



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA
DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES**

Alan Josué Ramirez González
Asesorado por el Ing. Julio César Solares Peñate

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN
EN ZONAS RESIDENCIALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALAN JOSUÉ RAMIREZ GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. JULIO CÉSAR SOLARES PEÑATE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín
EXAMINADOR	Ing. Jose Aníbal Silva de los Ángeles
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de septiembre de 2019.

Alan Josue Ramirez Gonzalez

Guatemala, 8 de junio de 2021

**Señor
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.**

Estimado Ingeniero:

Por este medio me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado **ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES**, desarrollado por el estudiante **Alan Josué Ramírez González**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro en particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'JCS', is centered on the page. The signature is fluid and cursive, written over a light blue rectangular background.

**Ing. Julio César Solares Peñate
Asesor**



Guatemala, 15 de junio de 2021

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES**, desarrollado por el estudiante **Alan Josué Ramirez González**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Solares Peñate.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica



REF. EIME 162 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ALAN JOSUÉ RAMIREZ GONZÁLEZ titulado: ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 11 DE NOVIEMBRE 2,021.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 712-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS DE TV ANÁLOGA Y TV DIGITAL PARA LA DISTRIBUCIÓN EN ZONAS RESIDENCIALES**, presentado por el estudiante universitario: **Alan Josué Ramirez González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad y la bendición de realizar mis estudios.
Mis padres	Liliana Magaly de Ramírez y Pablo Cesar Ramírez por su amor y apoyo.
Mi tía	Corina por su motivación y apoyo
Mis abuelos	Por siempre estar junto a mí.
Mi familia	Por ayudarme e inspirarme todos los días para alcanzar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudio que permitió desarrollar mis estudios.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi fuente de conocimientos y de constante aprendizaje
Mis amigos	Por su motivación y apoyo.
Mi asesor	Por brindarme de su apoyo durante el desarrollo de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
1.1. Señales analógicas	1
1.1.1. Ondas sinusoidales de voltaje	5
1.1.2. Frecuencias de señales analógicas.....	9
1.1.3. Espectros de señales analógicas	13
1.1.4. Ancho de banda.....	17
1.2. Señales digitales	19
1.2.1. Efectos del muestreo	21
1.2.2. Teorema de Nyquist	23
1.3. Fundamentos de telecomunicaciones	24
1.3.1. Líneas troncales	28
1.3.2. Espectro electromagnético y ancho de banda	30
1.3.3. Codecs y modems	32
2. MEDIOS DE TRANSMISIÓN	39
2.1. Cable coaxial.....	39
2.1.1. Características del cable coaxial	41
2.1.1.1. Impedancia característica.....	41

	2.1.1.2.	Atenuación	42
	2.1.1.3.	Longitud de onda.....	44
	2.1.2.	Ventajas y desventajas.....	45
2.2.		Fibra óptica	47
	2.2.1.	Características de la fibra óptica	51
	2.2.1.1.	Velocidad de propagación y longitud de onda	51
	2.2.1.2.	Reflexión y refracción.....	53
	2.2.1.3.	Dimensiones.....	55
	2.2.1.4.	Propagación de la luz.....	58
	2.2.2.	Ventajas y desventajas.....	63
3.		SERVICIOS DE TELEVISIÓN	65
	3.1.	Televisión análoga	65
	3.1.1.	Televisión a color	66
	3.1.2.	Sonido estéreo	77
	3.2.	Televisión digital.....	79
	3.2.1.	Transmisión de televisión digital.....	81
	3.2.1.1.	Televisión de alta definición	82
	3.2.1.2.	Procesamiento de señales digitales	85
	3.2.2.	Compresión de video digital	87
	3.2.2.1.	Principios de la compresión de video ...	89
	3.2.2.2.	Estándares MPEG.....	91
	3.2.3.	Compresión de audio digital.....	92
	3.2.3.1.	Sistema AC-3	94
	3.2.3.2.	Estándares MPEG audio	95
	3.3.	Redes HFC	97
	3.3.1.	Equipos terminales.....	100
	3.3.2.	Red de distribución coaxial.....	102

3.3.3.	Nodo de fibra óptica.....	105
3.3.4.	Interconexiones de fibra óptica.....	110
3.4.	Diseños de arquitecturas.....	115
3.4.1.	Tamaño del nodo.....	118
3.4.2.	Arquitectura distribuida.....	121
3.4.3.	Arquitectura centralizada.....	123
3.4.4.	Comparación de arquitecturas.....	126
3.4.5.	Generación de video análogo.....	127
3.4.5.1.	Características de TV análoga.....	131
3.4.6.	Generación de video digital.....	132
3.4.6.1.	Características de TV digital.....	135
4.	CALIDAD DE SERVICIOS.....	137
4.1.	Distorsión y ruido en sistemas de distribución.....	137
4.2.	Calidad de servicio.....	139
4.2.1.	Definición de calidad de servicio.....	141
4.3.	Calidad de la experiencia.....	143
4.4.	Rendimiento de la red.....	144
4.5.	Modelo de medición de rendimiento.....	145
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	149
5.1.	Riegos financieros en telecomunicaciones.....	149
5.2.	Análisis y propuesta de valor.....	150
5.3.	Caso de uso y análisis de costos.....	153
	CONCLUSIONES.....	167
	RECOMENDACIONES.....	169
	BIBLIOGRAFÍA.....	171

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Salida de un micrófono: a) un osciloscopio moderno b) forma de onda de voltaje.....	2
2.	Voltajes en un a) circuito abierto y b) circuito cerrado.....	4
3.	Voltaje aplicado a una bombilla con polaridad invertida.....	5
4.	Voltajes sinusoidales y cosenoidales	7
5.	Onda cuadrada analógica	8
6.	Nomenclatura de frecuencia	11
7.	Gama de frecuencias de la tecnología moderna.....	11
8.	Prisma	13
9.	Analizador de espectro analógico	14
10.	Onda sinusoidal analógica de 100 Hz: a) forma de onda de tiempo b) visualización espectral del analizador de espectro.	15
11.	Ancho de banda de voz humana: a) ancho de banda completo; b) ancho de banda espectral después del filtrado	18
12.	Señal analógica con dos niveles de voltajes posibles.....	20
13.	Conversión de señales análogas a digitales	21
14.	Muestreo a baja-frecuencia.....	22
15.	Muestreo a alta-frecuencia.....	23
16.	Circuito de dos hilos	25
17.	Circuito de cuatro hilos.....	26
18.	Circuitos de dos y cuatro hilos	28
19.	Líneas, troncales y conmutadores	29
20.	Espectro electromagnético.....	32

21.	Codecs y modems	33
22.	Una red sin multiplexores	36
23.	Una red con multiplexores	37
24.	Concepto básico del cable coaxial.....	41
25.	Componentes de la fibra óptica	49
26.	Transmisión en fibra óptica.....	51
27.	Reflexión de luz y transmisión entre interfaces.....	54
28.	Construcción de la fibra óptica.....	56
29.	Dimensiones típicas de la fibra óptica.....	57
30.	a) Confinamiento refractivo b) Confinamiento reflexivo	59
31.	a) Índice de paso - monomodo y b) Índice de paso -multimodo	61
32.	Tipos de propagación de la luz en las fibras.....	62
33.	Estructura de tubo para imagen de color	68
34.	Energía espectral de luminancia.....	71
35.	Vista en dominio de tiempo.....	73
36.	Ubicación y ancho de banda de las señales.....	75
37.	Representación polar.....	76
38.	Colores de la televisión en representación polar	76
39.	Espectro del ancho de banda para el sonido estéreo	79
40.	Codificación y decodificación de audio	94
41.	Red típica de HFC	99
42.	Punto de entrada	102
43.	Alimentación de derivación	105
44.	Nodo de fibra con múltiples opciones de entradas	107
45.	Opciones para segmentación de entradas coaxiales.....	109
46.	Arquitectura de estrella	111
47.	Arquitectura de anillo	112
48.	Arquitectura de anillo compartido analógico	114
49.	Estructura básica de la red de fibra	117

50.	Escalado de nodos.....	120
51.	Arquitectura Headend-hub con procesamiento distribuido.....	122
52.	Arquitectura centralizada headend – hub node.....	124
53.	Diagrama facial de video análogo	129
54.	Video análogo	130
55.	Diagrama facial de video digital	133
56.	Video digital.....	134
57.	Etapas de transmisión y medidas de rendimiento.....	138
58.	Puntos de vista técnicos y no técnicos para la calidad de servicio	143
59.	Criterios QoS.....	146
60.	Puntos de vista del QoS.....	148
61.	Análisis de flujo	149
62.	Niveles jerárquicos de propuesta de valor	152
63.	Diagrama de distribución.....	161
64.	Distribución de casas-pasadas.	162

TABLAS

I.	Costos de materiales – video análogo	154
II.	Costos de servicios – video análogo	156
III.	Costos de materiales – video digital.....	157
IV.	Costos de servicios – video digital	159
V.	Costos de materiales – despliegue planta externa.....	163
VI.	Costos de servicios – despliegue planta externa	164

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperaje
AM	Amplitud Modulada
ADC	Analog Digital Converter
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
dB	Decibelios
DAC	Digital Analog Converter
F	Frecuencia
FM	Frecuencia Modulada
F_s	Frecuencia de Muestreo
Gb	Gigabit
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
kbps	kilobits por segundo
kHz	kilohertz
km	kilómetros
m	Metros
MHz	Megahertz
QAM	Modulación en cuadratura
RPM	Revoluciones por Minuto
V	Voltaje

