándar Ethernet a 10 Mbit/s; además de una videocámara digital y una conexión de fibra óptica entre el Laboratorio de Electromagnetismo y el concentrador del cuarto piso del edificio, que provee de acceso a Red UNAM y por ende, a la **Internet**.

Sin embargo, por carecer de direcciones IP reales, este acceso se hace por el Laboratorio de Cómputo del Departamento de Telecomunicaciones, el que a través de su servidor proxy nos asignó direcciones IP virtuales.

Las posibilidades de usar esta red local para hacer pruebas por **Mbone** son, por el momento, definitivamente nulas. La configuración especial del ruteador de Red UNAM para tal propósito y su gestión ante la DGSCA, requerirá de más tiempo; no obstante, se cree que una vez instalada la red local de videoconferencia y funcionando como tal, se procederá a promover el uso de Mbone y de la tecnología de multidifusión.

En cuanto a conexiones se refiere, se encuentra disponible un par de fibras ópticas tendidas desde la planta baja y hasta el cuarto piso del edificio Luis Valdés Vallejo. Se pretende continuar el tendido hasta el conmutador ATM del IIMAS para la red local de videoconferencia, o bien, hasta la DGSCA para la sala de videoconferencia. Todo dependerá de la gestión ante esta Dirección para determinar qué conexión se libera primero y del avance en cuanto a la adquisición del equipo necesario para cada proyecto.

La **configuración** empleada para establecer sesiones de videoconferencia de prueba entre dos terminales remotas, es la siguiente:



Se estableció comunicación por IP entre dos computadoras personales. Una de ellas (terminal 1) se encuentra en la RLVC, y la otra (terminal 2):

- En la misma red y edificio,
- En una red local distinta,
- En una red externa a C.U.

También se estableció comunicación por modem hacia la terminal de la RNVC.

Las características técnicas de las terminales y de las videocámaras empleadas, se muestran en la siguiente tabla:

	TERMINAL 1	TERMINAL 2		
Localización	Laboratorio de Electromagnetismo 3er piso edificio Luis Valdés Vallejo	Cubículo en planta baja del edificio Luis Valdés Vallejo	Departamento de control, edificio de la DIE	LAN en una empresa de telecomunicaciones en Tlalpan
Tipo de dirección IP	Virtual	Virtual	Real	Real
Características de la computadora	100 MHz 80 MB 2MB	333 MHz 190 MB 4 MB	450 MHz 56 MB 8 MB	450 MHz 64 MB 4 MB
Características de la cámara:	Pixera	EZCamII Ezonics	Logitech Quickcam Express de	Creative Webcam Go
1. Resolución (píxeles)	640x480 320x240 160x120	352x288 320x240 176x144 160x120	352 x 288	640x480 352x288 320x240 176x144 160x120
2. Tasa de trama máxima	30 fps	30 fps	30 fps	30 fps
3. Requisitos mínimos	166 MHz 32 MB RAM Interfaz PCI	300 MHz 64 MB Puerto USB	200 MHz 16 MB RAM Puerto USB	200 MHz 16 MB RAM Puerto USB

En ambas computadoras se empleó el mismo software para videoconferencias: **Netmeeting versión 3.01** de Microsoft, que permite el intercambio de datos, audio y video, de manera

independiente o conjunta, entre terminales que se encuentran alejadas geográficamente o dentro de la misma red.

Provee además, de otros servicios como el chat, una pizarra para textos o dibujos, la transferencia de archivos y la posibilidad de compartir programas o archivos con otros usuarios. A falta de una cámara digital, existe la posibilidad de ser sólo receptor de la señal de video, pero participar activamente con audio y datos.

Netmeeting permite realizar llamadas a través de seis Directorios de Internet (ulsx.microsoft.com), servidores de videoconferencia públicos o privados, páginas Web, marcando la dirección IP de otro usuario, su número telefónico o número RDSI.

