

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENERIA
MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENERIA



**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBA DE CAMPO PARA DISPOSITIVOS OPTICOS DE
TECNOLOGIA COAXIAL HIBRIDA**

TESIS

TITULO/GRADO A OBTENER:

MAESTRIA EN INGENERIA

PRESENTA:

MARCO ANTONIO DIMAS NUÑEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ADRIANA NAVA VEGA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO ALVAREZ GUZMAN

TIJUANA, B.C. DICIEMBRE, 2009

Universidad Autónoma de Baja California
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FOLIO No. 033

Tijuana, B. C., a 23 de noviembre de 2009

C. MARCO ANTONIO DIMAS NÚÑEZ
Pasante de: Maestro en Ingeniería
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los CC. Dres. Adriana Nava Vega y Eduardo Álvarez Guzmán

quien será el responsable de la calidad de trabajo que usted presente, referido al
tema Diseño de un banco de prueba de campo para dispositivos ópticos de tecnología
coaxial híbrida.

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- ARQUITECTURA BÁSICA DE SISTEMA DE CABLE
- II.- DESEMPEÑO DE UN SISTEMA HFC
- III.- INTRODUCCIÓN A LA FIBRA ÓPTICA Y LOS LASERES
- IV.- IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA


Dra. Adriana Nava Vega

Asesor


Dr. Eduardo Álvarez Guzmán

Asesor


MC. Luis Enrique Palafox Maestre

Sub-Director Secretario


MC. Rubén Guillermo Sepúlveda Marques

Director

RESUMEN

El trabajo de investigación consiste en diseñar, construir y poner en funcionamiento un banco de pruebas para los componentes denominados *headends* (Cabecera del sistema. En adelante se usara el termino en ingles) diseñados por la empresa Arris, en su planta de Tijuana.

Durante el trabajo se seleccionaran las pruebas de campo convenientes para la simulación de una red de televisión por cable, con tecnología hibrida de fibra óptica y cable coaxial, definiendo las características de un banco que cumpla los estándares a los que están sometidos los productos, se documentara un manual de pruebas y resultados obtenidos, se documentara un manual de diagnostico de fallas y causas posibles, y se documentaran las técnicas de medición y validación del banco de pruebas.

ABSTRAC

The present job will address the settings, and design of a benchmark, for the optical headends designed by Arris, at Tijuana building facilities.

Through the work the best field of test will be chosen, in order to simulate a Cable TV (CATV) network using Hybrid Fiber Coax, (HFC) networks. The measurements procedures will be defined, the benchmark characteristics will be defined based within the CATV/HFC standards required. A test manual, operation manual and fail diagnosis manual will be written, and the measurements and validation techniques will be documented.

INDICE

	Pagina
Lista de Figuras.	6
Lista de tablas.	
Lista de símbolos y acrónimos.	
Introducción.	4
Capítulo I.- Arquitectura básica de Sistema de Cable	
-Transmisión en sistemas HFC	10
-Transmisores ópticos.	13
-Receptores ópticos.	15
-Amplificadores ópticos (EDFAs).	18
Capítulo II.- Desempeño de un sistema HFC	
-Estándares de calidad y requerimientos	20
-Asignación de frecuencias.	22
-Relación señal a ruido (C/N).	24
-CTB y CSO.	26
Capítulo III.- Introducción a la fibra óptica y los láseres.	
-Reflexión total interna.	28
-Guías de vidrio para luz e imagen.	28
-La fibra óptica en comunicaciones.	32
-Estructura de las fibras.	33

-La fibra óptica en telecomunicaciones.	35
Capítulo IV.- Implementación del banco de pruebas.	
-Diagrama a bloques del Banco de Pruebas	36
-Dispositivos/ Desarrollo	37
-Características de los dispositivos	41
-Implementación y desarrollo	44
-Justificación del proyecto	46

Lista de figuras

Figura 1. Headend.....	11
Figura 2. Espectro del Sistema HFC.....	13
Figura 3. Transmision con sistema hibrido de fibra/ coaxial.....	14
Figura 4. Error de Bit en una relacion señal a ruido.....	16
Figura 5. Diagrama a bloques de un EDFA.....	17
Figura 6. variacion de la figura de ruido en un EDFA.....	19
Figura 7. Diagrama de energia de los iones de erbio en fibras de silicio.....	21
Figura 8. Coeficiente de ganancia del erbio para las bandas C y L.....	21
Figura 9. Diversas medidas del desempeño para una emision tipica de un canal de television..	23
Figura 10. Luz guiada a traves de un flujo de agua.....	31
Figura 11. Tipos de fibras opticas.....	33
Figura 12. Seccion transversal de una fibra optica de comunicaciones.....	35
Figura 13. Componentes de un sistema de fibra optica.....	37
Figura 14. Diagrama a bloques del banco de prueba.....	38
Figura 15. Señal portadora a 61.250 MHz.....	40
Figura 16. Imagen de la señal a la salida del sistema.....	41
Figura 17. Amplificador de RF.....	43
Figura 18. Transmisor optico.....	44
Figura 19. Amplificador optico.....	45
Figura 20. Nodo segmentable.....	46
Figura 21. Interfaz del programa de control.....	47

Lista de Acrónimos

CATV	Cable televisión
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
HFC	Hybrid fiber to Coaxial
C/N, CNR	Carrier to Noise Ratio
CTB	Composite Triple Beat
CSO	Composite Second Order
MHz	Megahertz
GHZ	Gigahertz
NTSC	National Television System Committee
Nm	Nanometros
RF	Radio frecuencia
Gb/s	Giga bits per second
dB	Decibeles
FDM	Frequency Division Modulation
S/N	Relación Señal a Ruido
dBm	Decibel con respecto a un mili watt
WDM	Wavelength División Multiplexing
OMI	Óptica Modulation Índice
Pi	Potencia óptica de entrada de un amplificador EDFA
NF	Noise Figure
FCC	Federal Communications Commission
XMOD	External Modulation

AC

Alternating Current



Símbolo de conversión a valores escalares

INTRODUCCION

La transmisión de señales de Televisión por Cable (CATV) por medio de una combinación de Fibra Óptica y cable coaxial de cobre (llamado *Hybrid Fiber Coax* o HFC por sus siglas en inglés) es algo común en nuestros días, y estos sistemas han permeado, al grado que se cuenta con una demanda estable de dispositivos que permiten proveer a los clientes con servicios de televisión que son transmitidos en esquemas de modulación de subportadora, a través de redes de comunicaciones ópticas. Las empresas involucradas en la fabricación de este tipo de dispositivos se encuentran en constante competencia, y requieren mecanismos que permitan asegurar que los equipos que fabrican, cuenten con características que aseguren a los clientes que el equipo cumple con especificaciones que se adecuan a sus redes de comunicaciones.

A través de este proyecto se implementará una red de prueba para la parte óptica de enlaces de comunicaciones para redes de CATV, y se analizarán algunos parámetros que deben contar con características particulares para ser empleados en este tipo de sistemas de comunicación (relación de portadora ruido-*Carrier to Noise Ratio*, o CNR por sus siglas en inglés-Interferencia por distorsión compuesta de segundo orden-*Composiste Second Order* o CSO por sus siglas en inglés-Atenuamiento compuesto de tercer orden-*Composite Triple Beat* o CTB por sus siglas en inglés).[Rhode & Schwarz, 2006].

Mediante la red implementada en el proyecto se podrán validar cambios de diseño en los dispositivos que se utilizan en la transmisión de este tipo de sistemas (Amplificadores de fibra óptica y de RF), para asegurar la compatibilidad con las redes de los clientes.

Dado que la empresa no cuenta actualmente con las herramientas de evaluación que simulen condiciones normales de operación en los componentes, este proyecto proveerá de condiciones de operación aproximadas de los escenarios comunes, con lo que se podrán hacer los cambios de diseño cuando resulten pertinentes.

Con la presente tesis se pretende construir una herramienta para validar cambios de diseño del producto que se fabrica en la empresa.[Arris, 2008 a; Arris, 2008 b; Arris, 2008 c].

Se construirá un sistema de transmisión de CATV por medio de dispositivos ópticos y amplificadores de RF. Se evaluará y caracterizará el sistema con una serie de variantes en las distancias a transmitir y la capacidad de los dispositivos a emplear.

Cuando el sistema esté en modo operacional (funcionando) se podrán validar los cambios que se tengan que hacer en los productos, con la confianza que proveerá saber que el dispositivo modificado está funcionando conforme al escenario posible de uso y dado el caso, tomar

decisiones pertinentes y acertadas para modificar parámetros del dispositivo, para que cumpla con las especificaciones del campo.

JUSTIFICACION

Las empresas involucradas en el desarrollo de sistemas de comunicaciones empleados en televisión coaxial, han tenido que evolucionar con las demandas tecnológicas de su rubro.

En donde tradicionalmente la transmisión de señales se realizaba en el dominio de la frecuencia, la necesidad de mayores anchos de banda y flexibilidad en el proceso de transmisión de señales, requiere el uso de la tecnología óptica para maximizar la capacidad de la transmisión de canales. [Hideyuki Asada, Nabil Abd Rabou, Hiroaki Ikeda, y Yoshifumi Shimodaira, 1998].

Por estas razones empresas como Arris (antes C-Cor) se han dedicado al diseño y construcción de sistemas que permitan la distribución de señales de televisión por cable mediante el uso de tecnología óptica.

Si bien la mayor parte del diseño se realiza en otras instalaciones, en las plantas de producción, el problema se presenta en el momento en que los componentes, o los diseños no presentan las características requeridas del producto.

En estas condiciones, es necesario realizar modificaciones en línea de producción, de los diseños propuestos, y en consecuencia, se requiere poder diagnosticar los equipos en condiciones similares a las que se someterá el producto por parte del usuario final.

Por estas razones, la instalación de una mesa de pruebas que emule las condiciones efectivas de operación del equipo, pues la capacidad de diagnostico previo a los problemas que puedan presentar los equipos aumentara la competitividad de la empresa.

Capítulo I.-

I.1 Arquitectura básica de Sistema de Cable

La arquitectura tradicional para un sistema de cable es un árbol de redes que distribuye la señal desde un centro de control llamado *headend*. El *headend* recibe la señal de un satélite, estaciones locales de televisión y centros de acceso comunitarios. Los *headend* son operados por la misma compañía de cable y en comunidades cercanas pueden transmitir señales de uno a otro. Si la compañía de cable tiene franquicias en muchos suburbios adyacentes, pueden poner su satélite direccionado en una locación y transmitir la señal sobre fibra de ese punto a otros *headends*.

El *headend* multiplexa todas las señales de video entrantes para generar una señal análoga que cubra un rango de frecuencias desde algunas decenas de megahertz a muchos miles de megahertz. Esta señal modula a un transmisor laser análogo, líneas truncales de fibra mono-modo distribuyen la señal a nodos de distribución en la comunidad. Esto efectivamente divide el sistema de cable en sistemas más pequeños, cada uno sirviendo a un área pequeña desde su propio nodo de distribución como se muestra en la fig. 1. Algunos sistemas usan un centro (*hub*) intermedio entre el *headend* y el nodo de distribución, (no representado en la figura) con cada *hub* transmitiendo la señal sobre fibra a cada nodo de distribución. Este concepto es más común en comunidades grandes.

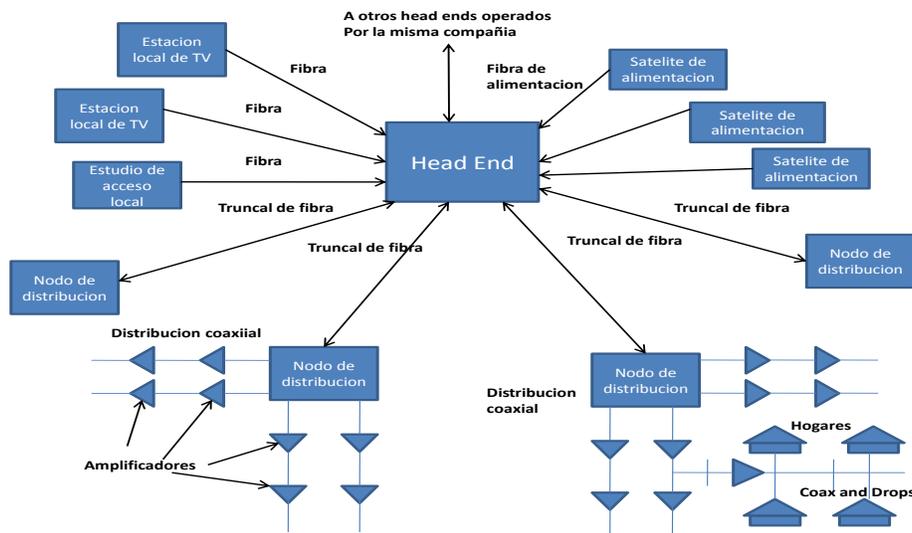


Figura 1 Headend

Los primeros sistemas de televisión por cable fueron construidos en su totalidad a partir de cable coaxial, pero la gran atenuación del coaxial requería amplificadores o repetidores cada 600m. (2000ft). Grandes cadenas de amplificadores podrían introducir ruido o distorsiones. Además creaban problemas de fiabilidad porque una simple falla en un amplificador inutilizaba a todos aquellos cuya señal tenía que pasar por ese amplificador.