GLOSARIO

AVC	Advanced video coding por sus siglas en ingles
Broadcast	Distribución de contenido de audio o video
CAPEX	Gastos de capital
Codecs	Dispositivo de conversión de señales análogas
CPU	Unidad de procesamiento central
Crominancia	Intensidad de color percibida por el ojo
Demultiplexores	Circuito combinatorial que tiene una entrada y n salidas
DOCSIS	Data over cable services interface specification, por sus siglas en ingles
Downstream	Envío de datos del proveedor de servicios hacia el usuario final
Frecuencia	Número de ciclos por segundo de una onda
FTTx	Fiber to the x, por sus siglas en ingles

Headends	Hub principal para la recepción de señales de televisión
HFC	Hybrid Fiber-coax, por sus siglas en ingles
Luminancia	Intensidad total de la luz percibida por el ojo
Modem	Dispositivo de conversión de señales digitales
Monomodo	Núcleo de fibra óptica que transporta un solo modo de propagación
Muestreo	Recolección de valores representativos de una señal analógica
Multimodo	Núcleo de fibra óptica que transporta n modos de propagación
Multiplexores	Circuito combinacional que tiene n entradas y una salida
Nodo	Espacio o conexión donde convergen varias redes
Onda Sinusoidal	Curva matemática que describe una oscilación periódica
OPEX	Gastos de operación
POE	Power over ethernet, por sus siglas en ingles

PON	Pasive optical network, por sus siglas en ingles
Prisma	Cuerpo geométrico de cristal
QoS	Quality of services, por sus siglas en ingles
Upstream	Envió de datos del usuario final hacia el proveedor de servicios

RESUMEN

Desde su inicio la televisión ha formado parte en el desarrollo de las sociedades permitiendo la distribución de contenido informativo, entretenimiento y educativo.

Los sistemas de televisión como otras tecnologías de telecomunicaciones e informática han avanzado y actualizado, desde los sistemas de TV análoga hasta el desarrollo de TV digital que utilizan los avances tecnológicos en la transmisión de datos sobre fibra óptica y cableado coaxial empleando las redes HFC.

Paralelamente a los avances tecnológicos, el crecimiento de la demanda para obtener estos servicios aumento considerablemente, los proveedores de servicios se ven comprometidos a mejorar su red de distribución para así ofrecer una calidad de servicio a los usuarios finales.

El presente informe presenta un análisis e investigación de las redes HFC empleadas por los proveedores de servicios para la distribución de señales de TV análogas y digitales, para así establecer parámetros de comparación y evaluar los beneficios que puede obtener el usuario final al tener contratado un determinado servicio.

OBJETIVOS

General

Documentar los requerimientos técnicos de diseño e instalación para el análisis de los servicios de TV análoga y digital.

Específicos

1. Comparar los sistemas de distribución de TV análoga y digital.
2. Analizar la distribución de señales de TV por medio de las redes HFC.
3. Determinar la rentabilidad de operación para la implementación en zonas residenciales.
4. Establecer parámetros para la verificación de la calidad de experiencia y servicios ofrecida a los usuarios finales.
5. Promover el uso de nuevas tecnologías para la distribución de señal de TV en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Con los constantes desarrollos tecnológicos en el área de telecomunicaciones, se genera un crecimiento en la demanda de servicios de televisión. Esto conlleva a migrar de las señales de TV Análogas convencionales a señales de TV digital para la distribución de estos servicios al usuario final.

Existen diferencias considerables entre ambos sistemas de transmisión de las señales de TV, para la televisión analógica el brillo, los colores y el sonido se representan mediante variaciones rápidas de la amplitud, la frecuencia o la fase de la señal. En la televisión digital las señales son digitalizadas en bits por diversos protocolos, por lo que proporciona una mayor capacidad para transmitir información y no producen deterioro en los datos.

En el primer capítulo se explican los conceptos fundamentales y características sobre las señales digitales y análogas.

En un segundo capítulo se detallan los medios de transmisión que se emplean en la tecnología HFC, a través de cableados coaxiales y fibra óptica son los medios de transporte de datos.

En el tercer capítulo se describe las características y parámetros sobre los servicios de TV que los proveedores puede ofrecer a sus usuarios finales. Para el despliegue de estas soluciones los diseños y arquitecturas de redes HFC tienen mucha importancia para trasladar los servicios hasta el usuario final.

En el cuarto capítulo se muestran los parámetros que se deben de evaluar para determinar la calidad de servicio que un proveedor debe de ofrecer a los usuarios finales y el correcto rendimiento que debe tener el despliegue de las redes de distribución.

En el quinto capítulo se analiza los factores económicos y riesgos financieros que se deben de plantear los proveedores de servicios, ya que el proveedor debe de presentar una propuesta de valor al usuario final.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1. Señales analógicas

Para nuestros análisis, una señal analógica se define como cualquier representación de una cantidad física:

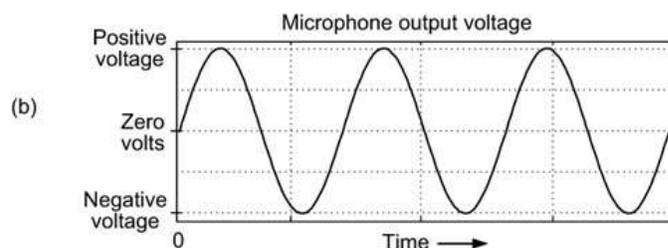
- cantidad que varía con el tiempo
- valor cuantificable en todos los instantes en el tiempo
- Tramo de valores que contienen información

Esas características parecen un poco misteriosas, pero en realidad no lo son. Se experimenta con señales analógicas todos los días. El audio que genera el altavoz de su teléfono celular, la señal de vídeo eléctrico que llega de su compañía de cable de televisión, la altura de la columna de mercurio en un termómetro al aire libre durante un período de un día, y la intensidad de la luz fluctuante de un centelleo, son todos ejemplos de señales analógicas. Un aspecto importante de las señales analógicas es que contienen información que puede ser significativa para nosotros. Con base a esto, detallaremos algunas señales analógicas.

Las señales analógicas eléctricas. A través de las investigaciones realizadas los ingenieros inventaron hace mucho tiempo un dispositivo mecánico que es sensible a las fluctuaciones de la presión del aire. Cuando se coloca en la trayectoria de una onda de sonido itinerante, la salida de este dispositivo es un voltaje positivo cuando se somete a una alta presión de aire y un voltaje negativo cuando experimenta baja presión de aire. Este dispositivo se denomina micrófono. Los ingenieros y técnicos pueden ver el voltaje analógico que produce

un micrófono conectando el cable de salida de un micrófono a un instrumento electrónico conocido como osciloscopio, que se muestra en la figura 1, el eje vertical en la pantalla del osciloscopio representa el voltaje y el eje horizontal representa el tiempo.

Figura 1. **Salida de un micrófono: a) un osciloscopio moderno**
b) forma de onda de voltaje



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

Si una onda de sonido llega a un micrófono y el cable de salida del micrófono está conectado al puerto de entrada de un osciloscopio la pantalla del visor mostraría la señal de voltaje, el cual en cualquier instante en el tiempo tendrá una

amplitud que da forma a la onda de voltaje e indica su energía instantánea. El voltaje positivo máximo en la se llama la amplitud máxima de la forma de onda. Las formas de onda de alta amplitud de pico tienen más energía que las formas de onda de baja amplitud pico.

La tensión de salida del micrófono, que representa las fluctuaciones en la presión del aire, es una señal analógica porque:

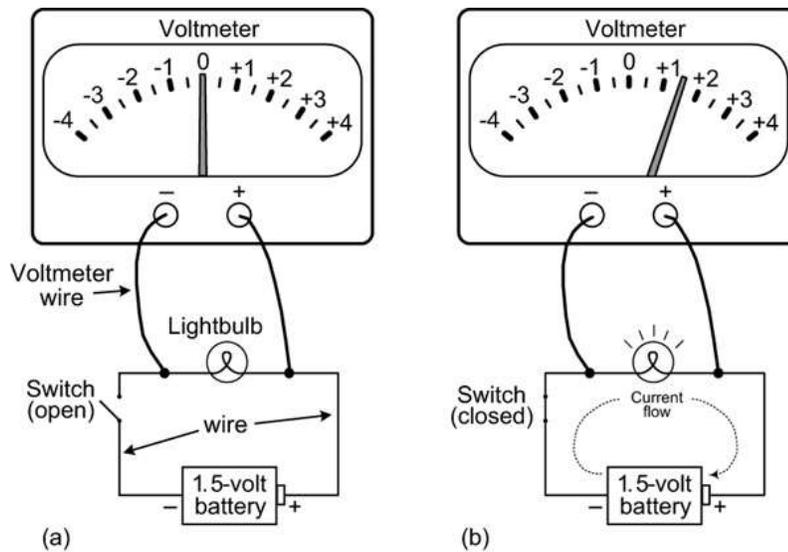
- tiene una amplitud que varía a medida que pasa el tiempo,
- tiene un valor en todos los instantes en el tiempo, el valor de voltaje cambia suavemente en una curva continua, sin huecos.
- contiene información como la diferencia de voltaje de pico a valle y la frecuencia.

Por lo tanto, podemos decir que la señal de voltaje es análoga a la onda sonora que viaja en el aire o la análoga de ella. Nos referimos a la curva en la figura como una tensión fluctuante. Debido a que muchas de las señales analógicas del mundo real que nos interesan toman la forma de señales de voltaje analógico.