Durante la configuración del software se fija el ancho de banda disponible para la sesión de videoconferencia, dependiendo del tipo de red empleado; es decir, por modem la velocidad parte de los 14.4 kbit/s, por la RDSI o cable varía y por LAN se fija un valor predeterminado de 435.19 kbit/s.

En la sección de video, cuenta con tres tamaños de ventana y posibilidad de cambiar la calidad:

Tamaño de ventana	Pequeño	Mediano	grande
Calidad	Mejor calidad		Mayor rapidez

Para el audio, tiene nueve CODECS. Los tipo estándar son:

- G.723.1 a 6.4 kbit/s
- G.723.1 a 5.3 kbit/s
- Ley A, 8 bit, 8000 Hz
- Ley μ , 8 bit, 8000 Hz
- ADPCM, 4 bit, 8000 Hz
- CELP a 4.8 kbit/s, 16 bits, 8000 Hz

Los requisitos básicos para instalar este software y ejecutar audio, video y datos de manera simultánea, son:

<input type="checkbox"/> Computadora personal con velocidad de procesamiento mayor a los 133 MHz y mínimo 16 MB de memoria RAM
<input type="checkbox"/> una conexión de banda ancha
<input type="checkbox"/> tarjeta de audio con micrófono y bocinas
<input type="checkbox"/> tarjeta de captura de video o cámara con driver de captura de video

Para determinar el ancho de banda que ocupa la señal de audio, video y datos, de manera independiente y conjunta en una sesión de videoconferencia, se utilizó Net.Medic versión 1.2.2. Este software permite analizar la velocidad de transmisión y recepción de información durante la conexión, el tráfico en la Intranet y en la Internet, así como el porcentaje del CPU empleado en el procesamiento de las señales.

4.4.1 Desempeño de la sesión

Se realizaron varias sesiones de prueba entre la terminal 1 y las terminales 2, para estudiar el desempeño del software de videoconferencia, de la conexión y de la calidad de la imagen transmitida y recibida.

En todos los casos se estableció la conexión sin problema alguno, siempre desde la terminal con dirección IP virtual a la que tiene dirección real, porque sólo estas últimas son llamables. Dos terminales con dirección virtual pueden comunicarse entre sí sólo cuando se encuentran en la misma red.

Se observó que durante una **sesión con Netmeeting**, la calidad de la imagen y del audio depende de tres factores:

- El ancho de banda disponible en la red local
- El tráfico en la Internet
- La velocidad de procesamiento del CPU o de la tarjeta de captura de video

Sólo se genera tráfico cuando hay actividad; es decir, cuando se habla, hay movimiento continuo en la imagen y se comparten programas o archivos, se incrementa la tasa de transferencia de información; de lo contrario disminuye hasta cero.

Compartir algún programa o archivo y transmitir audio y video de manera simultánea, alcanza el ancho de banda máximo que fija Netmeeting a sesiones en redes de área local, que es de 435 kbit/s. Los otros servicios de datos no son tan demandantes.

El audio tiene un comportamiento más predecible y requiere de un ancho de banda casi constante; por ejemplo, con el estándar G.723.1 ocupa hasta 6.4 kbit/s más el 40% para el encabezado del protocolo IP. No así el video, cuya velocidad es proporcional a los cambios en la imagen y el tamaño de la ventana, y rebasa en momentos de gran actividad los 350 kbit/s.

El ancho de banda y el nivel de tráfico, limita la velocidad de transferencia y ocasiona el retraso o la pérdida de paquetes de información, hecho que se ve reflejado en la calidad del video, en la continuidad del audio y en la transferencia de archivos.

Si la cámara de video cuenta con tarjeta de captura, gran parte del procesamiento de la señal corre a cargo de esta tarjeta, lo que elimina el trabajo del CPU y le permite realizar otras operaciones simultáneas a la sesión de videoconferencia. En caso contrario, todo el trabajo recae sobre el procesador al grado de llegar a emplear la computadora únicamente para la sesión y evitar abrir cualquier otro programa o realizar otra actividad, para evitar que se deteriore la comunicación. De aquí que las terminales que se ocupen con este propósito, deberán contar con altas velocidades de procesamiento, superior a los 350 MHz, y mínimo 64 MB de memoria RAM y 8 MB de memoria de video.