Las compañías de televisión por cable probaron rápidamente trúncales de fibra óptica que pudieran eliminar la necesidad de amplificadores entre el *headend* y el centro (*hub*) de distribución o el nodo de distribución. Sin embargo, los primeros transmisores laser no tenían las grandes características de linealidad de salida que se necesitaban para la transmisión análoga, por eso las compañías de cable se tardaron en adoptar la fibra. La fibra empezó a hacerse más común en los sistemas de cable después del desarrollo de transmisores laser con distribución retroalimentada de alta linealidad, los cuales son ahora comunes para la transmisión entre el *headend* y los nodos de distribución. [Hecht, *Understanding Fiber Optics*, page 678].

Cada nodo convierte la señal óptica en forma eléctrica, y la distribuye a través de redes de cable coaxial a los hogares. Típicamente cada nodo da servicio de 500 a 2000 hogares o negocios. Un cable coaxial denso transporta la señal la mayor parte del camino a los suscriptores. Cables más ligeros y flexibles sirven como entregas a hogares individuales. Los cables de distribución podrían requerir unos cuantos amplificadores, pero no cantidades tan grandes que causen problemas de fiabilidad y ruido en los sistemas más viejos.

I.2 Transmisión en sistemas HFC

Los sistemas HFC (*Hibryd to fiber coaxial*) permiten a los suscriptores mandar señales así como recibirlas. Ellos dividen el espectro disponible en cuatro segmentos, como se muestra en la figura 2. Estos no son estándares rígidos en la industria, así que los sistemas pueden ser diferentes.

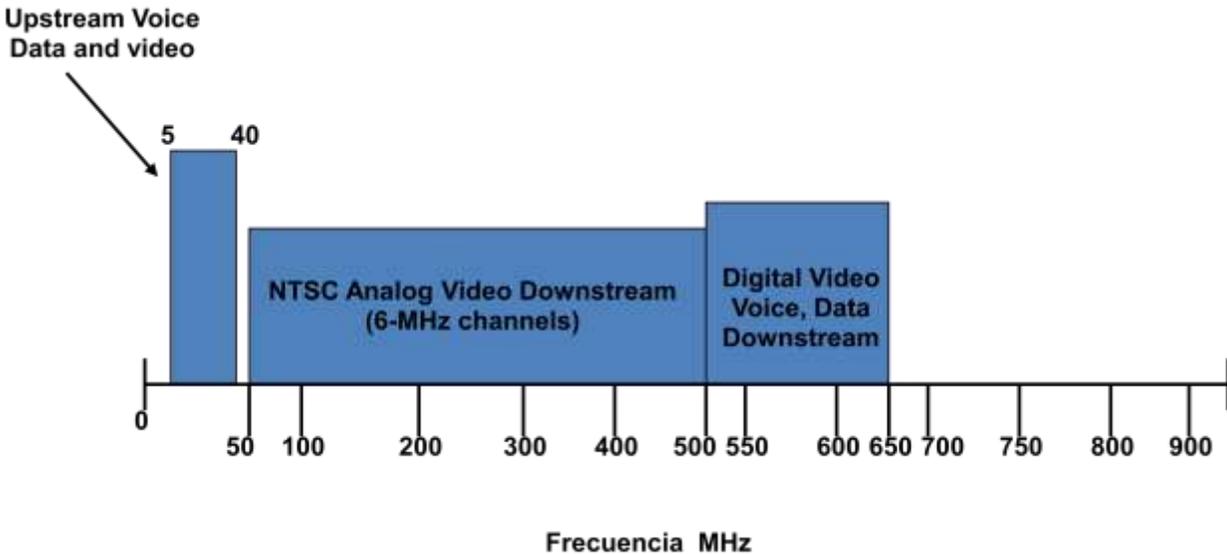


Figura 2. Espectro del Sistema HFC

Frecuencias de 5 a 40 MHz son asignadas para “subir” señales de los suscriptores, incluyendo datos, video, y tráfico de teléfono. Estas frecuencias son menores que las frecuencias usadas para “descargar” transmisión de video en cable. NTSC video estándar es transmitido de 50 a 550MHz, un rango que incluye la frecuencia de emisión de muchos canales análogos. Los sistemas de cable transmiten a menudo muchos canales análogos en la misma frecuencia en la que ellos emiten, si las frecuencias están disponibles en cable. Frecuencias de 550 a 750 MHz son asignadas para descargar datos digitales, incluyendo tanto teléfono como datos, así como cualquier canal de video que pueda ser transmitido en forma digital. En este punto, estas frecuencias son usadas mayormente para módems de cable y servicios de telefonía basada en cable. El espacio por encima de los 750 MHz es reservado para futuros servicios de dos vías, así como para otros no definidos aun. Potencialmente, el ancho de banda del sistema debería extenderse más allá de 1 GHz

Notar que la porción de “cargar” y ‘descargar” del modem de cable y servicios de telefonía son transmitidos en frecuencias ampliamente separadas. Más ancho de banda está disponible para la transmisión de modem de cable a los hogares en altas frecuencias que en bajas frecuencias, lo cual es debido a que los modem de cable normalmente descargan más rápido de lo que cargan.

Las señales de “carga” y “descarga” son transmitidas simultáneamente en diferentes direcciones en la parte coaxial de la red. Las señales son separadas en la porción de fibra de la red, ya sea para transmitir las por diferentes fibras o para transmitir las por diferentes longitudes de onda a través de la misma fibra.

Los sistemas pueden transmitir señales entre el *headend* y los nodos a 1310 y/o 1550 nm. Dos canales ópticos con multiplexión por división de longitud de onda son los más usados en los sistemas HFC actuales.

Las señales ópticas de los suscriptores son recogidas en el nodo y transmitidas vía *upstream* en la fibra hacia el *headend*. Cada nodo recibe diferentes señales de los suscriptores, así que este entrega diferentes señales al *headend*.

Las señales ópticas del *headend* son interpretadas en cada nodo. Las señales pueden ser distribuidas tanto por radiodifusión (*broadcasting, transmisión abierta*) con un transmisor de alta potencia, o emisión limitada (*narrowcasting, transmisión restringida*) con un transmisor de baja potencia. Los dos enfoques pueden ser combinados, como se muestra en la figura 3. [Hecht, *Understanding fiber optics*, pag.678-680]

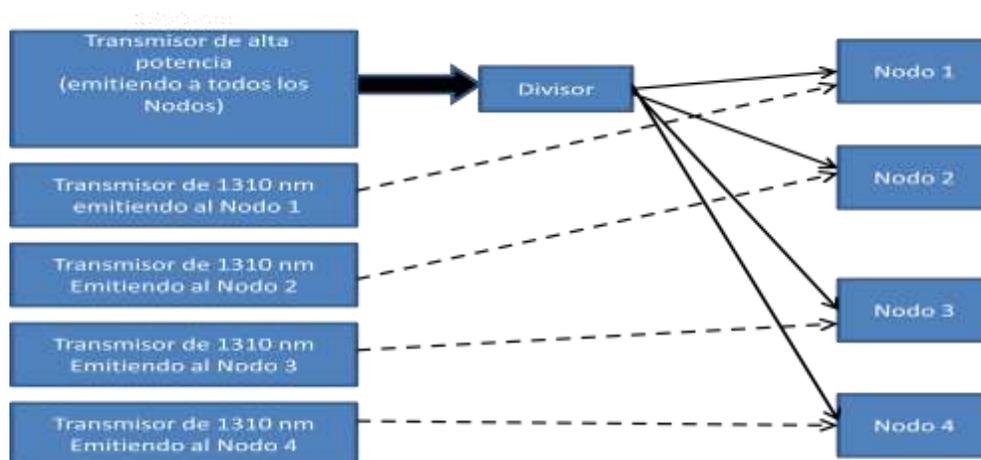


Figura 3 Transmisión con sistema híbrido de fibra/ coaxial

I.3 Transmisores Ópticos Lineales

Los transmisores generan portadoras ópticas, y modulan la intensidad de estas portadoras con un espectro de RF de banda ancha. En adición a la linealidad y requerimientos de ruido, los cuales son similares a aquellos que presentan los amplificadores de RF, los transmisores ópticos deben tener características que sean compatibles con las interconexiones con la fibra.

En general, los transmisores ópticos usan una señal eléctrica para modular la potencia de una fuente de luz. Una aplicación antigua y todavía común, es una simple modulación *on-off* que es usada para convertir señales binarias de alta velocidad en pulsos de luz. En el receptor, el detector solo necesita detectar la presencia o ausencia de luz para reproducir exactamente el flujo digital original. La modulación digital es conceptualmente un formato simple y robusto, y relativamente altos niveles de ruido pueden ser tolerados. En el estado actual de la tecnología, velocidades por encima de los 10 *giga bits per second* (Gb/s) son comercializadas, mientras que pérdidas ópticas de 30 dB puedan ser toleradas entre los transmisores y receptores.

La figura 4 muestra teóricamente el rango de error de bit como una función del rango señal a ruido para una banda base en un sistema de transmisión binario. Rangos muy moderados de relación señal a ruido S/N (comparados con los que son requeridos para señales moduladas análogas NTSC (*National Television System Committee*) permiten muy buenos rangos de errores de bit.

Por el contrario, la transmisión de una señal análoga en FDM (modulación por división de frecuencias), es mucho más compleja. En la aplicación común de televisión por cable, la forma de onda de salida del *headend* (con componentes espectrales extendiéndose de 50 a 750 MHz o más) es usada para controlar la intensidad de la luz en forma proporcional. La modulación debe ser totalmente lineal o, mejor dicho, debe complementar exactamente las características de demodulación debido a que el enlace es altamente lineal. No solo eso, pero C/N de extremo a extremo de cada señal de RF multiplexada debe ser compatible con los requerimientos de calidad de la señal. Típicamente, el enlace de luz-fibra requiere entregar un C/N (*Carrier to Ratio Noise*) de 50 dB o mayor para cada portadora de video análoga. Debido a que la dispersión estimulada de Brillouin y otros efectos no lineales de la fibra limitan la potencia máxima transmitida de +10 a +17 dBm, y los niveles de potencia del receptor de cerca de 0

dBm son requeridos para superar el “ruido de disparo” en el receptor, esto limita prácticamente los proyectos ópticos a enlaces de 80 canales de fibra óptica.

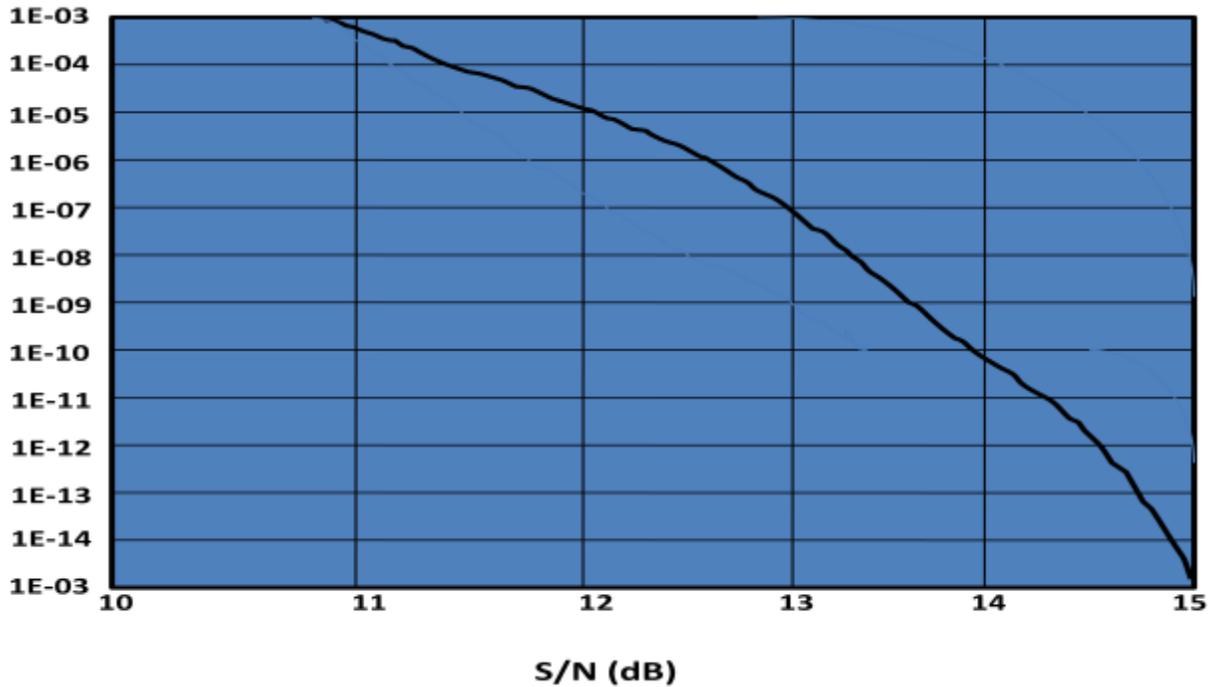


Figura 4 Error de Bit en una relación señal a ruido

I.4 Receptores Ópticos

A diferencia de los transmisores, los detectores ópticos están relativamente estandarizados. La luz entrante impacta en el área activa de un foto diodo el cual tiene una curva de transferencia de la ley cuadrada muy exacta (esto es, la corriente de salida es proporcional a la potencia óptica de entrada). La respuesta típica (la pendiente de la potencia óptica recibida contra la función de transferencia de la corriente de salida) es 0.8-1.0 mA/mW.