¿Qué es una tensión eléctrica? Una tensión es una forma de presión eléctrica que tiene unidades de medida llamadas voltios. Esa presión eléctrica, dada la oportunidad, puede hacer que la corriente eléctrica fluya. La figura 2 se ilustra esta noción con una simple batería de linterna, interruptor y circuito de bombilla. Hay un voltaje de +1,5 voltios en el extremo positivo de la batería con respecto al extremo negativo de la batería. Del mismo modo, hay una tensión de -1,5 voltios en el extremo negativo de la batería con respecto al extremo positivo de la batería. En la figura 2, el interruptor está abierto, lo que significa que no hay camino para que los electrones fluyan a través del cable desde el terminal

negativo de la batería hasta el terminal positivo de la batería. Como resultado, no hay tensión, cero voltios, aplicado a la bombilla y la bombilla no está encendida.

Figura 2. Voltajes en un a) circuito abierto y b) circuito cerrado.



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

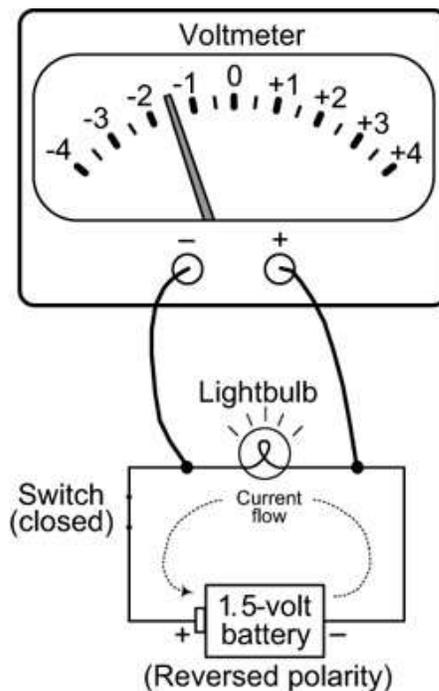
Consulta: mayo de 2020.

Cuando el interruptor está cerrado, como en la figura 2, la tensión de +1,5 voltios aplicada a la bombilla se conoce como una tensión de CC. El acrónimo DC significa corriente directa, y para nosotros la tensión dc simplemente significa una tensión que permanece constante en valor a medida que pasa el tiempo.

Consideremos otro escenario de batería/bombilla. Si giramos la batería de la figura 2, invirtiendo su polaridad, y cerramos el interruptor, entonces la corriente de electrones fluiría en sentido contrario a las agujas del reloj como se muestra en la figura 3. En ese caso, el voltímetro mide un negativo $-1,5$ voltios a través

de los terminales de la bombilla. Las bombillas incandescentes generan luz visible independientemente de la dirección del flujo de corriente a través de sus filamentos.

Figura 3. **Voltaje aplicado a una bombilla con polaridad invertida.**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

1.1.1. Ondas sinusoidales de voltaje

La forma de onda de voltaje en la figura 1 se conoce como una onda sinusoidal, un término genérico que puede referirse a una onda seno o coseno, dos formas de onda que describiremos en las secciones siguientes. Las ondas

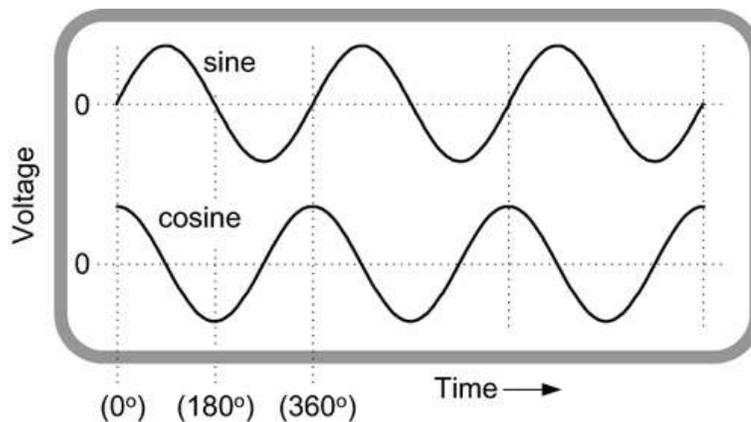
sinusoidales son verdaderamente abundantes en la naturaleza; estos son algunos ejemplos:

- olas en un río u océano
- ondas sonoras
- ondas electromagnéticas irradiadas por emisoras AM y FM
- ondas sísmicas (terremotos)
- luz de las estrellas en el cielo nocturno

La forma de onda de voltaje en la figura 1 es un tipo específico de onda sinusoidal, y las ondas sinusoidales aparecen en casi todos los aspectos del procesamiento de señales digitales. Para voltajes sinusoidales y cosenoidales supongamos que aplicamos una tensión al primer puerto 1 y aplicamos una tensión de onda coseno al segundo puerto de entrada del alcance. La visualización de doble seguimiento del ámbito aparecería como se muestra en la figura 4.

Allí, vemos que una tensión de onda coseno es simplemente una versión retardada en el tiempo sobre la tensión de onda sinusoidal. Resulta que hay muchas aplicaciones de procesamiento de señales que requieren que el practicante genere señales de onda sinusoidal y onda coseno simultáneamente. Las ondas sinusoidales y cosenos se conocen como ondas periódicas porque sus formas de onda se repiten periódicamente a medida que pasa el tiempo.

Figura 4. **Voltajes sinusoidales y cosenoidales**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020

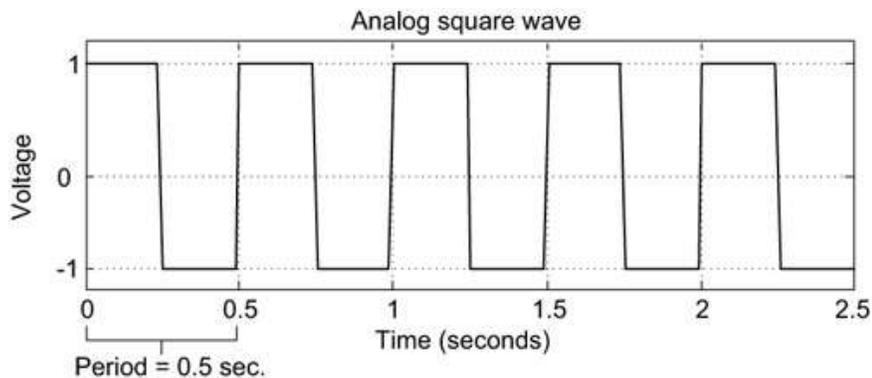
Todos los voltajes de onda sinusoidal son periódicos, pero no todos los voltajes periódicos son sinusoidales. Hay una serie de señales de voltaje analógico periódicas especializadas utilizadas por la gente de procesamiento de señales en diversas aplicaciones, así como para fines de prueba.

La figura 5 muestra lo que se llama un voltaje de onda cuadrada que repite su ciclo una vez cada medio segundo; es decir, dos oscilaciones/segundo. Decimos que el período de esa onda cuadrada es de 0,5 segundos, lo que significa que repite su oscilación una vez cada 0,5 segundos.

Se observa cómo esa tensión de dos niveles que fluctúa muy rápidamente de un lado a otro entre dos niveles de voltaje distintos. Como se puede ver, una señal de onda cuadrada no es necesariamente cuadrada en su forma; la tensión en la figura 5 es más rectangular que cuadrada. Sin embargo, cuando escuchas a alguien hablar de una onda cuadrada, lo que realmente quiere decir es una

señal que alterna entre sus dos niveles de voltaje y pasa el 50 % de su tiempo en cada nivel.

Figura 5. **Onda cuadrada analógica**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

En los dispositivos electrónicos que utilizamos cotidianamente se tiene un ejemplo de la aplicación de ondas cuadrada llamadas señales de reloj. Este voltaje de onda cuadrada de período constante se utiliza para sincronizar varias operaciones de circuito dentro de su computadora. Cuando usted lee que la frecuencia del reloj de un ordenador es 500 Mhz, esto significa que el ordenador genera y utiliza un voltaje de reloj de onda cuadrada interna que oscila 500 millones de veces por segundo. Cuanto mayor sea la frecuencia del reloj, más rápido será la velocidad de funcionamiento de un ordenador. En términos técnicos, una frecuencia de una oscilación por segundo se conoce como un hercio.

1.1.2. Frecuencias de señales analógicas

Las señales analógicas varían en valor medida que pasa el tiempo. Esas tramas son importantes para entender la naturaleza de cualquier señal analógica dada. Sin embargo, hay otra manera muy útil, de describir una señal analógica. Esa descripción alternativa se llama el espectro de una señal analógica. Aunque a menudo no se encuentra con el concepto de espectros en su vida cotidiana, las personas de procesamiento de señales estudian y analizan los espectros de señal todos los días. Cuando los ingenieros examinan una señal analógica, conocer el espectro de una señal es tan importante como conocer la temperatura, la presión arterial y la frecuencia cardíaca de un paciente que está siendo examinado por un médico.

Por lo tanto, para el análisis del procesamiento de señales, es importante que conozcamos cuál es el espectro de una señal y por qué es útil dicha información. Pero antes debemos analizar los conceptos de frecuencia, es una característica de los eventos periódicos. Para nosotros, la frecuencia es la medida de la frecuencia con la que ocurre algún evento repetitivo durante algún período de tiempo. Es decir, la frecuencia es un número de ciclos por alguna unidad de tiempo. Por ejemplo, cuando la aguja del tacómetro en un automóvil apunta al número 2, eso significa que el motor del automóvil está girando a una tasa de repetición de 2 000 revoluciones por minuto, RPM. Cada revolución es una repetición, haciendo la frecuencia 2 000 repeticiones por minuto.