Se observó también que el desempeño de una sesión de videoconferencia, depende directamente de **la tasa de tramas por segundo (fps)** recibidas o transmitidas durante la conexión. Ésta varía proporcionalmente con la cantidad de movimiento del individuo y el nivel de detalle. La tasa pico que ofrece el fabricante de una cámara, generalmente se refiere a una imagen con muy poco movimiento, porque durante una sesión difícilmente se maneja una tasa constante. Un CODEC puede proveer una secuencia a 26 fps durante un segundo y a 4 fps el siguiente, lo que produce un video con calidad variable comparado con uno que maneja 15 fps de manera continua.

Esta tasa constante no implica necesariamente una gran calidad de video, depende también de la resolución y cantidad de colores que tenga la imagen, porque en ocasiones la tasa de tramas es elevada pero la información que se tiene de la imagen es baja.

El ancho de banda disponible limita la tasa de tramas por segundo que se pueden transmitir o recibir; es decir, a bajas tasas de transmisión como ocurre en una línea telefónica analógica, es muy difícil proveer video de buena calidad aún con baja resolución.

En una sesión de videoconferencia se maneja típicamente una tasa de tramas que oscila entre los 8 y 15 fps; mejora sustancialmente en un medio con mayor ancho de banda, como en una LAN, donde se pueden manejar hasta 30 fps.

Las cámaras empleadas para las sesiones de prueba, manejan formatos de imagen típicos para H.261 y H.263 como CIF (352x288) y QCIF (176x144), y otros opcionales como 160x120, 320x240 y VGA (640x480). La mayoría alcanza la máxima tasa de tramas de 30 fps. Este dispositivo es muy importante si se quiere lograr video de buena calidad; es un factor determinante en la labor del CODEC. Requieren terminales con velocidad de procesamiento más alta de la que tiene la terminal 1, hecho que limitó sustancialmente su funcionamiento.

En todas las sesiones hubo **retardo** de audio y video, causado básicamente por el nivel de tráfico y por el procesamiento de las señales para su compresión y decompresión. Los valores típicos para videoconferencia están entre los 200 y 500 ms.

También se observó una falta de **sincronización** entre el audio y el video, fácilmente perceptible en el movimiento de los labios. Este es positivo o negativo, es decir, el audio se adelanta o se retrasa. El protocolo T.120 para datos afecta significativamente la sincronización porque consume mucho ancho de banda del canal total. El valor máximo e imperceptible, es de 200 ms.

En cuanto al **audio** se refiere, se presentó continuamente un efecto de retroalimentación donde, de manera cíclica, el audio recibido es retransmitido a la fuente, y que al principio sólo pudo eliminarse con la deshabilitación del micrófono o de las bocinas.

A diferencia del equipo de videoconferencia para salas interconstruidas, el de escritorio no tiene cancelación de eco; para evitarlo es necesario modificar continuamente la sensibilidad del micrófono y el volumen de las bocinas, que si bien no elimina la retroalimentación, evita que los efectos sean tan nocivos. Algunas formas de disminuir este fenómeno es establecer una comunicación half-duplex, donde sólo uno habla y el otro escucha; alejar el micrófono y las bocinas lo más que se pueda o utilizar audífonos.

Después de probar con distintos micrófonos y bocinas, se observó la importancia de emplear dispositivos de buena calidad para mejorar la calidad de la comunicación.

Como se menciona al principio de este apartado, la segunda prueba con videoconferencia se hizo a través de **modem**. Los resultados fueron muy malos toda vez que la comunicación se estancaba por algunos minutos y avanzaba de manera lenta e impredecible. Sólo podían verse imágenes fijas, sin movimiento alguno, y la voz era entrecortada e incoherente. Usar otros servicios para datos y manejar diversos programas en la computadora, fue totalmente imposible. Esto permitió concluir de manera muy general las limitantes que impone en un extremo, el ancho de banda del canal telefónico.