El comportamiento del ruido en un receptor óptico es limitado por la corriente de ruido del diodo (ruido de disparo debido a la variación estadística en la distribución de fotones

incidiendo) y por el ruido del amplificador de cable coaxial que está delante de él. Debido a que la impedancia inherente del diodo detector no es de 75 ohm, un transformador acoplador de impedancia o un circuito activo es necesario para acoplar al diodo en las etapas de ganancia. Algunas veces un amplificador de transimpedancia es usado. Debido a que estos amplificadores tienen una excelente figura de ruido, tienen un rango dinámico limitado, con el resultado de que el nivel de luz que llega al receptor debe ser típicamente controlado dentro de pocos o 0 dBm para un mejor equilibrio entre ruido y distorsión para enlaces modulados en AM. Esto es común para fabricantes de dispositivos análogos de fibra óptica de banda ancha para un desempeño en enlaces específicos de 0 o menos dBm de potencia recibida.

I.5 Amplificadores Ópticos

Los amplificadores ópticos impulsan el nivel luz de amplitud modulada sin necesitar la conversión óptica-eléctrica, amplificación de RF, ni la re modulación que de lo contrario se tendría que hacer en un punto de la red.

El modelo más común de un amplificador es el amplificador de fibra dopada de erbio (EDFA). En un EDFA, las señales que llegan son combinadas, en un acoplador WDM (Wavelength División Multiplexing), con una señal sin modular de alta potencia a 980 nm de una o más “bombas” fuente. Las dos señales son luego enviadas a través de una longitud especial de fibra la cual es dopada con erbio (esto es, una cantidad controlada cuidadosamente de erbio es agregada). La señal “bombeada” causa que los electrones en los átomos de erbio salten a otra banda con una energía mayor. Cuando ellos regresan a su estado normal, el diferencial de energía impulsa la señal a 1550 nm. La figura 5 muestra un diagrama a bloques básico de un EDFA de doble bomba.

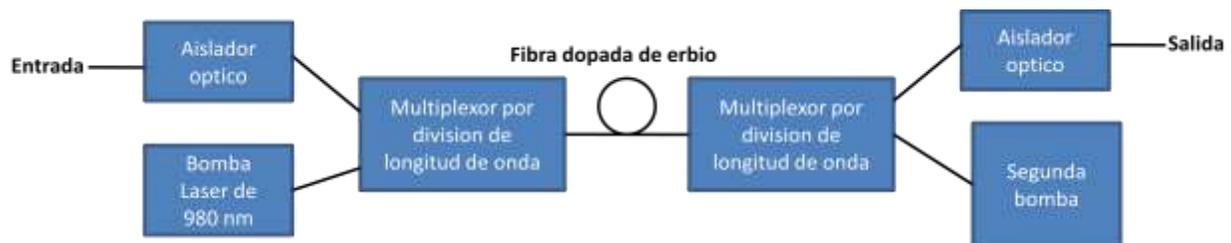


Figura 5 Diagrama a bloques de un EDFA

La magia de los EDFAs es que tienen características completamente diferentes a los amplificadores de cable coaxial con respecto a ruido y distorsión. Aun así operan en un modo saturado (donde un amplificador de cable coaxial normal produciría pulsos con armónicas muy grandes y contenido IM), los EDFAs no añaden una distorsión significativa a la señal modulada. No solo eso, estos pueden ser saturados, si se desea, para que sus niveles de ruido de entrada sean más pequeños comparados con la señal que va a ser amplificada. La contribución C/N de un EDFA está dada por:

$$C/N_{edfa} = 86.2 + P_i + 20 \log(M_i) - NF_{edfa}$$

Donde:

C/N_{edfa} = La portadora a ruido por canal (medida en un ancho de banda de 4 MHz) en dB

P_i = La potencia óptica de entrada del EDFA en dBm

M_i = El índice de modulación óptica (OMI) por portadora

NF_{edfa} = La figura de ruido del amplificador

La figura de ruido de un EDFA estándar depende de algún modo de la potencia de entrada. La figura 6 muestra las variaciones típicas en NF basadas en las especificaciones de varios fabricantes.

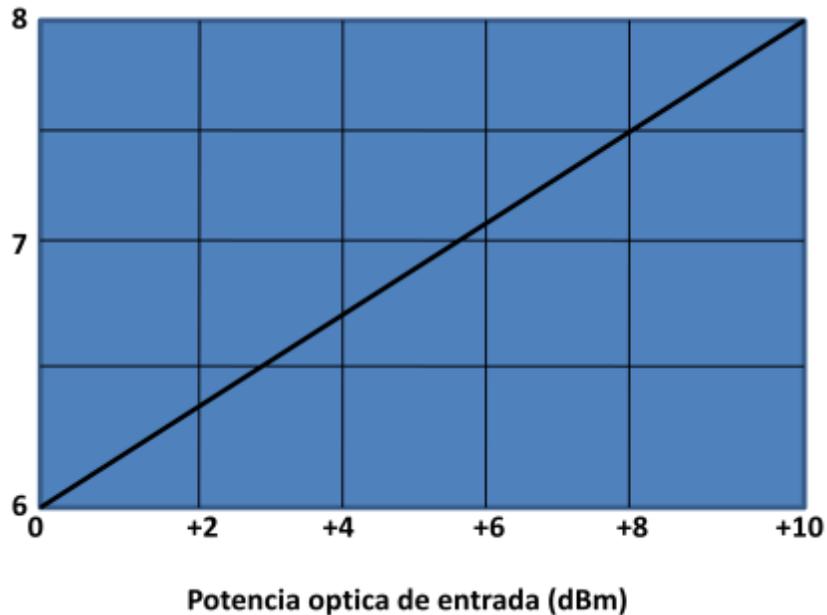


Figura 6 Variación de la figura de ruido en un EDFA

Amplificadores comerciales están disponibles con niveles de potencia de salida saturada por encima de 100 mW. Las unidades con más potencia utilizan dos o más bombas fuente, inyectando luz en los extremos de la fibra dopada (de hecho, son posibles cuatro bombas, dos en cada extremo, si tienen polarización cruzada). Incrementando el poder de las bombas se incrementa el poder de salida disponible debido a que más energía es almacenada en electrones excitados que pueden ser aprovechados para producir emisiones ópticas. Una tecnología modificada usa un dopaje de erbio e iterbio y una bomba de 800 nm de longitud de onda, y alcanza aun potencias más altas, potencialmente en cientos de miliwatts.

Desafortunadamente, la eficiencia y el desempeño de un amplificador óptico es un accidente de las propiedades de elementos específicos del átomo. Aun siendo, los amplificadores de 1550 nm una tecnología madura, tiene dificultades conocidas para producir unidades comerciales en 1310 nm. *[Modern cable televisión technology, W. Ciciora, pag.489-500]*

I.6 EDFAS

Los EDFAs se basan en la utilización de iones de tierras raras como medio de ganancia. Estos iones se introducen en el interior del núcleo de las fibras durante el proceso de fabricación y posteriormente se bombean ópticamente para producir la ganancia. Si bien los amplificadores ópticos basados en fibras dopadas se han venido estudiando desde el año 1964, su utilización práctica data del año 1988, después de que las técnicas de fabricación y caracterización de fibras ópticas dopadas de baja pérdidas fueron perfeccionadas.

Las características del amplificador tales como la longitud de onda de trabajo y el ancho de banda vienen determinadas por los dopantes en lugar de por la fibra de silicio, la cual cumple únicamente la función de transporte de las señales ópticas. Entre los diferentes dopantes que pueden utilizarse se encuentran el erbio (Er), el holmio (Ho), el neodimio (Nd), el samario (Sm), el tulio (Tm), el iterbio (Yb) o el praseodimio (Pr), obteniéndose amplificadores de diferentes longitudes de onda que cubren desde el visible a la región de infrarrojos (hasta $2,8\mu\text{m}$). Sin embargo, los EDFAs han atraído la mayor atención debido a que operan cerca de los 1550 nm, la región de longitudes de onda donde la fibra óptica posee su mínimo de atenuación.

Las características de ganancia de los EDFAs dependen del esquema de bombeo utilizado, así como de los dopantes (germanio o aluminio) que se utilizan para generar el núcleo de la fibra junto con el erbio. La naturaleza amorfa del silicio ensancha los niveles de energía de los iones de erbio (Er^{3+}) en diferentes bandas. La figura 7 muestra el diagrama de niveles de energía del Er^{3+} en cristales de silicio. En este caso, se pueden utilizar múltiples transiciones para bombear el EDFA. Las más eficientes son aquellas que utilizan láseres de semiconductor a 980 y 1480 nm. De hecho, el desarrollo de tales láseres se ha visto potenciado por la necesidad de láseres de bombeo adecuados para los EDFAs. Potencias de bombeo de unos pocos mili volts son suficientes para obtener ganancias de amplificador de unos 30-40 dB.

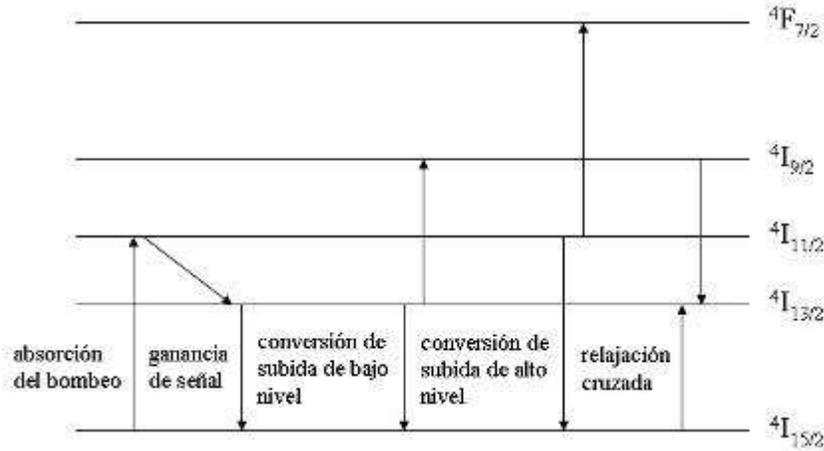


Figura 7 Diagrama de energía de los iones de erbio en fibras de silicio

Originalmente los EDFAs han cubierto la banda C (Conventional Band) de 1530 a 1565 nm como consecuencia de la respuesta en frecuencia de su ganancia. Esta respuesta se muestra en la figura 8 y, como puede apreciarse, la ganancia decae bruscamente fuera de la llamada banda C. Sin embargo, la creciente demanda de mayor capacidad en las redes ópticas ha provocado que se busquen nuevas bandas de transmisión, como por ejemplo la banda L (Long-Wavelength Band) de 1570 a 1602 nm. Los amplificadores de banda L utilizan la misma tecnología existente en banda C, por lo que resulta en forma simple y fiable de resolver las limitaciones de ancho de banda.