Otra frecuencia con la que probablemente están relacionados es la frecuencia de la corriente alterna en un tomacorriente de pared en su hogar. Dependiendo de su ubicación geográfica, la frecuencia de la línea de alimentación de CA será de 50 o 60 Hz. Por ejemplo, en los Estados Unidos, si nos fijamos en el panel inferior de cualquier aparato en el mostrador de la cocina,

verá los caracteres 60 Hz. Los voltajes de la línea de alimentación de CA son de forma sinusoidal, lo que significa que el voltaje del conductor caliente en relación con el conductor neutro fluctúa de positivo a negativo, y luego de nuevo a positivo, al igual que la forma de onda de voltaje que analizamos anteriormente.

Los ingenieros de procesamiento de señales trabajan con señales que cubren unos asombrosos rangos de frecuencias. Los ingenieros de audio procesan señales analógicas en el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. Los ingenieros de radiocomunicaciones se ocupan de las ondas de radio analógicas con frecuencias en el rango de kilohercios hasta miles de megahercios. Algunos teléfonos celulares funcionan a 900 MHz, la frecuencia de la radiación dentro del horno microondas típico es de aproximadamente 2,5 GHz. Los astrónomos monitorean la radiación estelar analógica con frecuencias medidas en THz. La figura 6 se muestra el lenguaje y la notación, y la figura 7 se presenta una representación gráfica, de varias frecuencias encontradas en la tecnología moderna.

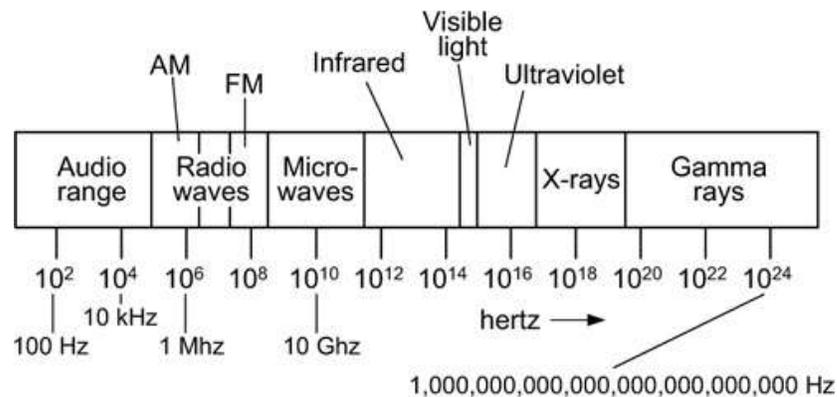
Figura 6. **Nomenclatura de frecuencia**

Frequency	Scientific Notation	Nomenclature
1,000 Hz	10^3 Hz	kilohertz (kHz)
1,000,000 Hz	10^6 Hz	megahertz (MHz)
1,000,000,000 Hz	10^9 Hz	gigahertz (GHz)
1,000,000,000,000 Hz	10^{12} Hz	terahertz (THz)

Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

Figura 7. **Gama de frecuencias de la tecnología moderna**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

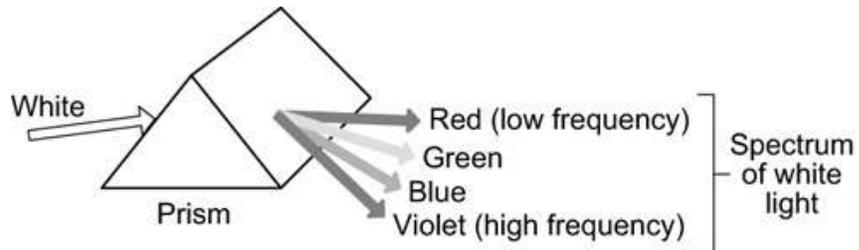
Consulta: mayo de 2020.

Para establecer el concepto de espectro, recordemos que ya hemos analizado las representaciones gráficas de algunas señales analógicas fluctuantes diferentes. Hemos visto gráficos bidimensionales donde el eje vertical de un gráfico representa la amplitud instantánea de una señal y el eje horizontal representa el tiempo. Estos gráficos, que muestran cómo cambia el nivel de

amplitud de voltaje de una señal a medida que pasa el tiempo, se denominan gráficas de dominio de tiempo. El eje horizontal de las gráficas de dominio de tiempo siempre está en unidades de tiempo. Otra forma esencial e importante de caracterizar las señales analógicas es describir su contenido de frecuencia. El contenido de frecuencia de una señal se denomina espectro de la señal.

El espectro de una señal significa la combinación de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias que componen una señal. Por ejemplo, ya se está familiarizado con la noción de un espectro. Si se observa el brillo de un haz de luz blanca en un lado de un prisma de vidrio, la luz multicolor sale del lado opuesto del prisma como se muestra en el diagrama crudo en la figura 8. Esto se debe a que la luz cambia de dirección cuando se mueve de un medio que es aire a otro medio que es vidrio. Ese cambio de dirección se llama refracción, y la cantidad de refracción depende de la frecuencia de la luz. Así que un prisma se puede utilizar para dividir la luz en sus colores espectrales constituyentes. La figura 8 nos muestra que la luz blanca es, de hecho, una combinación de múltiples colores de luz.

Figura 8. **Prisma**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

1.1.3. **Espectros de señales analógicas**

Con este concepto de espectro, se pueden realmente mostrar y medir el espectro de una señal analógica utilizando un analizador de espectro como el que se muestra en la figura 9. Un analizador de espectro muestra la combinación de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias que componen una señal analógica.

Figura 9. **Analizador de espectro analógico**

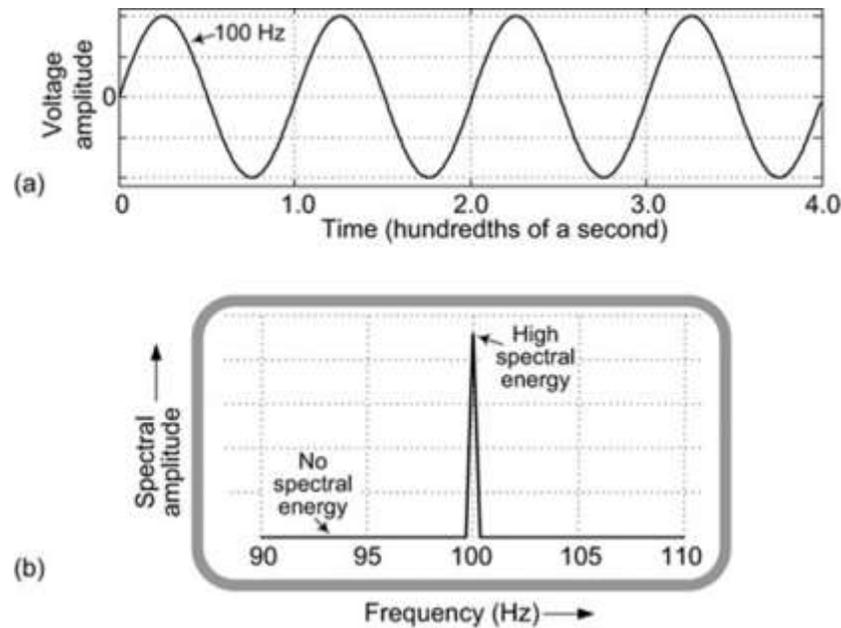


Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

Supongamos que el voltaje de salida de un micrófono es una onda sinusoidal de 100 Hz como se muestra en la figura 10 a). La conexión de ese voltaje al puerto de entrada de un analizador de espectro daría como resultado la visualización del dominio de frecuencia del analizador, que se muestra en la figura 10 b). El eje horizontal de las gráficas de dominio de frecuencia siempre está en unidades de frecuencia, normalmente Hz. Los controles del panel frontal del analizador se establecen de modo que la frecuencia de inicio y la frecuencia de parada de la visualización de frecuencia del analizador sean de 90 y 110 Hz respectivamente.

Figura 10. **Onda sinusoidal analógica de 100 Hz: a) forma de onda de tiempo b) visualización espectral del analizador de espectro.**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

El analizador de espectro contiene un detector de energía de frecuencia sintonizada que se ajusta inicialmente a la frecuencia de inicio de 90 Hz. En esa frecuencia, el analizador no detecta ninguna energía a su entrada que oscila a 90 Hz, por lo que, en la posición horizontal de 90 Hz en su pantalla de visualización, el analizador no muestra energía espectral. El detector de frecuencia sintonizado se sintoniza a 91 Hz donde no detecta ninguna fuente espectral de entrada de 91 Hz y, de nuevo en la posición horizontal de 91 Hz en su pantalla de visualización, el analizador no muestra energía espectral. Lo mismo sucede cuando el detector sintonizado se sintoniza desde 92 hasta 99 Hz.

A continuación, cuando se sintoniza a 100 Hz, el detector de energía indica un alto nivel de energía de entrada que oscila a 100 Hz. Ese evento hace que el analizador muestre el pico vertical de alto nivel en un valor de frecuencia de 100 Hz en la figura 10 b).

El detector de frecuencia sintonizado del analizador se sintoniza posteriormente, a su vez, de 101 Hz a la frecuencia de parada de 110 Hz donde, en cada caso, no se detecta energía espectral y la pantalla del analizador no muestra ninguna energía espectral de entrada en el rango de frecuencia de 101 a 110 Hz en figura 10 b). Ese pico vertical solitario en la figura 10 b) nos dice que el voltaje a la entrada del analizador de espectro contiene una forma de onda que oscila a 100 Hz como cabría esperar refiriéndose a la figura 10 a).

Supongamos que se quiere verificar realmente la frecuencia de la tensión de onda sinusoidal de salida del micrófono. Hay dos maneras de hacerlo. En el primer método, se podría mirar la forma de onda de tiempo del voltaje usando un osciloscopio, mencionado anteriormente, para ver la pantalla en la figura 10 a). Midiendo la duración del tiempo de una oscilación para que sea de una centésima de segundo, el ingeniero sabe que 100 oscilaciones ocurren en un intervalo de tiempo de un segundo. Por lo tanto, la frecuencia de la onda sinusoidal es 100 Hz.