A manera de conclusión, se puede asegurar que las sesiones de videoconferencia en redes de área local arrojan muy buenos resultados, aún cuando éstas se caracterizan por ser medios sin calidad de servicio garantizado. El desarrollo de la red local de videoconferencia en el Laboratorio de Electromagnetismo del Departamento de Telecomunicaciones, parte de estas observaciones para la selección del equipo, del software y sobre todo, para la gestión del enlace óptico independiente de 10 Mbit/s hasta el conmutador del IIMAS.

Una vez que se haya instalado parte de la red y se cuente con la conexión antes mencionada, el siguiente paso será hacer pruebas con software de características más avanzadas para establecer sesiones tipo punto-multipunto, que requieren no sólo mayor ancho de banda sino reflectores o puentes de video bajo el protocolo IP, para conmutar la señal y contactar con varias fuentes o destinos en la Internet.

Posteriormente se estudiará el uso de Mbone y los requisitos técnicos que implica su implantación en esta misma red local de videoconferencia.

4.5 Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha permitido resaltar la importancia que tiene el diseño y la implantación de un sistema de videoconferencia en la Facultad de Ingeniería, no sólo como una novedosa herramienta de comunicación, sino como un proyecto de experimentación y análisis que podría en un futuro cercano servir como punto de partida para la creación de nuevas líneas de estudio.

Las razones que sustentan su creación, son principalmente los beneficios educativos que se obtienen con su uso y el apoyo a diversas áreas técnicas que alberga esta facultad, a quienes seguramente será de gran utilidad en el desarrollo de diversos proyectos. En su momento se expusieron los objetivos que con éste sistema se persiguen, así como su factibilidad gracias a las características que ofrece Red UNAM para su diseño.

En términos técnicos, el uso de un enlace óptico como medio de transmisión, permite incursionar en la nueva etapa de las telecomunicaciones que ha traído consigo la invención de la fibra óptica. Ésta no sólo satisface los requisitos en cuanto a ancho de banda que demanda una sesión de videoconferencia, además es un medio confiable, inmune a la interferencia que se presenta por los cables adyacentes en los ductos que la transportan, fácil de instalar por su tamaño y peso, no posee mecanismos de atenuación que limiten su desempeño conforme aumenta su velocidad de transmisión y, lo más importante, es escalable, una vez que funcione a 10 Mbit/s, lo hará a 100 y hasta 500 Mbit/s, sin necesidad de hacer un nuevo tendido de cable. De esta forma, si el enlace debe actualizarse, para su diseño bastará con considerar los nuevos dispositivos que en él intervienen y el sistema estará listo para manejar nuevas y futuras tecnologías.

La demanda de ancho de banda crece aceleradamente con la creación de nuevas aplicaciones como la realidad virtual, las simulaciones tridimensionales y el manejo de varias canales de video de manera simultánea, y pronto terminará por sucumbir. Se asegura que en el 2002, el tráfico de datos en redes públicas será 17 veces mayor que el manejado en 1998; se predice además un mayor número de usuarios, necesidad de mayores velocidades de acceso, tiempos de conexión más prolongados y el uso de servicios de

multimedia más robustos, que duplicarán el tráfico de las redes locales por lo menos cada año. Red UNAM no está exenta de estos cambios, como tampoco lo estará la red local de videoconferencia; sin embargo, la DGSCA ha puesto especial atención en este punto y con el propósito de evitar futuros problemas, continúa expandiendo su backbone de fibra óptica y estudiando mejores mecanismos de transmisión. Esto también obliga a la red de videoconferencia a contar con un enlace óptico para enfrentar con éxito futuras vicisitudes.

Pasando a otro tema relacionado con el sistema de videoconferencia, surge la cuestión sobre qué conviene más, una red o una sala de videoconferencia.