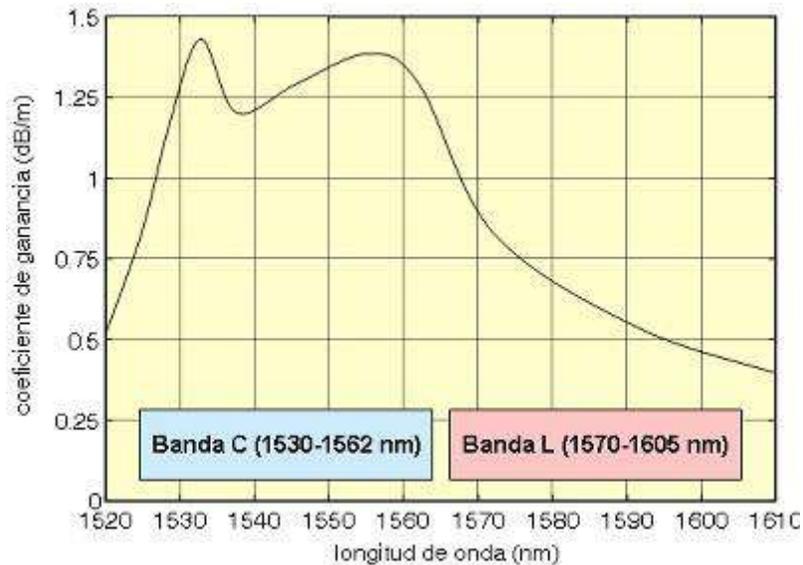


Figura 8 Coeficiente de ganancia del erbio para las bandas C y L

Ahora bien, dado el diferente entorno de operación, los amplificadores de banda L presentan diferentes prestaciones y componentes que los amplificadores de banda C. La ganancia del amplificador se calcula como el producto del coeficiente de ganancia por la longitud de la bobina de fibra dopada. Como la banda L se encuentra en la cola de la respuesta de ganancia del erbio (fig. 8), el coeficiente de ganancia es unas 3 o 4 veces inferior al correspondiente valor en banda C. Luego para compensarlo es necesario emplear longitudes de fibra significativamente mayores, suponiendo que se usa fibra estándar. [*Amplificadores ópticos dopados con erbio, Prof. Dr. Francisco Ramos, Artículo publicado en la revista CONECTRONICA no. 46*]

Capítulo II.-

Introducción

Desempeño de un sistema HFC

Todos los componentes de un sistema de distribución de banda ancha, el troncal, distribución en cable coaxial, y la entrega, deben trabajar en armonía para proveer una ruta de transmisión cuyo desempeño permita entregar señales con una calidad aceptable al usuario final. Esto significa que los requerimientos de desempeño del sistema en general deben ser definidos y la degradación permisible de las señales debe ser asignada sobre la adquisición de la señal, procesamiento de cabecera (*headend*), sistema de distribución y el equipo terminal.

II.1 Estándares de calidad y Requerimientos

Para poder entender como los estándares de desempeño están relacionados, es importante primero determinar toda la cadena desde la generación de la señal hasta el usuario final. Los componentes de esta cadena varían dependiendo de los servicios. Algunas señales pueden ser regeneradas en el *headend* o incluso cerca del suscriptor, mientras que otras pueden ser regeneradas a miles de millas de distancia. La figura 9 diagrama con un ejemplo de los elementos de transmisión a través de los cuales una señal de video analógica puede ser enviada.

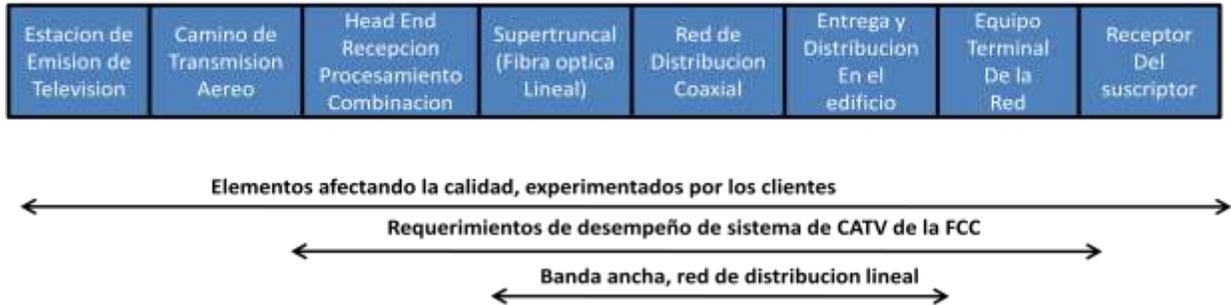


Figura 9 Diversas medidas del desempeño para una emisión típica de un canal de televisión

La fuente de video en este ejemplo es una estación emisora de televisión. La degradación de la fuente incluirá algunos niveles de ruido blanco, diafonía, distorsión de transmisión y posiblemente ruido de cuantización si el video o el audio fueron digitalizados en algún punto del proceso. A menudo la relación S/N del video (en NTSC análogo) es limitada por la cámara de origen y degradada aun mas por una grabación en videotape y procesos de repetición que resulta en unos 55-60 dB de entrada al transmisor. El filtro de diplexado de emisión del transmisor (usado para combinar señales aurales y visuales) y la antena afectaran la respuesta en frecuencia, mientras que la modulación en fase de la portadora visual incidental del transmisor (ICPM) limita el desempeño del sonido estéreo alcanzable.

La trayectoria de la señal de la fuente al *headend*, si el *headend* está recibiendo la señal a través de la vía normal de la ruta, podría incluir distorsiones multi-ruta, (ecos resultantes de señales abandonando objetos por crear más de una ruta de transmisión), las variaciones de la respuesta en frecuencia debido a las características de la antena receptora, interferencia de ruido eléctrico, y una variedad de otros factores.

Dentro del complejo del *headend*, la señal puede ser desmodulada, digitalizada, intercambiada, amplificada, combinada con otras señales, modulada o desplazada en frecuencia. En algunos casos, las señales pueden ser recibidas en una locación diferente a donde fueron finalmente combinadas dentro del espectro de RF que es transmitido a los clientes, sumándole capas adicionales de procesamiento y transmisión. En este caso, el termino *headend* es destinado para que incluya todo, desde la primera recepción por el operador de la red, hasta la

generación de la señal modulada en FDM para la transmisión a los clientes. Cada paso del procesamiento dentro del complejo del *headend* suma una medida de degradación.

Finalmente, el espectro de frecuencias completo, entra a la banda ancha, red de distribución lineal, donde, aparte de otras distorsiones, el ruido, la distorsión de intermodulación, la modulación cruzada, demora de grupo y la distorsión por *hum* son agregados.

II.2 Asignación de Frecuencias a través de las diferentes secciones del sistema de cable.

Existen algunos parámetros determinados exclusivamente (o primordialmente) en un elemento de la cadena de transmisión, mientras que otros (como la relación portadora-ruido) son acumulativos conforme la señal viaja a través de las secciones. Específicamente:

- La frecuencia de la portadora visual es determinada inicialmente en el punto de la modulación en RF pero puede ser modificada por una conversión de frecuencias subsecuente. En la mayoría de las terminales set top, la señal de video es desmodulada y re modulada para que la frecuencia de la señal que se entrega al equipo o dispositivo del suscriptor no esté relacionada con la frecuencia de la red. En este caso, la frecuencia estándar de la FCC aplica tanto como para salida del *headend* y la salida de cada terminal.
- La deferencia entre la frecuencia de las portadoras aural y visual es también determinada en el punto de modulación y no es afectada por la conversión de

frecuencias posterior que modifica el espectro total del canal (o el espectro total de RF, por ejemplo, en un transmisor AML). De manera parecida, la desviación de la portadora aural (y por tanto el “volumen” del sonido detectado) es determinado en el punto final de modulación, ya sea el transmisor sobre el aire, *headend*, o la terminal set top. Aquí, de nuevo, las reglas de la FCC aplican en el punto final de modulación.

- Los niveles de la señal entregados al hogar del suscriptor son principalmente una función del sistema de distribución de banda ancha pero son afectados también por cambios en el *headend*. Donde set top terminales son usadas, sin embargo, los niveles de la señal que llegan a receptor de los suscriptores puede que no tenga relación con los niveles de operación del sistema. Las reglas de la FCC sobre los niveles que se entregan a los suscriptores aplican para antes y después de cualquier equipo terminal del operador-suministrador.
- La variación de la respuesta en frecuencia dentro del canal, la diferencia de niveles de la portadora aural/visual, ganancia diferencial y la fase diferencial en un sistema de cable operando apropiadamente son determinadas principalmente en el *headend* y solo levemente modificadas como el resultado de variaciones en la respuesta de la red de banda ancha. Como con niveles visuales, los set top terminales modifican significativamente todos estos parámetros.
- Las distorsiones de intermodulación (CTB, CSO, XMOD, y CIN) ocurren principalmente en la red de distribución de banda ancha pero pueden ser degradadas más aun por lo set top terminales.
- La modulación *Hum* puede ocurrir en cualquier punto de la red, en un sistema mantenido apropiadamente, esta ocurrirá principalmente por los efectos laterales de AC transportada en el mismo cable coaxial que transporta señales de RF.

El ruido será agregado en todas las etapas del proceso, aunque no en cantidades iguales.

En resumen, los impedimentos principales que ocurren en múltiples secciones de un sistema de cable son distorsión (que ocurre tanto en la red de distribución de banda ancha y en los equipos terminales) y ruido (con la contribución del *headend*, la red de distribución de banda ancha y el equipo terminal).

II.3 Asignación del ruido y distorsión en el sistema de cable. Relación portadora a ruido (carrier to noise C/N)

La relación C/N es una medida de la captación de la señal de la entrada del receptor del suscriptor es:

$$C/N_{ttl} = -10\log\left[10^{\frac{-\left(\frac{C}{N_h}\right)}{10}} + 10^{\frac{-\left(\frac{C}{N_s}\right)}{10}} + 10^{\frac{-\left(\frac{C}{N_d}\right)}{10}} + 10^{\frac{-\left(\frac{C}{N_t}\right)}{10}}\right] \quad (1)$$

Donde:

C/N_{ttl} = La relación C/N considerando solo las contribuciones de ruido de la entrada del headend a la entrada del receptor del suscriptor.

C/N_h = La relación C/N del headend.

C/N_s = La relación C/N del supertruncal (generalmente enlaces de fibra óptica o microondas).

C/N_d = La relación C/N de la distribución en cable coaxial.

C/N_t = La relación C/N del equipo terminal.

Esta fórmula refleja la conversión de cada nivel de ruido en cada sección relativa. Sumando los niveles de ruido normalizados, y reconvirtiendo los términos del logaritmo común (dB). El 10 inicial y los 10 usados para dividir cada término de los valores originales de C/N indican el hecho de que el ruido termal generado en cada sección no está correlacionado y por lo tanto añade una potencia mayor que el voltaje base. Una forma más fácil de enunciar esta relación es el declarar que el "factor de cascada" es "10log".

Un eminente ingeniero de sistemas de cable ha sugerido el uso de notación de taquigrafía para expresar estas ecuaciones. Usando esta notación la ecuación (1) se puede simplificar como:

$$C/N_{ttl} = C/N_h \odot C/N_s \odot C/N_d \odot C/N_t : 10 \log \quad (2)$$

Donde el símbolo \odot indica la conversión a valores escalares. Suma y reconversión a la forma dB y el término: indica el factor de cascada, el cual puede variar de 10 log (adición de la potencia no relacionada) a 20 log (adición del voltaje).

Los set top terminales comunes tienen especificaciones de figura de ruido que varían de 10 a 13 dB. Debido a que se requiere que los operadores de cable entreguen señales análogas de televisión con niveles de 0 dBmV (y típicamente entregan muchos canales muy cerca de esos niveles), podemos usar la siguiente ecuación para determinar que, con las terminales ruidosas y los niveles mínimos de la señal:

$$C/N_t = 0 \text{ dBmV} + 59.2 \text{ dB} - 13 \text{ dB} \cong 46 \text{ dB} \quad (3)$$

En el otro extremo de la cadena, moduladores individuales y procesadores de señales exhibirán generalmente 60-dB C/N o mejores. Este es degradado, sin embargo, por el ruido fuera de banda de otros moduladores cuando una cantidad grande de canales son combinados pasivamente. El aislamiento de los amplificadores agrega ruido adicional también, por lo tanto el C/N típico de los canales individuales medidos en la entrada de la red de distribución de banda ancha es del orden de 57 dB.

Asumiendo que la meta para cumplir las especificaciones de la FCC (*Federal Communications Commission*) requiere de un C/N_{ttl} de 43 dB, podemos encontrar la mínima C/N del supertruncal y de la distribución de cable coaxial juntas usando

$$C/N_s \ominus C/N_a = C/N_{ttl} \ominus C/N_h \ominus C/N_t : 10 \log = 43 \ominus 57 \ominus 46 = 46.4 \text{ dB} \quad (4)$$

Donde el símbolo \ominus indica que las cantidades escalares son restadas en lugar de ser sumadas.

Lo que nos muestra esta ecuación es que nuestra terminal en el peor de los casos, ha usado o consumido la mitad del ruido total que se estimaba en el sistema. Debido a esto, terminales más modernas tienen figuras de ruido más bajas, y los set top terminales siguen contribuyendo significativamente con el ruido total.

Las especificaciones de diseño típicas para los supertruncales mas la porción de la distribución por cable coaxial de la planta pide por C/N de 48-49 dB. El margen de cerca de 2 dB provee una tolerancia para tales errores de operación como pueden ser errores en los ajustes de los niveles de operación en el *headend*, el deterioro o envejecimiento de los componentes, y las respuestas a la frecuencia imperfectas a través de la cadena de los amplificadores.

La variación en la respuesta a la frecuencia es conocida como pico-a-valle (P/V) y es una medida de la variación pico a pico, en decibeles de la ideal. Debido a esto los enlaces de fibra óptica son típicamente "planos" (*flats*) dentro de unas decimas de decibel, la tolerancia usual para una red de distribución de cable coaxial es $N/10 + 2$, donde N es el número de amplificadores en cascada.