El segundo método de medición de frecuencia es más simple. Se debe de conectar el voltaje de onda sinusoidal con la entrada de un analizador de espectro, ve la visualización espectral en la figura 10 b) para ver la ubicación de frecuencia del pico de amplitud espectral de alto nivel, y determina rápidamente que la frecuencia de la onda sinusoidal es de hecho 100 Hz.

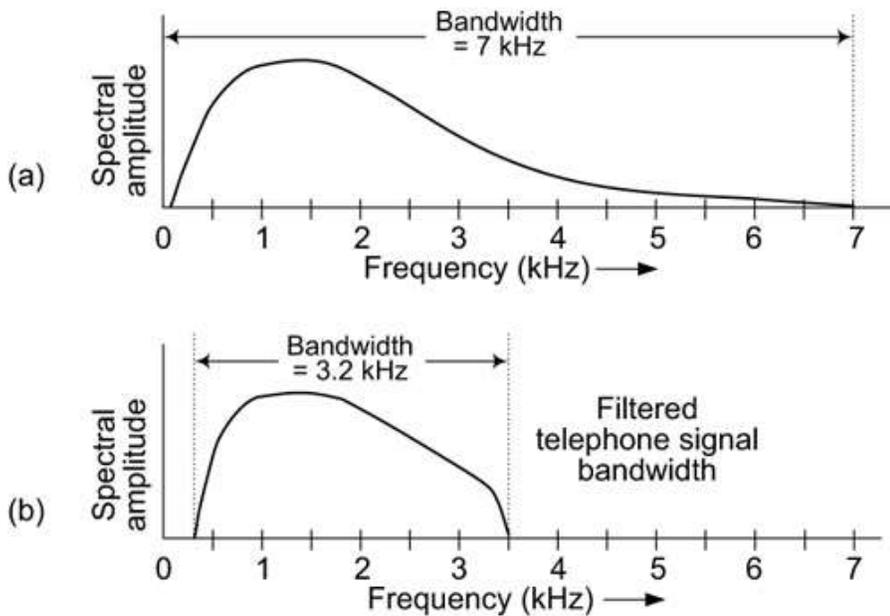
El factor importante es que se ven las formas de onda de amplitud de las señales analógicas a lo largo del tiempo usando un osciloscopio, y a veces se ve el contenido espectral de las señales analógicas, independientemente del tiempo, usando un analizador de espectro. Los analizadores de espectro son instrumentos de prueba muy potentes porque sus frecuencias de inicio y parada se pueden ajustar a cualquier valor de decenas de Hz a varios GHz. Un osciloscopio y un analizador de espectro son tan útiles para los ingenieros como un martillo y una sierra son útiles para los carpinteros.

1.1.4. Ancho de banda

Ahora que hemos cubierto los conceptos básicos de los espectros de señal analógica, podemos proceder a otro tema importante, el ancho de banda de la señal, que es el rango de frecuencia sobre el que una señal contiene una energía espectral significativa. Una buena manera de comenzar nuestra discusión de ancho de banda es considerando los viejos sistemas telefónicos fijos.

El espectro de audio del habla humana se parece a la curva que se muestra en la figura 11 a). Cuando la gente habla en el micrófono de un teléfono fijo, sus señales de voz contienen energía espectral que cubre un rango de frecuencia de aproximadamente 80 Hz a 7 kHz, por lo que es razonable decir que el habla humana tiene un ancho de banda de 7 kHz.

Figura 11. **Ancho de banda de voz humana: a) ancho de banda completo; b) ancho de banda espectral después del filtrado**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

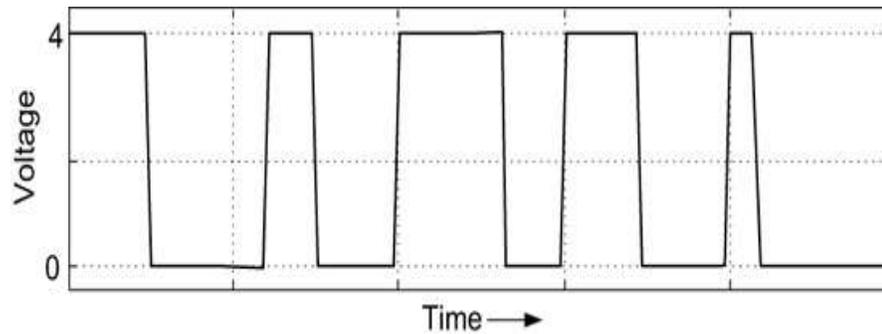
Por razones prácticas las compañías telefónicas requieren que una señal de voz telefónica analógica contenga energía sólo en un rango de frecuencias menores de 4 kHz. Como resultado, en las instalaciones de la compañía telefónica se pasa una señal de voz telefónica a través de un filtro analógico que elimina eficazmente la energía espectral por debajo de 300 Hz y por encima de unos 3,5 kHz. Por lo tanto, la señal de audio que la compañía telefónica transmite de un teléfono a otro está limitada en su ancho de banda a 3,2 kHz, como se muestra en la figura 11 b).

La razón por la que la compañía telefónica podría limitar el ancho de banda de las señales de voz analógicas a 3,2 kHz es porque la mayor parte de la energía espectral del habla humana está en el rango de 300 Hz a 3,5 kHz, y los seres humanos pueden entender fácilmente una señal de voz que está limitada en ancho de banda a 3,2 kHz. No es un discurso de alta fidelidad, pero sin duda lo suficientemente bueno como para mantener una conversación por teléfono.

1.2. Señales digitales

La expresión digital para las áreas de telecomunicaciones significa una posibilidad seleccionada de un número bien definido de posibilidades discretas. Un número digital es un único número seleccionado de un conjunto fijo de números. En los dispositivos electrónicos utilizados actualmente utilizan voltajes analógicos como se muestran en la figura 12, los voltajes descritos en la gráfica representan algún tipo de información para el sistema o dispositivo. A esta onda de voltaje se conoce como una señal digital porque el voltaje en cualquier instante en el tiempo está en uno de los dos niveles posibles

Figura 12. **Señal analógica con dos niveles de voltajes posibles.**

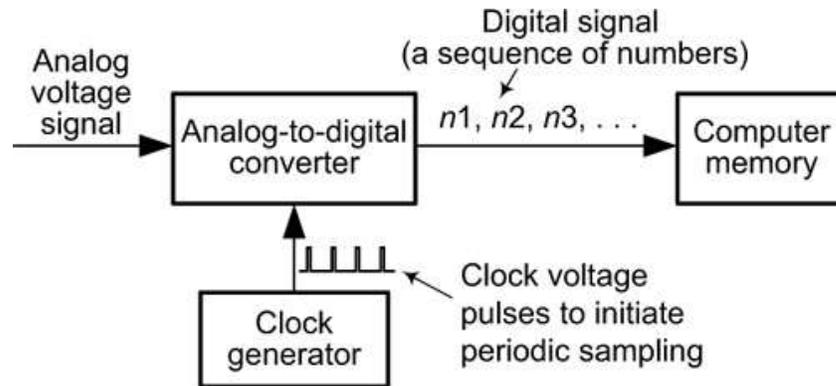


Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

Consulta: mayo de 2020.

En la mayor de casos estas señales son generadas mediante el uso de software, los ingenieros encargados de diseñar estos dispositivos utilizan con frecuencia el software para crear señales digitales necesarias para fines de análisis o pruebas. Los resultados de sus esfuerzos son señales digitales, listas de números almacenados en la memoria de un ordenador que pueden representar cualquier cantidad física a elección. La forma más común en que se generan las señales digitales es mediante el muestreo, un proceso por el cual representamos una señal analógica con una lista de valores discretos. El proceso de muestreo se muestra en la figura 13, una señal de voltaje analógico se aplica a un pequeño dispositivo electrónico llamado convertidor analógico a digital. Para mayor simplicidad, nos referiremos a un convertidor de analógico a digital como un ADC. La salida del ADC es una secuencia de números, n_1, n_2, n_3, \dots , que se almacena en la memoria de un equipo. La secuencia de números es nuestra señal digital obtenida mediante el muestreo de una señal de voltaje analógica.

Figura 13. **Conversión de señales análogas a digitales**



Fuente: D. LEE FUGAL. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>.

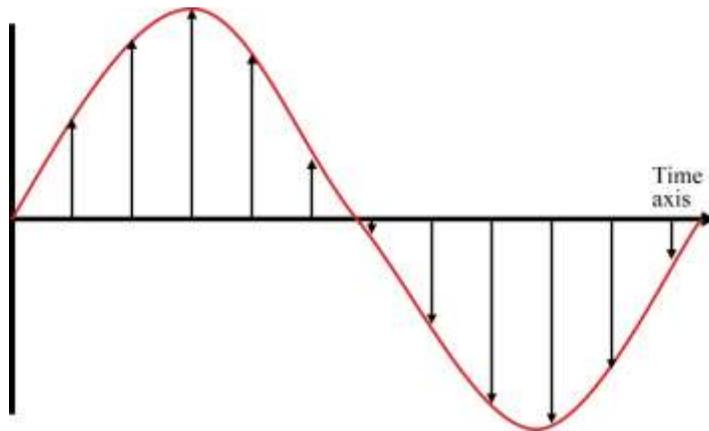
Consulta: mayo de 2020.

Para el proceso de muestreo de una señal analógica los pulsos de reloj espaciados periódicamente son críticos, ya que estos pulsos determinan los instantes exactos en el tiempo donde se medirán los valores instantáneos de la señal analógica y generara un solo valor de salida que represente ese valor.