Desde el punto de vista técnico, se sabe que la sala opera a través de la RNVC, la cual asigna un ancho de banda constante para la comunicación entre dos puntos distantes, con un rendimiento de canal predecible. No obstante, también existen retrasos y problemas diversos que deterioran la calidad de la transmisión. Para participar en una conferencia multipunto, la sala requiere de una plataforma H.320 que incluye entre otros elementos, un MCU para la conmutación y el procesamiento de los canales de audio y video. La velocidad de transmisión es normalmente de 384 kbit/s, suficiente para una moderada calidad de video; no es común pero el ancho de banda puede aumentar para lograr mayor resolución en la imagen. La administración de este sistema, ideal para encuentros grupales, es más compleja por la manipulación del equipo involucrado, como el CODEC, la cámara y los dispositivos periféricos. La realización de conferencias multipunto está sujeta a un calendario de eventos que administra la DGSCA; para actuar como fuente de información será necesario apartar el canal con anticipación, de lo contrario no se podrá transmitir por él. Esto limita seriamente su operación, razón por la cual se utiliza generalmente para sesiones administrativas o de jefaturas.

La red local de videoconferencia, por el contrario, usa canales de conmutación de paquetes donde el ancho de banda se comparte con otros usuarios y aplicaciones. Por ello, es difícil predecir con exactitud el rendimiento del canal que se obtendrá durante la conferencia. Asimismo, la división de la información en paquetes y el proceso de enrutamiento desde el origen hasta el destino, provoca pérdidas, dilaciones y recepción de paquetes en desorden, en condiciones de alta carga. Entre sus ventajas cabe citar su facilidad para realizar conferencias multipunto, su ubicuidad y flexibilidad para experimentar con el formato de la imagen, la calidad del audio y del video, el ancho de banda asignado y la rapidez de las aplicaciones, por mencionar sólo algunos factores que permitirán plantear diferentes esquemas de transmisión para eludir las condiciones del medio.

En caso de implantarse en el departamento de Telecomunicaciones, será difícil mantener una conferencia desde este lugar aún con calidad de señal muy pobre, debido a los altos volúmenes de tráfico provenientes de las diferentes redes del edificio, que generan congestionamientos y cuellos de botella al converger en un mismo canal de 10 Mbit/s. Mejores resultados se obtendrán con un enlace óptico directo al nodo en el IIMAS. En cuanto a Red UNAM, su portadora óptica provee suficiente ancho de banda para sesiones de videoconferencia simultáneas entre puntos remotos.

En términos económicos, una sala de videoconferencia es mucho más cara que una red local de videoconferencia, aun cuando ésta última requiere un mayor número de dispositivos. El tipo y la calidad del CODEC, que absorbe aproximadamente el 70% del monto total del equipo, determinan el precio del sistema, que va desde los \$200,000 y

puede duplicarse o triplicarse dependiendo del tipo de cámara, monitor, equipo periférico y sistema de audio. Lo anterior sin tomar en cuenta el costo del mobiliario y el acondicionamiento de la sala.

En el caso de la red local de videoconferencia, el costo aproximado es de \$150,000, que se reparte entre los dispositivos ópticos, el equipo de cómputo y el de videoconferencia H.323. El lugar no demanda grandes requerimientos, por eso no implica un costo adicional. Las características anteriores indican que la red local es mejor opción para realizar sesiones con fines académicos.

El Departamento de Telecomunicaciones cuenta con gran parte del equipo necesario para instalar la sala y la red de videoconferencia. Para la primera, se tiene un monitor de televisión, la cámara y el sistema de audio; el lugar de alojamiento es una sala de juntas con mobiliario para varios participantes. Sólo hace falta hacer el tendido de fibra óptica entre la sala y la DGSCA, además del modem de fibra óptica que hace las veces de interfaz entre el equipo eléctrico y el medio de transmisión óptico.