La tolerancia de ruido estimado entre el supertruncal y la distribución por cable coaxial depende tanto de la arquitectura como de la tecnología. Los enlaces típicos de fibra óptica de "descarga" (*downstream*) manejados por transmisores modulados directamente exhibirán valores de C/N de 51 a 54 dB. En una arquitectura simple de supertruncal/coaxial, un requerimiento de C/N de 49- dB puede ser alcanzado colocando fibra óptica y secciones de coaxial en cascada, entregando cada uno 52-dB de C/N. Arquitecturas más complejas pudieran

requerir enlaces supertruncados en cascada, demandando un mejor desempeño en cada una de las secciones.

II.4 CTB y CSO (*Composite Triple Beat, Composite Second Order*)

Debido a que los niveles en el *headend* pueden ser optimizados cuidadosamente, y amplificadores de primer nivel pueden ser utilizados, la distorsión por intermodulación dentro del *headend* es minimizada, y la mayor parte de la distorsión ocurre en el supertruncal, distribución por cable coaxial, y los set top terminales. Continuando con el ejemplo de una red simple HFC, los mecanismos de distorsión en láseres DFB de modulación directa, los amplificadores de RF balanceados, y las etapas de entrada de los set top terminales tienen algunas características en común (todos exhibiendo alguna forma de limitante) y otras que son diferentes (la linealidad de señales pequeñas, las variaciones y la naturaleza de las limitantes donde estas ocurran).

Una ecuación general para los componentes de la distorsión se puede escribir como

$$C/dist_{ttl} = C/dist_s \oplus C/dist_d \oplus C/dist_t : n \log \quad (5)$$

Donde:

dist puede indicar CTB o CSO

n = El factor de cascada y puede variar de 10 a 20

Cuando el mecanismo dominante de distorsión es similar en los elementos de la cascada, por ejemplo, la compresión simétrica en los amplificadores puestos en cascada, corriendo en los mismos niveles de salida, el factor de cascada estará cerca de 20, que fue el número tradicionalmente usado tanto para CTB como para CSO en redes de cable coaxial muy grandes.

La investigación en el desempeño de secciones puestas en cascada que no son iguales, sin embargo, ha mostrado que las distorsiones a menudo incorporan mínimo una gama de voltaje adicional. En ocasiones, de hecho, la distorsión crea al menos gamas de 10 log cuando las distorsiones están parcialmente canceladas.

La red de distribución de banda ancha está diseñada y (a menudo) probada usando portadoras sin modulación. Esto resulta en niveles de CTB y XMOD por el diseño del producto que son peores por cerca de 12 dB que el promedio de los valores de operación, donde el producto del CSO será peor por cerca de 6 dB que los valores de operación, aunque la diferencia podría ser no tan grande para cascadas muy cortas o donde la modulación en canales múltiples esta sincronizada.

Aunque no existen estándares en esta área, la práctica común en la industria diseña para C/CTB y C/CSO cerca de 53-dB en las redes de banda ancha (supertruncales mas distribución por cable coaxial) bajo condiciones de prueba (portadoras sin modular). Aun cuando se combinan niveles de distorsión típicos de los set top terminales (57-65-dB para C/CTB y 60-dB para C/CSO), la distorsión total bajo condiciones de operación está dentro de los requerimientos de la FCC, aun con las hipótesis más conservadoras del factor de cascada, como se muestra en la ecuación (6) y (7):

$$C/CTB_{ttl} = (53 \text{ } \ominus \text{ } 57: n \log) - 12 \text{ dB} = 60.8 \text{ dB para } n = 20 \quad (6)$$

$$C/CSO_{ttl} = (53 \text{ } \ominus \text{ } 60: n \log) - 12 \text{ dB} = 55.8 \text{ dB para } n = 20 \quad (7)$$

Las especificaciones típicas para transmisores ópticos DFB modulados directamente incluyen un C/CTB de 65 dB y C/CSO de 62 dB. Transmisores modulados externamente son por lo general mejores, tal vez con C/CTB de 70-dB y C/CSO de 65-dB, mientras que los enlaces de microondas de banda ancha pueden generar distorsiones peores en forma más ligera.

La distorsión restante “estimada” puede ser asignada a el sistema de distribución por cable coaxial o a los enlaces supertruncales adicionales, si es requerido por La arquitectura. Afortunadamente, aunque los enlaces de fibra óptica tienen CSO mas altos que CTB, los amplificadores de cable coaxial tienen un CTB más alto por lo tanto la cascada de las dos tecnologías se complementa de alguna manera con respecto a la distorsión.

Aunque pudiéramos hacer cálculos similares para XMOD, el resultado, el resultado nos llevaría a resultados similares al del CTB debido a que los dos son efectos de tercer orden. En la práctica, las pruebas al CTB han probado que produce resultados más consistentes y debido a esto es preferida más que la evaluación al XMOD. SE debe resaltar que la FCC ya no tiene especificaciones para el desempeño de XMOD. . [Modern cable televisión technology, W. Ciciora]

Capítulo III.-

Introducción a las Fibras Ópticas

Por si sola, la luz viajara en una línea recta. Aunque los lentes pueden desviar la luz, y los espejos reflejarla, la luz seguirá viajando en línea recta a través de dispositivos ópticos. Esto está bien para muchos propósitos, cámaras, binoculares, telescopios y microscopios no podrían formar una imagen en forma correcta si la luz no viajara en línea recta.

Sin embargo, hay ocasiones también en que la gente quiere ver a través de una esquina o probar en lugares que no están a la vista del ojo humano. O ellos tal vez necesiten un tubo de luz de un lugar a otro, para comunicarse, ver, iluminar o otros propósitos. Ahí es cuando necesitan fibras ópticas.

Este problema surgió mucho antes de que fuera reconocido. En 1881, en Concord, Massachusetts, el ingeniero William Wheeler patentó un dibujo de luz entubada a través de edificios. El planeaba usar un arco eléctrico brillante en el sótano para iluminar cuartos distantes. El imaginó un conjunto de tubos con revestimientos reflejantes y difusión óptica para transportar la luz a través de un edificio, luego difundirla en otras habitaciones.

Probablemente, los tubos de luz de Wheeler no habrían difundido tal cantidad de luz para hacer lo que él pensaba. Sin embargo, la idea de luz entubada reapareció una y otra vez hasta que finalmente guio hacia la fibra óptica.

III.1 Reflexión Total Interna

Los conceptos fundamentales de la fibra óptica, eran bien conocidos antes de la era de Wheeler. Un fenómeno llamado reflexión total interna, puede confinar luz dentro de un vidrio o otros materiales transparentes más densos que el aire. Si la luz en el vidrio golpea la superficie interna en un cierto ángulo, no podrá salir del material y en su defecto será reflejado hacia adentro. Glassblowers probablemente vio este efecto mucho antes, en varillas de vidrio

dobladas, pero esto no fue totalmente reconocido hasta 1841, cuando el físico suizo Daniel Colladon lo uso en sus lecturas de ciencia populares.

El truco de Colladon, mostrado en la figura 10, funciona así. El instaló una luz brillante a través de un tubo horizontal guiándola afuera de un tanque de agua. Cuando el activaba el agua, el liquido fluía hacia afuera, formando por la fuerza de gravedad una parábola. La luz era atrapada dentro del agua por la reflexión total interna, rebotando de arriba abajo en las superficies del chorro de agua, hasta que la turbulencia del agua rompía el rayo.

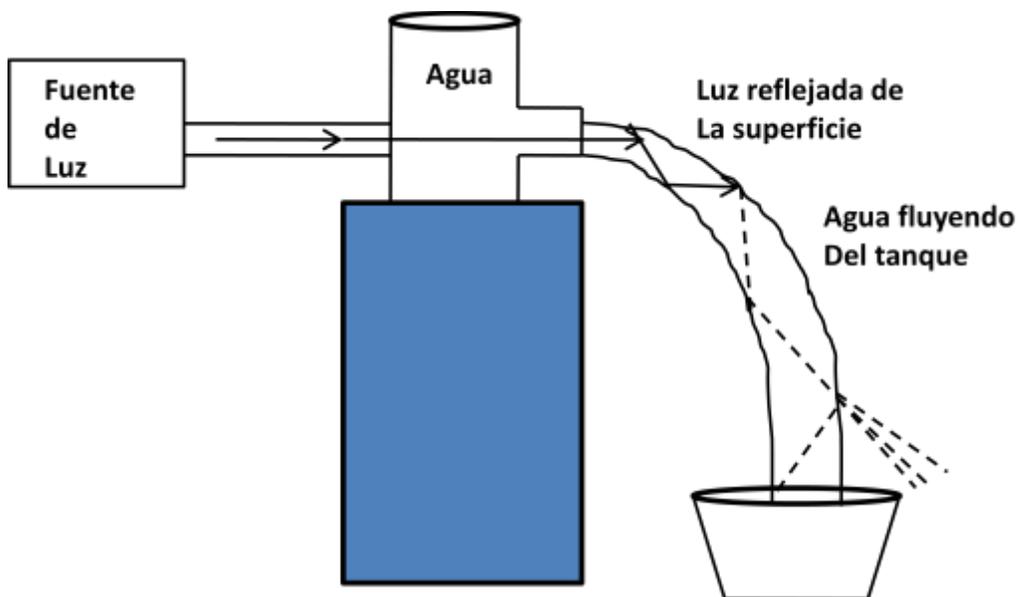


Figura 10 Luz guiada a través de un flujo de agua

III.2 Guías de Vidrio para la Luz e Imágenes

Las varillas de cristal claro pueden también guiar la luz. A principios de 1900, eran usadas para iluminar las diapositivas de los microscopios. Los inventores patentaron las normas para guiar

luz a través de varillas de vidrio dobladas para iluminar dentro de la boca con fines de odontología. Esto era mejor que introducir una lámpara de gas en la boca de los pacientes, pero estaba lejos de ser una solución perfecta, y nunca fue usada totalmente.

Una buena fibra de vidrio, es en realidad una varilla muy delgada, así que esta puede guiar luz en la misma manera. Una un conjunto de ellas, y pueden transmitir una imagen de un extremo a otro del conjunto. Clarence W. Hansell, un ingeniero eléctrico estadounidense e inventor prolífico, patentó el concepto a finales de 1920. Heinrich Lamm, un estudiante germano de medicina, construyó el primer conjunto transmisor de imágenes en 1930. Sin embargo, las imágenes eran débiles y confusas.

Lamm tuvo que “peinar” las fibras para alinearlas, pero no se percató de un problema importante. Cuando una cantidad grande de fibras son puestas en conjunto, las superficies de estas se tocan, así que la luz se puede escapar de una hacia la otra. Las fibras también se pueden raspar entre ellas, y la luz se escapa por estas raspaduras. Incluso la luz puede escaparse cuando huellas digitales se adhieren a la fibra.

La solución a este problema parecía muy obvia. Se empezó a buscar por una reflexión total interna en la frontera entre el aire y el cristal. Sin embargo, la reflexión total interna puede ocurrir en cualquier superficie donde la luz trate de ir de un material con un índice de refracción más grande a otro con este índice menor. El aire es conveniente, y tiene un índice de refracción de 1.000293 que es mucho menor al índice del cristal, el cual es de 1.5. Pero la reflexión total interna se da también en el material que está cubriendo el vidrio, el cual tiene un índice de refracción más pequeño que el cristal, como se muestra en la figura 11. Moller Hansen produjo reflexión total interna revistiendo las fibras de vidrio con margarina, pero el resultado estuvo lleno de problemas.

Brian O’Brien, un físico óptico muy reconocido, sugirió a Van Heel revestir las fibras en el año 1951. Van Heel utilizó cera de abejas y plástico, que fueron más prácticas que la margarina. En diciembre de 1956, Larry Curtis, un estudiante sin graduar de la universidad de Michigan, construyó la primera fibra de vidrio revestida fusionando un tubo de vidrio de índice bajo dentro de una varilla de vidrio con un índice mayor. El revestimiento de vidrio se volvió popular muy pronto, aunque algunas fibras continúan teniendo revestimiento de plástico. Y el plástico es usado para cubrir las fibras y así protegerlas mecánicamente.