1.2.1. Efectos del muestreo

A continuación, se muestran gráficos de dos señales sinusoidales diferentes que se muestrean. La señal sinusoidal más lenta o más baja en la figura 14. se puede representar con precisión con la frecuencia de muestreo indicada, pero la señal de movimiento más rápido o más alta en la figura 15. no está representada con precisión por nuestra frecuencia de muestreo. De hecho, en realidad parece ser una señal de movimiento lento o de baja frecuencia, como se indica en la línea discontinua. Esto muestra la importancia del muestreo lo suficientemente rápido para una señal de frecuencia determinada.

Figura 14. **Muestreo a baja-frecuencia**

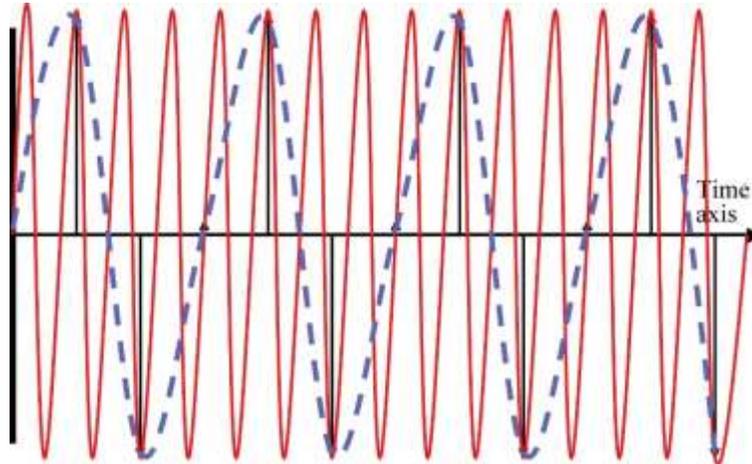


Fuente: PARKER, Michael. *Digital Signal Processing 101*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/digital-signal-processing/9780128114544/>.

Consulta: mayo de 2020.

Figura 15. **Muestreo a alta-frecuencia**



Fuente: PARKER, Michael. *Digital Signal Processing 101*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/digital-signal-processing/9780128114544/>. Consulta: mayo de 2020.

La línea discontinua muestra cómo aparecerá la señal muestreada si conectamos los puntos de muestra y suavizamos la señal. Observe que dado que la señal real, la línea sólida, está cambiando tan rápidamente entre los instantes de muestreo, este movimiento no es evidente en la versión muestreada de la señal. La versión muestreada realmente parece ser una señal de frecuencia más baja que la señal real. Este efecto se conoce como aliasing. Por este motivo se necesita una manera de cuantificar la rapidez con la que debemos muestrear para representar con precisión una señal dada.

1.2.2. **Teorema de Nyquist**

El teorema de muestreo de Nyquist proporciona la regla para el intervalo de muestra nominal necesario para evitar el aliasing. Puede resumirse simplemente

de la siguiente manera: la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la frecuencia más alta contenida en la señal. O en términos matemáticos:

$$F_s \geq 2 f_c$$

Donde F_s es la frecuencia de muestreo, que es la frecuencia con que se toman muestras por unidad de tiempo o espacio, y F_c es la frecuencia más alta contenida en la señal.

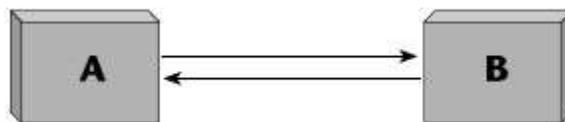
1.3. Fundamentos de telecomunicaciones

En esta sección veremos los tipos de conexiones de red, el espectro electromagnético y el ancho de banda, estos conceptos son la base con la que se ha construido y desarrollo toda el área de telecomunicaciones que se tienen en la actualidad. Las conexiones de red comienzan desde el concepto de circuitos cerrados, un circuito es la trayectoria física que se ejecuta entre dos o más puntos. Termina en un puerto, es decir, un punto de interfaz eléctrica u óptica, y ese puerto puede estar en un equipo host, en un multiplexor, en un switch o en otro dispositivo.

En sí mismo, un circuito no define la cantidad de datos que pueda que pueda transmitir. Por ejemplo, un circuito telefónico simple y tradicional está diseñado para llevar una sola conversación a través de una vía física. Pero tenga en cuenta que hago referencia específicamente al circuito telefónico tradicional; las instalaciones de banda ancha digital, como DSL, permiten múltiples canales, como canales de voz y datos separados, a través de una única vía física. Sin embargo, la conversión a un circuito digital permite extraer o derivar múltiples canales a través de ese circuito, facilitando posteriormente múltiples conversaciones simultáneas. El circuito es por lo tanto la medida de la Conectividad entre dos puntos finales.

Hay dos tipos de circuitos, el de dos hilos consta de dos conductores eléctricos aislados, un cable se utiliza para la transmisión de la información, y el otro cable actúa como la ruta de retorno para complementar el circuito eléctrico. Los circuitos de dos hilos se despliegan generalmente en el loop local analógico, que es la última milla entre el suscriptor y el primer punto de acceso del suscriptor en la red.

Figura 16. **Circuito de dos hilos**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,

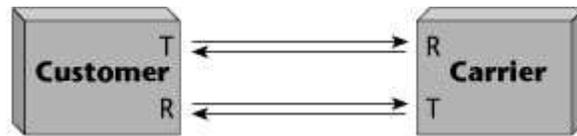
Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

El otro tipo de circuito es el de 4 hilos, que consta de 2 pares de conductores, es decir, dos conjuntos de trayectos de transmisión unidireccionales un trayecto para cada dirección y uno complementario para complementar el circuito eléctrico. Se han utilizado cuando la distancia entre los puntos de terminación requiere que la señal se amplifique periódicamente, por ejemplo, los circuitos de cuatro hilos conectan los diversos switches que componen la red telefónica conmutada pública. Los circuitos de cuatro hilos también se utilizan con líneas arrendadas, donde un cliente puede estar conectando ubicaciones propias que están separadas por distancia. Además, todos los circuitos digitales se aprovisionan sobre una base de cuatro hilos.

Figura 17. **Circuito de cuatro hilos**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,
Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

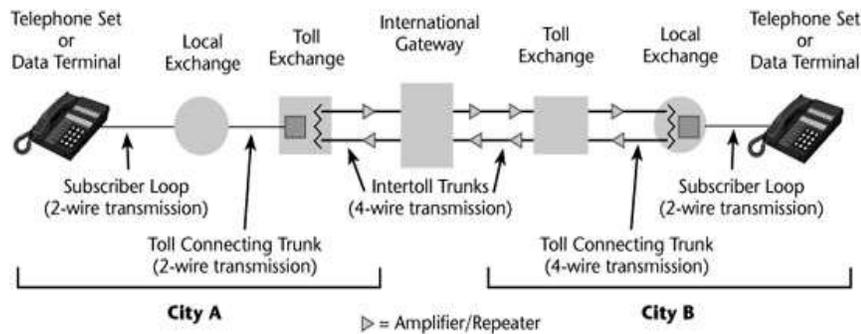
Cuando se induce una corriente eléctrica en un conductor de cobre se libera energía y pierde gradualmente la misma según la distancia que recorre. Debido a que las redes fueron diseñadas para transportar las comunicaciones a distancia, necesitan herramientas para regenerar señales atenuadas, es decir, señales que pierden energía a medida que viajan a través de la red. Estas herramientas se denominan amplificadores y repetidores. Un amplificador aumenta una señal atenuada hasta su nivel de potencia original para que pueda seguir haciendo su camino a través de la red. La RTC utiliza tradicionalmente cables de cobre. En función de la rapidez con la que las señales se atenúan sobre los cables de cobre, hay una cierta limitación de distancia entre los amplificadores. La limitación de distancia entre amplificadores es relativamente corta en los cables de cobre, generalmente alrededor de 6 000 pies. A medida que se construyeron redes, estas consideraciones de distancia se tuvieron en cuenta.

Los diseñadores de redes tenían que pensar en otro aspecto de los amplificadores: los amplificadores de primera generación eran unidireccionales. Sólo podían amplificar una señal moviéndose en una dirección, por lo que para aprovisionar un circuito que iba a estar cruzando una distancia, era necesario

aprovisionar literalmente dos circuitos, uno para amplificar la información en la dirección de transmisión y un segundo para amplificar la información en la dirección de recepción. Por lo tanto, cada vez que una red cruzaba una distancia, necesitaba utilizar un circuito de cuatro hilos. Pero en la construcción de los millones de circuitos locales para los suscriptores, se consideró que era rentable tirar sólo dos cables en cada hogar en lugar de cuatro.

Por lo tanto, los circuitos locales fueron diseñados intencionalmente para ser muy cortos; entre el 70 y el 80 % de los circuitos locales en todo el mundo tienen menos de 3,2 km de largo. Porque los circuitos locales son cortos, no necesitan amplificadores, y por lo tanto el servicio de acceso del suscriptor se puede aprovisionar sobre un circuito de dos hilos. Sin embargo, el circuito local se está digitalizando cada vez más, por lo que a medida que migramos a un entorno digital de extremo a extremo, todo se convierte en cuatro hilos. En la figura 18. muestra un ejemplo de un segmento de una red en el cual los circuitos de dos y cuatro hilos se utilizan tradicionalmente.

Figura 18. Circuitos de dos y cuatro hilos



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIOWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

1.3.1. Líneas troncales

Las líneas y líneas troncales son básicamente son lo mismo, pero se utilizan en diferentes situaciones. Una línea es una conexión configurada para admitir una carga de llamada normal generada por un individuo. Una troncal es un circuito configurado para soportar las cargas de llamada generadas por un grupo de usuarios; es la instalación de un transmisor que une los sistemas de conmutación. Un sistema de conmutación es un dispositivo que conecta dos líneas de transmisión.