En el caso de la red local de videoconferencia, se cuenta con un concentrador de 6 puertos y diez tarjetas de red para fibra óptica, un OTDR, conectores, herramienta y dispositivos para realizar los empalmes, una videocámara digital y un carrete de fibra óptica multimodo de 62.5/125 μm . Sin embargo, aún no se tienen kits de videoconferencia y equipo de cómputo que cumpla con los requisitos mínimos de procesamiento (más de 120 MHz). Sólo dos terminales, una de 100 y la otra de 60 MHz, con las que se han establecido sesiones y se ha probado un software de videoconferencia sobre IP. El laboratorio de Electromagnetismo y Fibra Óptica será la sede de esta red.

La creación de la red local de videoconferencia seguramente tardará más tiempo por la adquisición del equipo necesario y la gestión del enlace definitivo, ya sea uno dedicado hasta el conmutador del IIMAS, o el que se hizo meses atrás hasta el conmutador del 4º piso para salir por el backbone del edificio. Lo importante es que la transferencia de información multimedia no cause problemas a las demás redes y para que esto ocurra, es necesaria una profunda reestructuración que aún se encuentra en su primera etapa.

En lo relacionado con los tipos de redes propuestos para la transmisión de información, ya se hizo mención de la RNVC, pero conviene tratar el caso de la Internet y de Mbone, no sin antes mencionar que la misma red local de videoconferencia se puede configurar para emplear estos dos modos de conferencia de manera alternada, no al mismo tiempo. Todo depende del tipo de dirección que se le asigne a la interfaz de red para determinar el funcionamiento de ésta, en forma de unidifusión o multidifusión.

La Internet, que resulta de la interconexión de redes de área amplia a nivel mundial, utiliza dos protocolos sobre IP que proporcionan conectividad global a redes disímiles. El primero es TCP, diseñado y adecuado para la transmisión de datos, con un mecanismo de corrección de errores y retransmisión de paquetes que en ocasiones retrasa la llegada de la información. El segundo es UDP, utilizado para el audio y el video de una conferencia, donde la prioridad no es tanto la fidelidad o perder algunos paquetes, sino la rapidez con la que deben llegar a su destino para su rápido procesamiento. Lo anterior, aunado al tráfico siempre creciente en la Internet y la ausencia de una calidad de servicio, imposibilitan la comunicación en tiempo real y degradan sustancialmente la calidad de la sesión por las dilaciones y la pérdida de paquetes; no obstante, sigue siendo el modo ideal por su bajo precio, facilidad de acceso y cobertura.

Mbone por usar la capa de transporte de la Internet, presenta algunos problemas como las dilaciones en la transmisión de la información y otros privativos de esta red virtual, por su creciente popularidad y tecnología en vías de desarrollo.

El primer inconveniente de Mbone es la necesidad de incorporarse a ella a través de una red basada en túneles que permita la comunicación con nodos vecinos para, a través de éstos, enviar y recibir paquetes de información. La configuración de los túneles requiere de tiempo para contactar con los puntos más cercanos de conexión y después para sentar las condiciones técnicas que permitan entrar en operación. Esto se debe a que aún no se cuenta con equipo de redes que soporte la tecnología de multidifusión y toda ella debe implantarse manualmente, lo que la hace en ocasiones un sistema poco eficiente.

El segundo tiene que ver con su ancho de banda, actualmente de 500 kbit/s y suficiente para realizar conferencias de buena calidad. Conforme Mbone adquiere popularidad, este ancho de banda no será suficiente para soportar las altas demandas a que haya lugar. No sólo el número de eventos causará problemas, también la cantidad de usuarios que participen en esta red virtual. Llegará el momento en que las demandas exijan la transmisión de video de alta resolución y formato CIF, además de sesiones multipunto, hecho que aún está lejos de llevarse a cabo con éxito.

No obstante, la solución a este problema es el tiempo. Hace años, los enlaces de las redes de extensión amplia consistían en jerarquías digitales de baja velocidad; en unos años y conforme entre en operación el modo de transferencia asincrónica (ATM) y los enlaces ópticos, así como el uso de la fibra óptica desde la fuente hasta el nodo de transmisión, la capacidad de los enlaces aumentará hasta que la banda pasante deje de ser un obstáculo para participar en sesiones con buena calidad de señal.