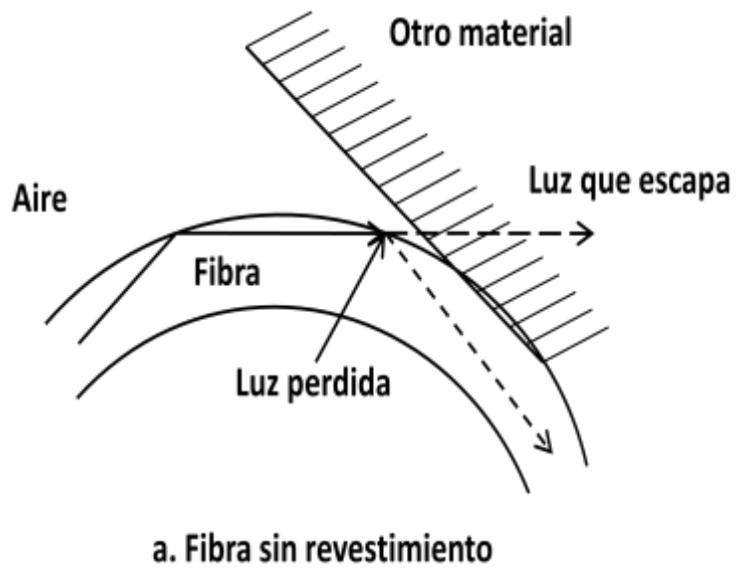
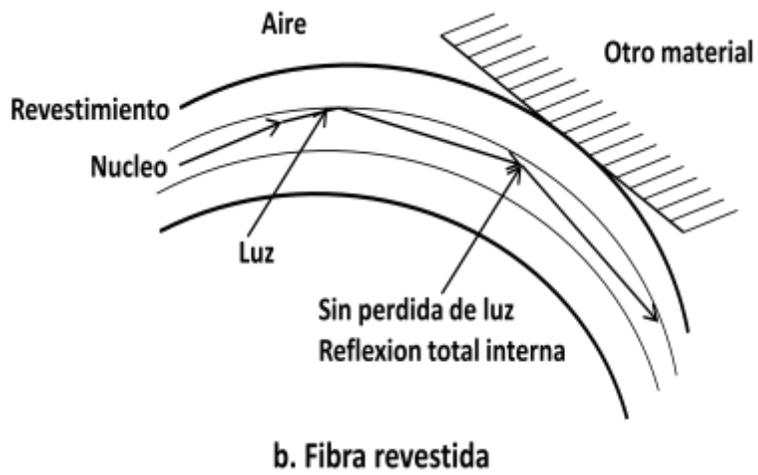


Figura 11 Tipos de fibras ópticas

III.3 La Fibra Óptica en Comunicaciones

La idea de comunicarse por medio de la luz probablemente se remonta a las señales de fuego en la era prehistórica. Los antiguos griegos retransmitían las noticias de la caída de Troya por medio de señales de fuego; los nativos americanos usaban señales de humo. Aun el primer “telégrafo” fue óptico, inventado por el ingeniero francés Claude Chape en 1790. Los operadores retransmitían señales de una torre de telégrafo en la cima de una colina a la siguiente moviendo brazos de semáforos. El telégrafo eléctrico de Samuel Morse puso al telégrafo óptico fuera de uso, pero dejó innumerables colinas de telégrafos.

Poca gente tomo en serio las comunicaciones ópticas hasta que Theodore Maiman mostro el primer laser en 1960.

Los láseres generan un haz de luz altamente enfocado de luz coherente en una longitud única de onda. Esta es el equivalente a una señal portadora de frecuencia pura usada por una estación de radio o televisión. Esto hizo ver al laser muy prometedor para las comunicaciones, y muchos laboratorios empezaron a experimentar con él. Primero trataron de mandar haces de laser a través del aire, pero como Bell, se dieron cuenta que el aire libre no era un buen medio de transmisión debido a que la neblina, lluvia, y nieve podrían bloquear las señales. Trataron de mandar luz a través de una versión más moderna de los tubos de wheeler y encontraron otros problemas.

Había fibras ópticas disponibles, pero no se veían muy prometedoras. Las fibras usadas en endoscopios son mucho más claras que las ventanas de cristal, pero la mitad de la luz que entra en ellas se pierde después de 3 metros. Convencidos que los sólidos transparentes inevitablemente absorbían demasiada luz para las comunicaciones ópticas, la mayoría de los ingenieros se rindió y trataron de desarrollar nuevas versiones de tubos de luz o mejores maneras de mandar la luz a través del aire.

Dos jóvenes ingenieros de *Standard Telecommunications Laboratories* en Inglaterra, Charles K. Kao y Goerge Hockham, tomaron enfoques diferentes. En lugar de preguntarse cuan claro era el mejor vidrio, Kao se pregunto cuál era el límite fundamental en las pérdidas en el cristal. El y Hockham concluyeron era causada por las impurezas mayormente, pero no por el cristal mismo. En 1966 ellos predijeron que un cristal altamente purificado debería ser tan claro que el 10% de la luz debería permanecer después de haber pasado por al menos 500 metros de fibra. Sus predicciones sonaron fantásticas para mucha gente en ese entonces, pero se mostraron muy conservadoras.

El papel publicado de Kao y Hockham puso en marcha una carrera a nivel mundial para construir mejores fibras. Los primeros en vencer sus teorías fue Robert Maurer, Donald Keck, y

Peter Schultz de Corning Glass Works (ahora Corning Inc.) en 1970. Otros los siguieron pronto, y las pérdidas fueron marginadas a niveles aun menores. En las fibras ópticas actuales, el 10% de la luz entrante permanece después de que la luz ha viajado más de 50 kilómetros en la fibra. Las pérdidas no son lo suficientemente bajas en sistemas de comunicaciones prácticos, pero han hecho progresos muy grandes. Debido a estos progresos, la fibra óptica se ha vuelto parte medular en redes de teléfonos de larga distancia alrededor del mundo.

III.4 Estructura de las Fibras

La estructura de una fibra óptica es muy simple. El núcleo que guía la luz esta hecho de un material con un índice de refracción mayor que el recubrimiento que lo rodea, como se muestra en la figura 12. La diferencia en el índice de refracción causa la reflexión total interna, que guía la luz a través del núcleo.

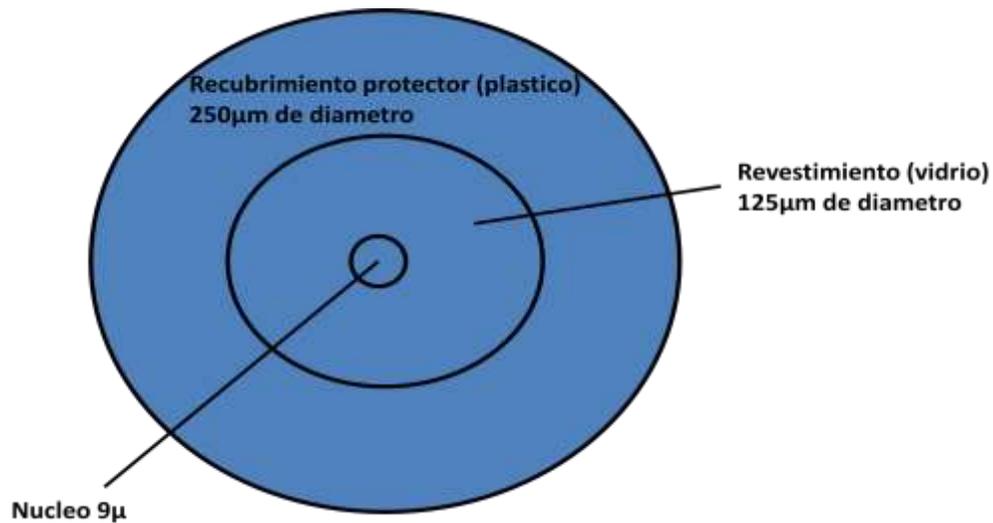


Figura 12 Sección transversal de una fibra óptica de comunicaciones

El tamaño del núcleo y los revestimientos puede variar entre los diferentes tipos de fibras. Las fibras construidas para imágenes de alta resolución tienen revestimientos delgados rodeando núcleos pequeños. Las fibras construidas para transportar potencias grandes de iluminación

tienen típicamente núcleos mucho más grandes con revestimientos delgados. En contraste, las fibras usadas en telecomunicaciones tienen densas capas de revestimiento cubriendo núcleos pequeños. La frontera o borde entre el núcleo y el revestimiento puede ser afilada o gradual, con el índice de refracción cambiando gradual o abruptamente. Algunas fibras de alto desempeño tienen múltiples capas en el borde del núcleo y el revestimiento.

El diámetro del revestimiento estándar en fibras para telecomunicaciones es de 125 micrómetros (μm), o .005 pulgadas. Un recubrimiento de plástico aumenta el diámetro alrededor de 250 μm , facilitando el manejo y protegiendo la superficie de vidrio de la fibra de raspaduras y otros daños mecánicos.

III.5 Materiales de las Fibras

La mayoría de las fibras están hechas de vidrio puro, con niveles pequeños de impurezas para ajustar el índice de refracción. Desde el punto de vista químico, las fibras más claras usadas en telecomunicaciones son esencialmente dióxido de silicio puro, conocido como *silicio* (SiO_2). Las fibras usadas para imágenes médicas e iluminación son construidas de vidrio menos puro. Algunas fibras están hechas de plástico, que no es tan puro como el vidrio, pero es más flexible y fácil de manejar. Algunas fibras están revestidas con plástico, pero típicamente el plástico es usado solo como un recubrimiento exterior para protección mecánica.

Las fibras para propósitos especiales están construidas de otros materiales. Por ejemplo, el compuesto de fluoruro es más claro en longitudes de onda del infrarrojo que el silicio, así que son usadas para aplicaciones en infrarrojo. Estas fibras pueden ser llamadas también de vidrio, porque están hechas de materiales en forma vidriosa o sin cristalizar, pero típicamente son identificadas por el tipo de material, por ejemplo, fibras de vidrio de fluoruro.

III.6 Fibras Ópticas para Telecomunicaciones

La idea básica de comunicaciones con fibra es sencilla, como se muestra en la figura 13. Una señal de entrada modula una fuente de luz, produciendo una señal óptica que viaja a través de la fibra hacia un receptor, el cual la decodifica.

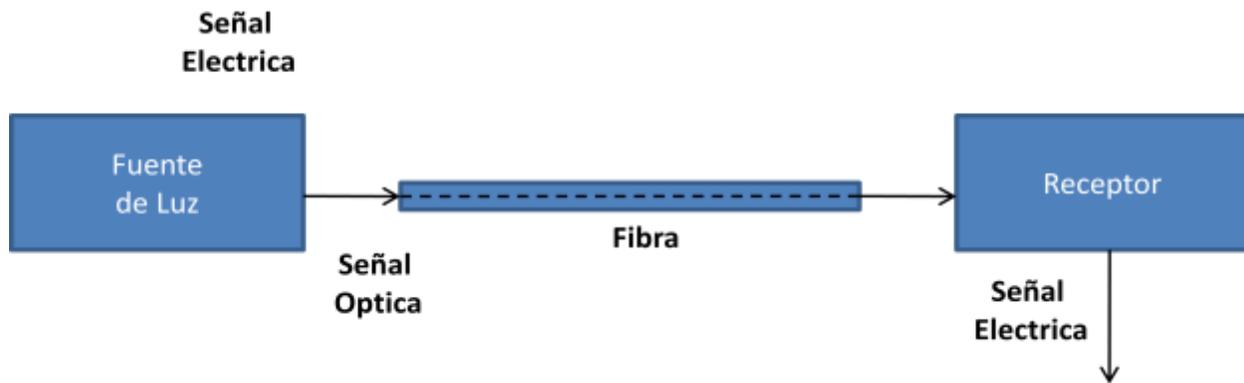


Figura 13 Componentes de un sistema de fibra óptica

Los sistemas de comunicaciones reales son mucho más complejos. El ejemplo mostrado en la figura 13 es la forma más simple de comunicaciones, transmisión de punto a punto de un simple transmisor a un simple receptor. Un sistema real de un sistema de fibra óptica para esta simple tarea es considerablemente más complejo que el que se ejemplifica en el dibujo. Circuitos electrónicos en el transmisor convierten la señal de entrada en una forma más adecuada para modular la salida de la fuente de luz; también pueden monitorear la salida óptica y controlar la temperatura del transmisor. Un par de conectores de precisión alinean al transmisor con una fibra que está dentro de un cable de modo que la luz pueda entrar en la fibra. Otros conectores pueden unir secciones separadas del cable. Longitudes de onda pueden ser unidas entre sí para formar un cable más largo. Los amplificadores pueden impulsar la fuerza de la señal óptica. Los conectores alinean la salida final de la fibra a la entrada del receptor. Un detector óptica en el receptor genera una señal eléctrica, circuitos electrónicos la amplifican y procesan para generar la señal eléctrica de salida que se requiere. [*Understanding Fiber Optics, Jeff Hecht, pág. 2-10*].

Capítulo IV.- Implementación del banco de pruebas.