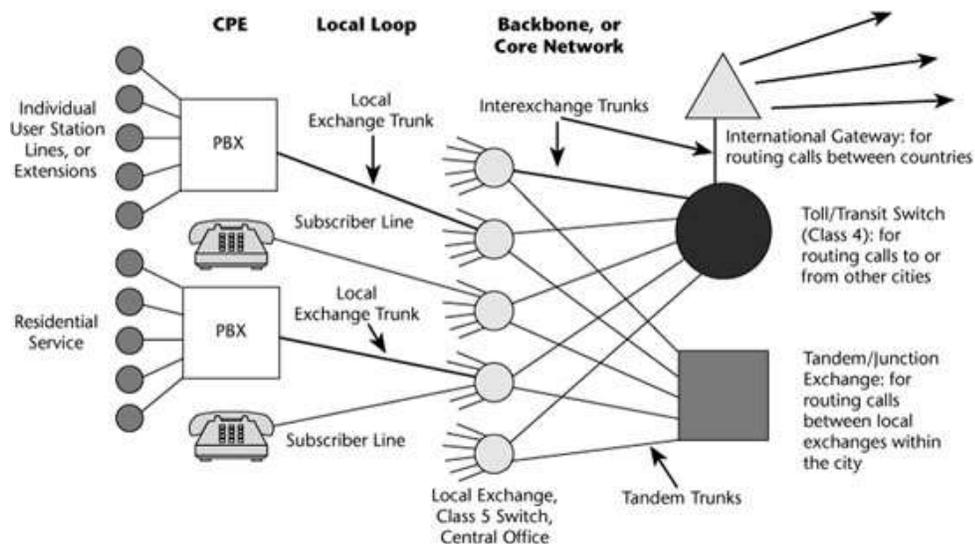
Existen dos categorías principales de sistemas de conmutación:

Switches CPE es la representación más frecuente en las instalaciones del cliente, Customer Premises Equipment - CPE, que realiza la comunicación entre PBX hacia las redes exteriores. Un PBX se utiliza para establecer una conexión entre dos puntos. Establece conexiones entre teléfonos que son internos de la

organización y establece conexiones entre las extensiones internas y el mundo exterior

Network Switches son una jerarquía de switches que ha evolucionado con el tiempo. Por ejemplo, en figura 19 el CPE está en el lado izquierdo. Cada dispositivo de una sola línea representa una línea de abonado. Más allá del PBX son los usuarios finales múltiples que se asocian a ese PBX. La conexión de cada usuario final se conoce como una línea de estación, haciendo énfasis de nuevo en que la línea está llevando la carga de llamada de un usuario.

Figura 19. **Líneas, troncales y conmutadores**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source

[.https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/](https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/).

Consulta: mayo de 2020.

Los intercambios locales del PSTN están conectados en una jerarquía para que una comunicación local llame a un vecino que reside a larga de distancia y

activa un tono de marcación de una comunicación local diferente, la conexión entre esas dos comunicaciones diferentes se logra a través de la segunda parte de la jerarquía: un conmutador en tándem. El conmutador en tándem se utiliza para conectar los intercambios locales en toda el área metropolitana.

Se pueden realizar tres tipos principales de conexiones de redes:

Conexiones de red conmutadas Una conexión conmutada se refiere como una conexión de acceso telefónico. Esto implica que utiliza una serie de conmutadores de red para establecer la conexión entre las partes.

Conexiones de red de línea arrendada: una línea arrendada también se conoce como línea privada. Con una línea arrendada, las mismas ubicaciones o los mismos dispositivos siempre están conectados, y la transmisión entre esas ubicaciones o dispositivos siempre se produce en la misma ruta.

Conexiones de red dedicadas: en esencia, una línea dedicada funciona exactamente igual que una línea arrendada. Siempre está conectado, y siempre utiliza la misma trayectoria para la transmisión. Sin embargo, el usuario final puede ser el propietario de la instalación de transmisión de modo que sea exclusiva para ese usuario.

1.3.2. Espectro electromagnético y ancho de banda

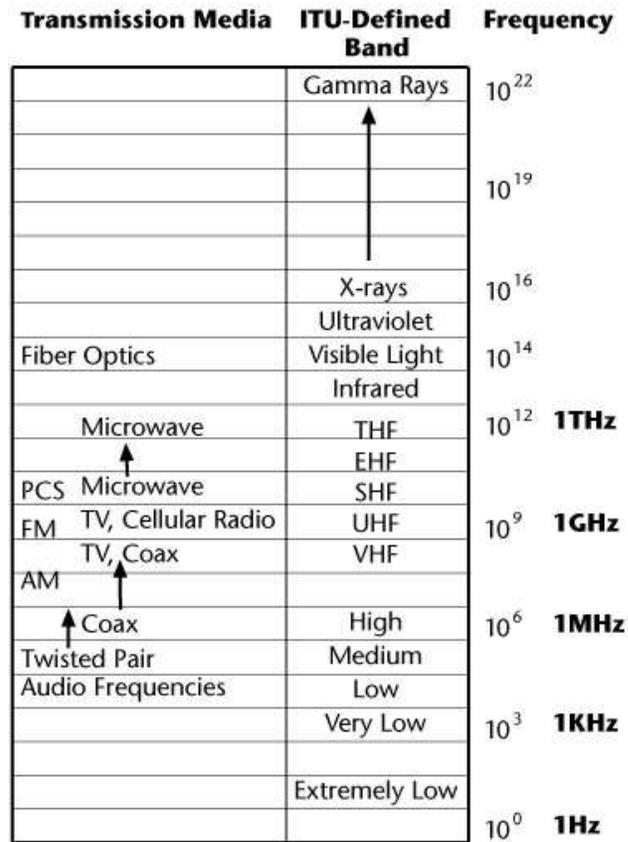
El espectro electromagnético abarca desde ondas de radio de frecuencia extremadamente baja de 30 Hz, con longitudes de onda casi el doble del diámetro de la Tierra, hasta rayos cósmicos de alta frecuencia de más de 10 millones de billones de Hz, con longitudes de onda más pequeñas que el núcleo de un átomo. El espectro electromagnético se representa como una progresión logarítmica: la

escala aumenta en múltiplos de 10, por lo que las regiones más altas abarcan un mayor rango de frecuencias que las regiones inferiores.

Aunque el espectro electromagnético representa una enorme gama de frecuencias, no todas las frecuencias son adecuadas para las comunicaciones humanas. En el extremo muy bajo del espectro hay señales que se transmiten a más de 30 Hz. Uno de los beneficios más importantes de una frecuencia muy baja es que viaja mucho más lejos que una alta frecuencia antes de perder potencia. Así que una señal de 30 Hz puede viajar por medio mundo antes de que requiera algún tipo de amplificación. Por ejemplo, una agencia de defensa utiliza 30 Hz para comunicarse con sus submarinos mediante la telemetría.

Debido a los problemas con frecuencias muy bajas y muy altas, utilizamos principalmente el medio del espectro electromagnético para la comunicación: las porciones de radio, microondas, infrarrojos y luz visible del espectro. Hacemos esto modulando las amplitudes, frecuencias y fases de las ondas electromagnéticas. El ancho de banda es en realidad una medida de la diferencia entre las frecuencias más bajas y más altas que se llevan. Cada una de las bandas de comunicaciones ofrece diferentes cantidades de ancho de banda, en función de la gama de frecuencias que cubren. Cuanto mayor sea el espectro, mayor será el rango de frecuencias implicadas.

Figura 20. **Espectro electromagnético**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

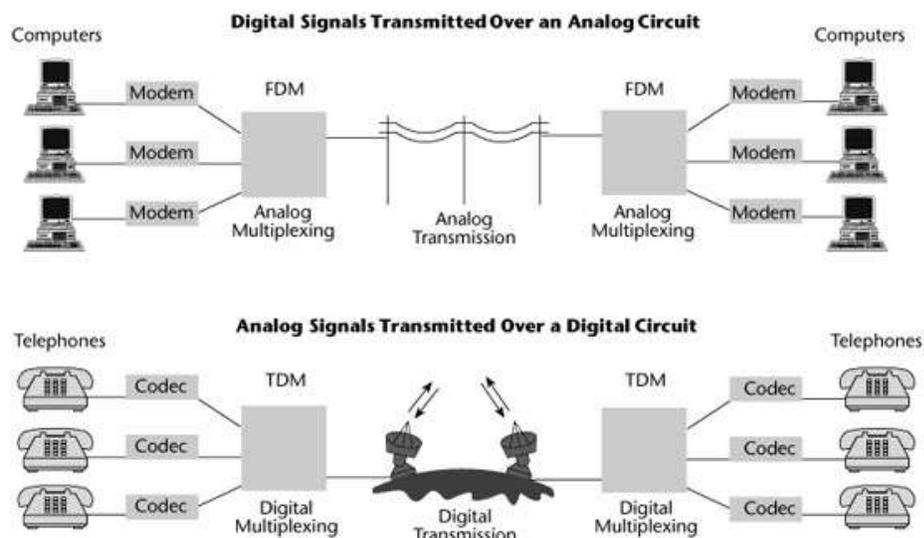
Consulta: mayo de 2020.

1.3.3. **Codecs y modems**

En las telecomunicaciones actuales no se tienen redes totalmente digitales o análogas, se tiene una mezcla entre ambas. Por lo tanto, en varios puntos de una red, es necesario convertir entre los dos tipos de señal. Los dispositivos que

manejan estas conversiones son codecs y modems un ejemplo de esto se muestra en la figura 21.