El tercer problema está relacionado con TCP, el protocolo de red de la Internet que no provee el soporte necesario para establecer comunicaciones en tiempo real. Esto significa que actualmente no se puede operar de manera simultánea, ya que el tráfico presenta grandes dilaciones entre el emisor y el receptor, y las tasas de pérdida de paquetes son muy altas.

El cuarto y último inconveniente de Mbone, es que sus herramientas de trabajo y aplicaciones para teleconferencia se encuentran en desarrollo, y aun cuando se cuenta con distintas alternativas ofrecidas por algunos sistemas operativos como Windows y UNIX, existen problemas de interoperabilidad que entorpecen la comunicación.

La solución inmediata a todos estos problemas surge con la nueva versión del protocolo de Internet: IPv6, lo que cambiará su nombre a Internet2. A él se integra una serie de tecnologías que garantizarán por primera vez la calidad del servicio en la red de conmutación de paquetes, impulsarán el desarrollo de la tecnología de multidifusión, revolucionará las aplicaciones en tiempo real y disminuirá en lo posible las dilaciones y las tasas de pérdida de paquetes. Se dará prioridad a las sesiones multimedia interactivas que demanden grandes anchos de banda y se podrán distribuir mensajes para multidifusión de manera más eficiente.

Su adopción tomará tiempo pero se espera se lleve a cabo en un periodo promedio de diez años. En México, durante los primeros meses de 1999, se firmaron los estatutos de la Corporación Universitaria para el Desarrollo de Internet2, con la participación de diecisiete instituciones educativas de nivel superior (entre ellas la UNAM), TELMEX e Internet2 de los Estados Unidos, con el propósito de comenzar su implantación para fines totalmente académicos y de divulgación científica.

Poco más de un año después, en la primera semana del mes de noviembre del año pasado, la compañía de telefonía local mexicana puso al alcance de las instituciones educativas antes mencionadas, una red de alta velocidad basada en esta nueva tecnología para la estimulación de nuevas aplicaciones tales como las bibliotecas digitales, los laboratorios virtuales, la educación a distancia, la teleinmersión y la videoconferencia, entre otros.

Desde que se anunció la posibilidad de adoptar esta tecnología, la Máxima Casa de Estudios se dio a la tarea de evaluar la nueva generación de Internet y en su momento, estableció una serie de proyectos de aplicación, entre los que se encuentran bibliotecas digitales, un acervo digital astronómico con acceso de alta velocidad, la conversión digital del acervo de TV-UNAM y Radio-UNAM para su distribución en Internet2, diversos talleres virtuales, servicio de video en demanda bajo los formatos MPEG1 y MPEG2 a una velocidad máxima de 6 Mbit/s y una biblioteca médica nacional. Además, comenzó a analizar la distribución en tiempo real de video y audio a través de la red, la creación de "colaboratorios" para intercambio sincrónico de imágenes, datos y aplicaciones, y la realización de sesiones de videoconferencia empleando señales de alta calidad bajo el estándar H.323 [14]. En todos los casos el desarrollo correrá a cargo de las diferentes dependencias universitarias que cuenten con la infraestructura necesaria para colaborar activamente, siempre con fines académicos y de investigación.

De impulsar la creación de una red de videoconferencia en el departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, además de poder incorporarse a las actividades y proyectos con motivo de la próxima implantación de Internet2, tendrá como trabajo futuro la experimentación con los diferentes tipos de red propuestos para determinar esquemas de transmisión y generar nuevas aplicaciones que, además de satisfacer las necesidades técnicas de los diferentes departamentos de esta facultad, apoyen los procesos educativos y de investigación.

El único propósito será el uso de las nuevas tecnologías para reforzar el desarrollo académico y lograr una fusión universal que permita expandir el conocimiento para promover la educación, una de las necesidades más imperiosas de nuestro país.