Banco de Pruebas

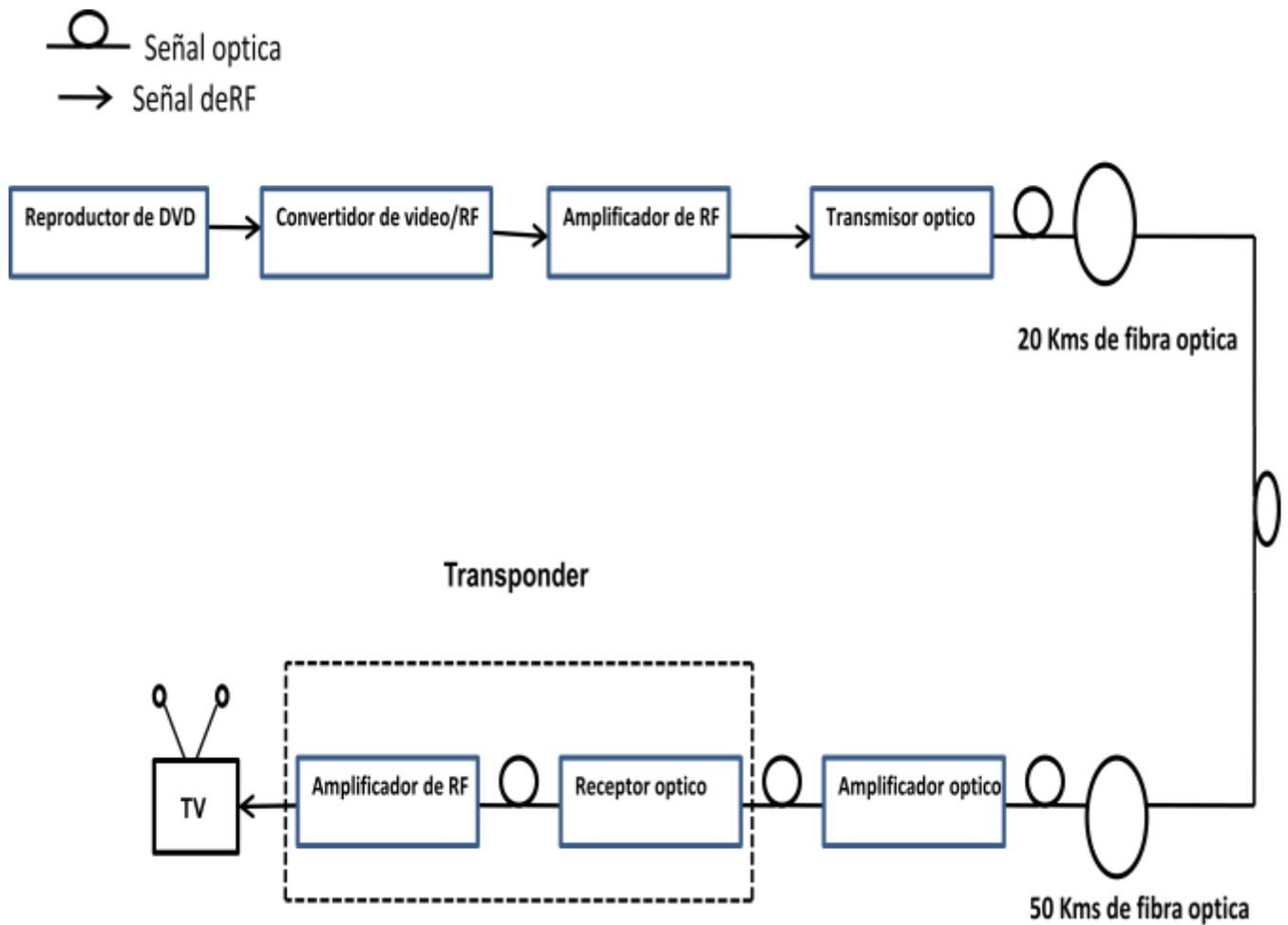


Figura 14 Diagrama a bloques del banco de prueba

Dispositivos usados en el banco de prueba:

- Reproductor de DVD.
- Convertidor de señal de video a señal de RF.
- Amplificador de RF.
- Transmisor óptico.
- Amplificador óptico.
- Receptor óptico.
- Fibra óptica.
- Televisor.

Desarrollo.

El objetivo del banco de pruebas es simular un sistema HFC de televisión por cable. Para validarlo se inyectara una señal de video y después de hacer toda la trayectoria por los distintos dispositivos que conforman el banco de pruebas, se recuperara la señal en un televisor convencional. El propósito de hacer esta demostración es comprobar que todos los componentes del banco funcionan de la misma manera que lo harían en un sistema real implementado por alguna compañía que así lo requiera.

El objetivo principal y fundamental de este proyecto, como ya se describió al inicio de este documento, es validar el funcionamiento y desempeño de los dispositivos manufacturados por la compañía Arris, en su planta de manufactura en Tijuana BC.

Instalación:

Para comprobar la funcionalidad de los dispositivos se instaló un generador de señales HP. Se configuro la frecuencia a 61.250MHz, la cual es la frecuencia en la que trabaja el canal 3 en el espectro de frecuencias. Para comprobar la señal se midió con un analizador de espectros obteniéndose la siguiente imagen:

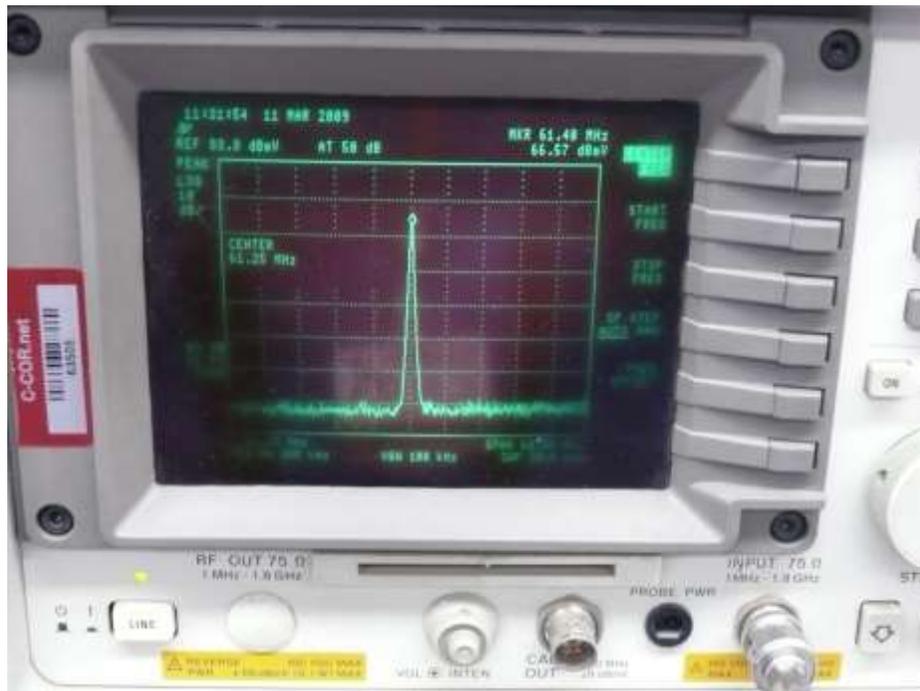


Figura 15 Señal portadora a 61.250 MHz

Una vez comprobada la funcionalidad de los dispositivos con un generador de señales, se procedió a conectar el reproductor de DVD, este se conecto al convertidor de video a RF, la salida fue conectada a un amplificador de RF, cuya salida de RF ya amplificada fue inyectada al transmisor óptico. De la salida del transmisor, se instalo un atenuador óptico para prever daños al dispositivo, y se instalo un carrete de fibra óptica de 20 Km de longitud para evitar que el transmisor fuera dañado por las perdidas ópticas por retorno que se crean al conectarlo al amplificador óptico. A la salida del amplificador óptico (EDFA, por sus siglas en ingles), se instalo de la misma manera un atenuador óptico. La salida óptica, ya amplificada se conecto a un carrete de fibra óptica de 50 Km que simula el recorrido de la luz en el sistema HFC. Dicha señal óptica se inyecto a un receptor óptico que está instalado en el *transponder* OM41 (por su modelo de manufactura). Este *transponder* además de recibir la señal óptica hace la conversión óptica-eléctrica y la salida convertida ya a RF fue monitoreada por un analizador de espectros obteniéndose la siguiente figura”



Figura 16 Imagen de la señal a la salida del sistema

En la imagen mostrada, se puede identificar de una manera clara las portadoras de audio, video y croma, lo que nos indica que nuestro sistema está transmitiendo de una manera eficiente.

Una vez comprobada la funcionalidad del banco de pruebas, se procedió a conectar un aparato de televisión para corroborar los resultados obtenidos y se consiguió obtener una imagen difusa y de mala calidad. Se procedió a revisar los valores de entrada y salida de cada uno de los dispositivos, a limpiar los conectores de la fibra óptica y no hubo mejora. Se optó por empezar a variar en forma gradual los valores de salida del amplificador de RF, del transmisor y amplificador óptico y el resultado fue una mejora sustancial en la calidad de imagen. Para reforzar esto, se optó por conectar una tarjeta controladora (SMM-1), que por medio de un programa adecua los valores de potencia de los dispositivos ópticos. Al hacer esto y modificar algunos parámetros de los dispositivos, se logra una mejor imagen. Cabe mencionar que los problemas en las potencias de salida son ocasionados por los atenuadores ópticos, que no tienen la calidad deseada, pero debido al estado experimental del banco de pruebas, se prefirió manejar las potencias que hacer una inversión en atenuadores de mejor calidad, debido al costo de estos en el mercado.

Aun y con estos impedimentos técnicos, la imagen obtenida es de una calidad aceptable, y para los fines que se pretenden con el banco de pruebas, suficiente para el fin para el que fue diseñado.

Más adelante en este capítulo se harán las mediciones pertinentes, basándose en las especificaciones de los dispositivos usados en el banco de prueba, y se compararan para ver el desempeño de estos.

Se considera fundamental conocer primero las especificaciones del fabricante de los dispositivos, para evitar daños a los mismos a la hora de instalarlos en el banco de prueba, así como para saber las condiciones óptimas de desempeño de los mismos.

Características de los dispositivos usados en el banco de prueba.

-Amplificador de RF (CHP GAMP3): El 1 GHZ *3-Input Forward Path RF Amplifier* es un modulo intercambiable que puede ser usado como un elemento clave en un *headend* o en un centro de actividades para proveer una amplificación en la señal de RF. Este amplificador está diseñado para proveer a los operadores de sistemas una manera económica de compensar pérdidas, con un mínimo de degradación al desempeño del sistema, causado por combinar y dividir redes, lo que es común en *headends* dentro de sistemas con tecnología HFC.



Figura 17 Amplificador de RF

Especificaciones:

Ancho de Banda MHz	50 a 1002
Perdidas por retorno dB	16
Ganancia dB	17
Composite triple beat (CTB) dB	-85
Composite second order (CSO) dB	-74
CNR dB	-70

-Transmisor óptico (CHP-GQTX). El transmisor de 1 GHz QAM es ideal para transportar video codificado digitalmente (16/64/256 QAM) y datos en QPSK desde el *headend* al centro de actividades (*Hub*) o a los nodos. Este tipo de transmisor puede manejar señales QAM en *narrowcast*, telefonía, etc. Desde 550 a 1002 MHz y convertir la entrada de RF a una salida óptica en longitudes de onda *DWDM* (por sus siglas en inglés). La salida óptica de 10 dB, permite al transmisor cubrir distancias de hasta 150 Km cuando es usado en conjunto con un *EDFA* (por sus siglas en inglés).



Figura 18 Transmisor óptico

Especificaciones:

Longitud de onda	1529nm (ITU channel 61) a 1561nm (ITU channel 21)		
Potencia de salida óptica	9.75/10.0/10.25 dBm		
Ancho de banda RF	550 a 1002 MHz		
Perdidas por retorno	16 dB		
Distancia de enlace	30 Km	90 Km	145 Km
CNR típico	51 dB	44 dB	41 dB
CTB típico	-60 dBc	-50 dBc	-45 dBc
CSO típico	-55 dBc	-30 dBc	-25 dBc

-Amplificador optico (CHP-EDFA). El amplificador de fibra dopada de erbio ofrece una solución de amplificación óptica. Están diseñados para trabajar con transmisores a 1550nm, simplificando las aplicaciones al proveer un ruido muy bajo.

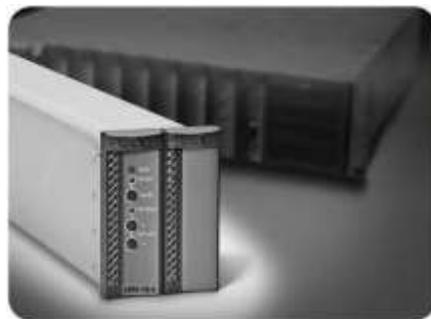


Figura 19 Amplificador óptico

Especificaciones:

Longitud de onda nm	1530-1562
Potencia total dBm	22
Potencia de entrada optica dBm	-10 a 12
Ganancia optima por puerto dBm	21

-Transponder. El nodo Opti Max4100 1GHz totalmente segmentable, es una plataforma modular. El Opti Max4100 facilita una segmentación de 4 x 4 de las señales de adelanto y retorno (*forward and return*). 1 GHz de ancho de banda permite a los proveedores de servicios de banda ancha incrementar la capacidad del *forward* para HDTV (*High Definition TV*) sobre programas anteriores, por lo tanto permite típicamente un 40% sobre canales HDTV actuales.

Aunado a esto, el nodo Opti Max4100 soporta sistemas de fibra con una variedad de transmisores ópticos de retorno (*return*).



Figura 20 Nodo segmentable

Especificaciones:

Longitud de onda de entrada nm	1290 a 1600
Potencia de entrada dBm	-3 a 3
Nivel de salida de RF dBm	53.5
Ganancia de RF dBm	17 +/- 1.0

-Craft Management Software

Este programa es utilizado para controlar los dispositivos opticos, asi como el amplificador de RF usados en el banco de prueba.

Por medio de esta interfaz se puede manejar la salida optica, asi como la salida de RF. Tambien se pueden prender y apagar las alarmas de los dispositivos como medio de control de los mismos.

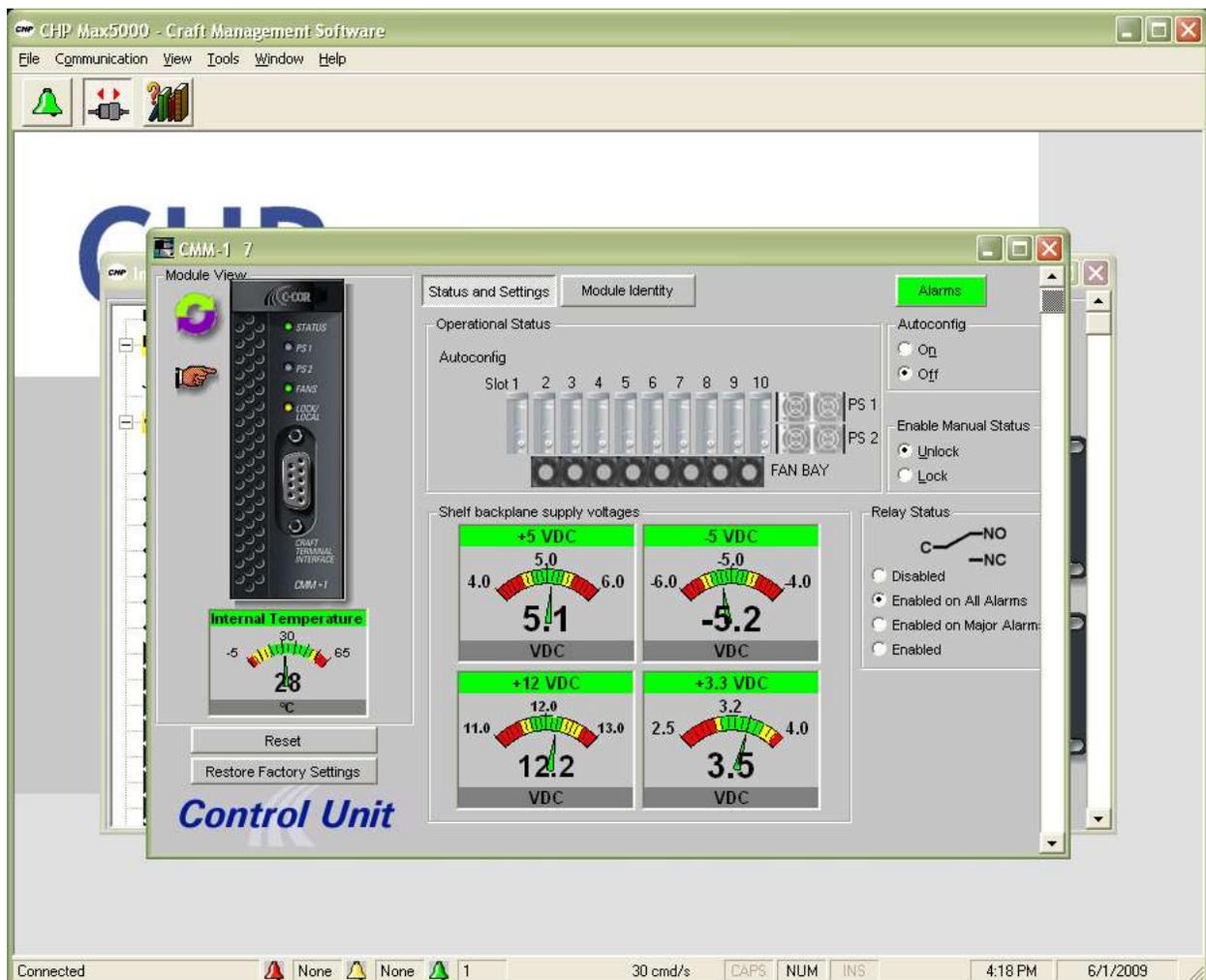


Figura 21 Interfaz del programa de control

Justificacion del proyecto.

En el año de 1998, fue el primer contacto que se tuvo con los amplificadores de RF (Radio frecuencia), esto fue en la compañía C-Cor de Mexico, fabricante de estos dispositivos entre otros productos relacionados con RF.

Que es, como funciona, para que sirve un amplificador de RF? Estas, aparte de otras interrogantes, fueron las primeras dudas que se tuvieron, aunadas a la impresión de trabajar con tecnología completamente desconocida.

La primer actividad realizada en la empresa fue la alineacion (reducir perdidas de frecuencia), reparacion y diagnostico de filtros diplex (Filtros pasa bandas, reciben el nombre de diplex porque dejan pasar tanto frecuencias bajas como altas, de 5 a 42 MHz y de 42 a 1002 MHz).

La persona encargada a la actividad de capacitacion no pudo responder a las preguntas planteadas con respecto a la funcion de los filtros diplex en un amplificador, por ende, menos podia resolver las preguntas sobre los amplificadores, lo mas que pudo de explicar fue que los amplificadores servian para sistemas de telefonia y sistemas de television por cable, tecnologias no tan conocidas ni tan explotadas como en los días actuales. Ver las señales de las frecuencias manejadas en un analizador de redes, (instrumento nuevo para mi tambien), solo hacia crecer la inquietud de saber que era en realidad lo que se estaba haciendo.

Despues de alrededor de tres meses diagnosticando filtros, se dio la transferencia al area de alineacion de los amplificadores de radio frecuencia. Las mismas preguntas se le hicieron a la person asignada a la capacitacion en dicho proceso, y las dudas seguian siendo casi las mismas, tampoco pudo dar una repuesta que llenara la inquietud que se tenia. Se debe hacer mencion que era un tecnico en electronica tambien, por lo que se comprendio que se hacia el trabajo sin saber exactamente que era lo que habia detrás de todo lo que se hacia en realidad, fue hasta cuando se le pregunto a un ingeniero de prueba todas las dudas, que pude satisfacer todas las inquietudes, despues de cinco meses de haber ingresado a trabajar.

Despues de un tiempo de estar trabajando en produccion se dio un cambio de actividades y se ingreso al departamento de prueba electrica, departamento encargado de la parte tecnica del

producto, como se prueba, que especificaciones se deben cumplir para cada producto en particular, y la plataforma o programa de prueba, entre otras funciones.

Al estar en este departamento, ahora si estaba alcance toda la informacion tecnica de los amplificadores y todos los accesorios que los conforman, se podia entender de manera clara que habia atrás de cada prueba, cada señal vista en la pantalla del analizador de redes, y se podia compartir este nuevo conocimiento con toda la gente que estuviera interesada en ello (tecnicos en electronica y ensambladores por igual).

Parte de las funciones en este departamento, era entrenar a los tecnicos de nuevo ingreso en la alineacion de los amplificadores de RF (cosa que en el tiempo que ingrese a trabajar no se hacia), ahora se tenia la oportunidad de poder decirles todo lo que relacionado a esta actividad, fue cuando surgio otro inconveniente, no podiamos ver el fruto de nuestro trabajo funcionando en el campo. Lo que se quiere decir con esto es, cuando trabajas en una compañía que se dedica a la fabricacion de televisores por ejemplo, se puede ver el fruto de tu trabajo diariamente y en forma cotidiana, con el simple hecho de oprimir un boton, en nuestro caso no es tan simple, ya que los amplificadores se usan en redes implementadas en el campo y ciudades y su funcionamiento, cuando es el optimo, es transparente para el usuario.

Ahora se tenia la facilidad de aclarar las dudas de lo que era un amplificador, su funcionamiento y su fin, pero no se podia mostrar al las personas que querian saber, su desempeño en el campo, asi que esa parte siempre quedo como en una etapa de tratar de alguna manera de hacer algo que despejara esas dudas y nos diera luz sobre todas esas interrogantes.

Una de las actividades del departamento de prueba electrica, son las corridas de nuevos modelos de amplificadores de RF, (cuando se va a liberar un producto con especificaciones electricas diferentes, se evalua un lote de unidades para poder decidir si esta listo para su produccion en linea). Aquí surgio otra interrogante, como afectaba al producto su desempeño en el campo todos los cambios que se le hacen al diseño original del mismo?

C-Cor de Mexico era una empresa estadounidense, su corporativo esta en el pais vecino Estados Unidos, asi que su departamento de diseño esta ubicado alla. Cuando se diseña un nuevo producto, o una variedad del mismo, todas las pruebas de diseño se realizan alla, y a la planta en Mexico solo le corresponde validar el diseño y hacer cambios minimos en el mismo para que el producto cumpla con las pruebas que se hacen aquí e, pero hay otras pruebas que aquí no se realizan como por ejemplo la modulacion del AC (corriente alterna) en la frecuencia HUM modulation, asi como distorciones de segundo y tercer orden (CSO, CTB) y la relacion señal a ruido (CNR) en los amplificadores, por mencionar algunas. Estas especificaciones son asignadas despues de las pruebas realizadas en el departamento de diseño en EU y para la planta aquí en Mexico son implícitas que se cumplen por diseño. Así que un cambio drástico e el

diseño del producto, podría modificar dichas especificaciones sin tener el conocimiento, por lo tanto cada cambio que se hace al diseño del producto, aunque cumpla las especificaciones en las pruebas que aquí se hacen, debe ser validado por el departamento de diseño en EU, con las pérdidas de tiempo naturales debido al intercambio de información, la distancia y la diferencia de horarios.

Hace tres años atrás, la compañía ingreso en el campo de los amplificadores ópticos, tecnología completamente nueva para nosotros, pero hasta cierto punto familiar por el giro que la compañía tenía en el ramo de RF.

Nuevos productos, nuevas tecnologías, y nuevas pruebas nos obligaban a tener nuevos conocimientos y nuevas bases para poder desarrollar el trabajo en forma satisfactoria.

Ingresa a cursar la maestría, con el propósito de aprender las bases que me permitieran desempeñar mi trabajo en esta nueva tecnología de forma satisfactoria y comprendiendo lo que estaba haciendo.

Aquí fue donde se cristalizó la idea que siempre se había tenido, como ver mi trabajo en su etapa final. Con el proyecto de la maestría se pretende dar luz a las preguntas que siempre me he hecho y que me han hecho en la empresa el personal técnico que ahí labora, el poder ver el fruto de nuestro trabajo en su etapa final.

Al implementar el banco de pruebas, se pretende que el personal técnico y de ensamble que labora en la empresa, así como el de nuevo ingreso, tenga el conocimiento pleno de lo que su trabajo aporta, de lo importante que es y los beneficios que otorga el hacer un producto de calidad. Se pretende que al mostrales el banco de pruebas y puedan ver la imagen en el televisor de un evento o una película o un programa cualquiera, después de que dicha imagen hizo un recorrido de 80 KMs por medio de fibra óptica, que tuvo que ser amplificada, convertida de RF a señal óptica y viceversa, sientan la satisfacción y el orgullo de haber realizado un trabajo de calidad.

Este banco de pruebas pretende ser un fin didáctico para todos aquellos interesados en las comunicaciones, pretende develar las interrogantes de lo que hay detrás de un sistema de cable o telefonía digital, usando las dos tecnologías más comunes en nuestros días, el cable coaxial y la fibra óptica.

El otro objetivo del banco de pruebas, no menos importante, pero más significativo, es validar los cambios en el diseño de los amplificadores que construimos en nuestras instalaciones en la planta de Tijuana, B.C.

Como ya se menciona al principio de este capítulo, existen parámetros y/o especificaciones que se cumplen por diseño, y las pruebas que se hacen a los amplificadores aquí, no cubren los mismos. Cuando por alguna razón, se necesita hacer un cambio en el amplificador que comprometen dichas especificaciones y/o parámetros, se tienen que mandar la información al departamento de diseño, que está ubicado en State College, PA, USA.

Para los requerimientos de producción y demanda del producto, existen ocasiones en las que dichos requerimientos de producción no pueden esperarse debido a la demanda del cliente, y hacer toda la tramitación de cambios de componentes en el producto, comprometen los pedidos de venta, adquiridos con anterioridad. Aquí es donde el banco de pruebas juega un papel importante y primordial; al tener en nuestras instalaciones un medio que nos permita saber con certeza cómo un cambio en el diseño podría afectar el desempeño de los dispositivos en el campo, nos ayudaría a tomar decisiones rápidas y eficientes acerca de tales cambios.

Bibliografía:

Optical Fiber Communications

Gerd Keiser

Understanding lasers, An Entry-Level Guide

Jeff Hecht

Optoelectronics and Photonics, Principles and Practices

S.O. Kasap

Understanding Fiber Optics

Jeff Hecht

Modern Cable Television Technology, Video, Voice, and Data Communications

Walter Ciciora, James Farmer, David Large