B I B L I O G R A F Í A

1. Hendricks, Charles E.; Steer, Jonathan P., Videoconferencing Frequently Asked Questions (FAQ), diciembre 1994. <http://www.bitscout.com.faqtoc.html>
2. Ornelas, Ceja Eduardo; Díaz, Romo Francisco, Tesis: La videoconferencia, México 1997. <http://video.comserv.ipn.mx/tesis/introgen.html>
3. Scharphorst, Richard, Videoconferencing and videotelephony: technology and standards, Artech house, USA 1996.
4. Rosen, Evan, Personal videoconferencing, Manning, USA 1996.
5. Szuprowicz, Bohdan O., Multimedia Networking, Mc Graw-Hill, USA 1995.
6. Rettinger, Leigh Anne, Tesis: Videoconferencing: technology and use for remote seminar delivery, USA 1995.
http://www2.ncsu.edu/cos/service/ece/project/succeed_info/larettin/thesis/tit.html
7. Ponce de León, Javier C., Videoconferencia en redes, Revista RED, año VI, febrero 1996, no. 65, pp. 34-38.
8. R. Vetter, Videoconferencing on the Internet, Computer communications, vol. 28 no. 1, enero 1995, pp. 77-79.
9. Savetz, Kevin; Randall, Neil, MBONE: Multicasting tomorrow's Internet.
<http://www.savetz.com/mbone>
10. Casner, Frequently Asked Questions (FAQ) on the Multicast Backbone (MBONE).
<http://www.cs.columbia.edu/>
11. M. Macedonia; D. Brutzman, Mbone provides audio and video across the Internet, Computer, vol. 27 no. 4, abril 1991, pp. 60-63.
12. Tanenbaum, Andrew S., Computer Networks, 3rd. Edition, Prentice Hall, USA 1996.
13. Backbone de red universitaria. <http://www.dtd.unam.mx/redunam/backbone.html>
14. Proyectos de aplicación INTERNET2 en la UNAM (condensado).
<http://www.internet2.unam.mx>
15. Recomendación ITU-T H.323, Sistemas y equipos videotelefónicos para redes de área local que proporcionan una calidad de servicio no garantizada, febrero de 1996.
16. A primer on the H.323 Series Standard. <http://gw.databeam.com/h323/h323primer.html>

17. Recomendación ITU-T G.711, Modulación por impulsos codificados de frecuencias vocales, Ginebra 1972.
18. Recomendación ITU-T G.722, Codificación de audio de 7 KHz dentro de 64 kbit/s, Melbourne 1988.
19. S. Gale, Desktop videoconferencing: technical advances and evaluation issues, Computer communications, vol. 15, no. 8, octubre 1992, pp. 517-525.
20. Harris, Dale A., Online distance education in the United States, IEEE Communications Magazine, vol. 37, no. 3, marzo 1999, pp. 87-91.
21. Korpi, Markku; Kemar, Vineet; Supplementary Services in the H.323 IP Telephony Networks, IEEE Communications Magazine, vol. 37, no. 7, julio 1999, pp. 118-125.
22. Nérrou, Jean Pierre, Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas, Trillas, México 1991.
23. Leon, W. Couch II, Modern Communication Systems: Principles and Applications, Prentice Hall, New York 1995.
24. Rubio, Baltasar Martínez, Introducción a la ingeniería de la fibra óptica, Editorial RAMA, Madrid 1994.
25. Jardón, Hildeberto A., Linares, Roberto M., Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas, Alfaomega, México 1995.
26. De Cusatis, Casimer; Maass, Eric; Handbook of Fiber Optic Data Communications, Academic Press, San Diego 1998.
27. H. Weik Martin, Fiber Optics Standard Dictionary, 3rd. Edition, Chapman & Hall, USA 1997.
28. Feeman Roger L., Reference manual for telecommunications engineering, John Wiley & Sons, Inc., USA 1996, capítulo 9.
29. Okoshi Takanori, Optical fibers, Academic Press, UK 1982.
30. Green, Lynne D., Fiber optic communications, Boca Raton, USA 1993.
31. Chomycz Bob, Fiber optics installations, a practical guide, Mc Graw-Hill, USA 1996.