Figura 21. **Codecs y modems**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

Un codec, que es una contracción del codificador-decodificador convierte las señales analógicas en señales digitales. Hay diferentes códecs para diferentes propósitos. Para el PSTN, por ejemplo, hay codecs que minimizan el número de bits por segundo requeridos para llevar la Voz digitalmente a través de la RTC. En las redes celulares, debido a las restricciones y el espectro disponible, un códec necesita comprimir la voz aún más para obtener el uso más eficiente del espectro. Los códecs aplicados a la comunicación de vídeo también requieren técnicas de compresión muy específicas para mover esas señales de

ancho de banda alto a través de lo que pueden ser canales algo limitados hoy en día.

Un modem, que es una contracción de los términos modular y demodular se utiliza para infundir datos digitales en las instalaciones de transmisión y viceversa. Algunos módems están diseñados específicamente para trabajar con líneas analógicas de grado de voz. También hay módems diseñados para trabajar específicamente con instalaciones digitales. Un modem manipula las variables de la onda electromagnética para diferenciar entre los unos y los ceros.

Aunque es posible convertir entre redes analógicas y digitales, en general, las conversiones son un eslabón débil en una red. Una conversión es un punto en el que pueden producirse problemas de red, una oportunidad para que se introduzcan errores y distorsiones. Por lo tanto, idealmente, queremos avanzar hacia un entorno óptico digital de extremo a extremo y de extremo a extremo. Esto significa que no es necesario realizar conversiones de señal en ninguna parte entre el transmisor y el receptor. En el área de comunicaciones se utilizan muy a menudo los multiplexores, usualmente llamados Muxes y son extremadamente importantes para las telecomunicaciones. Su principal razón de ser es reducir los costos de red minimizando el número de enlaces de comunicaciones necesarios entre dos puntos. Al igual que todos los demás sistemas informáticos, los multiplexores han evolucionado. Cada nueva generación tiene inteligencia adicional, y la inteligencia adicional trae más beneficios. Los tipos de beneficios que se han acumulado, por ejemplo, incluyen los siguientes:

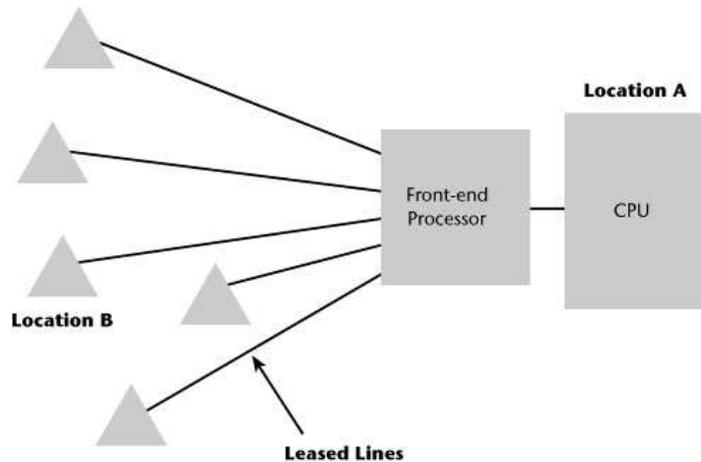
La capacidad de comprimir datos para codificar ciertos caracteres con menos bits de los que normalmente se requieren y liberar capacidad adicional para el movimiento de otra información.

La capacidad de detectar y corregir errores entre los dos puntos que se están conectando para garantizar que se mantenga la integridad y la precisión de los datos.

La capacidad de gestionar los recursos de transmisión de forma dinámica, con aspectos como los niveles de prioridad.

Cuando se está gestionando y diseñando las redes de telecomunicaciones, se debe de considerar los costos de los dispositivos y líneas que se van a implementar en el diseño, ya que todos estos costos de implementación se ven trasladados hacia los usuarios finales que se les prestara el servicio. En la figura 22, se observa una red base de una empresa que cuenta con las locaciones A y B, y que se interconecta con cada una de forma directa utilizando líneas de conexión independientes, y la construcción o arrendamiento de estas líneas hacia la locación A son de alto costo.

Figura 22. **Una red sin multiplexores**



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,

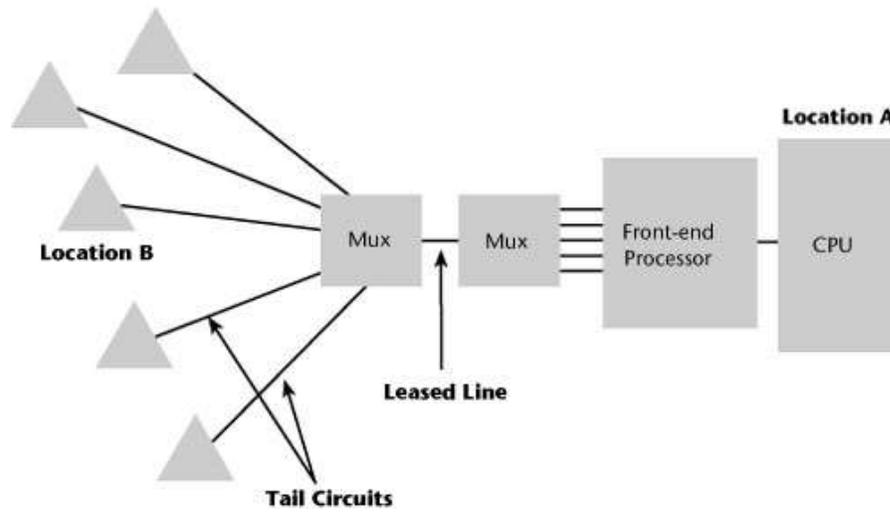
Telecommunications Essentials, Second Edition: The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

En el otro escenario que se muestra en la figura 23, se contempla la utilización de multiplexores en la implementación de la red, la cual permite la optimización en la cantidad de líneas por arrendamiento que comunicaran los sitios B con el sitio principal A, esto permite que solo se tenga una línea por arrendamiento para la comunicación de los sitios.

Figura 23. Una red con multiplexores



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: mayo de 2020.

2. MEDIOS DE TRANSMISIÓN

2.1. Cable coaxial

Los inicios técnicos de la televisión por cable son la distribución de señales de televisión analógica a los equipos terminales con conexiones de antenas de los receptores de usuarios finales. La forma menos costosa de lograrlo era evitar la necesidad de equipos en el hogar llevando cada transmisión de video en un canal de televisión estándar diferente para que los suscriptores pudieran usar sus televisores existentes para seleccionar y ver programas.

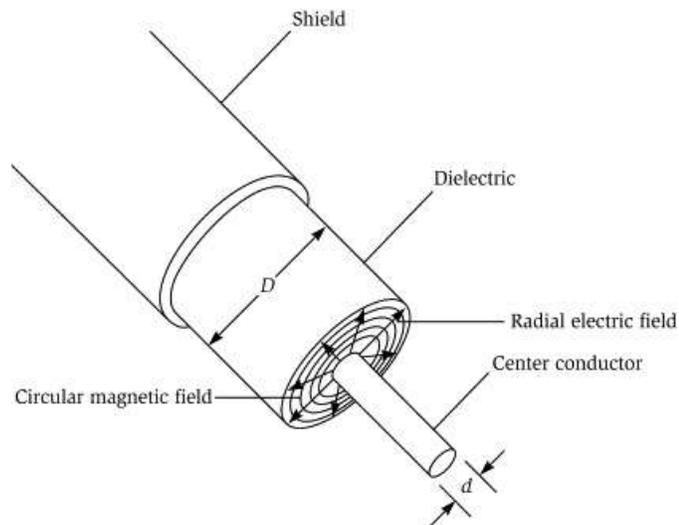
Aunque los sistemas de cable han evolucionado desde entonces en sofisticadas redes bidireccionales y multiservicio que utilizan combinaciones de fibra óptica lineal y cable coaxial para la transmisión, las principales características de las redes de distribución de última milla no cambiaron. En particular, el enlace final sigue siendo una red coaxial lineal de banda ancha que lleva simultáneamente muchas señales RF moduladas, cada una ocupando una banda diferente dentro del espectro: multiplexación por división de frecuencia, FDM. Hoy en día, muchas de las señales moduladoras son digitales en lugar de analógicas; sin embargo, la red debe seguir siendo lineal para evitar la generación de productos de distorsión no deseados.

El cable coaxial no es la única opción para transmitir señales RF de banda ancha. De hecho, muchos sistemas tempranos fueron construidos utilizando líneas de transmisión abiertas, de cable paralelo equilibrado, y algunos incluso utilizaron un ingenioso cable de un solo cable conocido como G-line, que sólo tenía un conductor central y dieléctrico. El cable coaxial, sin embargo, ofrece las

ventajas de un alto grado de blindaje, junto con relativamente bajo costo y fácil conformismo.

El cable coaxial está construido con un conductor central rodeado por un dieléctrico de sección transversal circular y por un conductor exterior también de sección transversal circular. Las señales dentro del ancho de banda de funcionamiento normal del cable coaxial tienen una configuración de campo conocida como eléctrica y magnética transversal. En el modo TEM, las líneas de campo eléctrico van radialmente entre el conductor central y exterior y son de resistencia uniforme alrededor de una sección transversal del cable, mientras que las líneas de campo magnético son circulares y perpendiculares a la longitud del cable como se observa en la figura 24, en un cable con un escudo continuo y perfectamente conductor, no hay campos eléctricos o magnéticos que se extienden más allá del conductor exterior, evitando tanto la fuga de señal como la entrada.

Figura 24. **Concepto básico del cable coaxial**



Fuente: LAGER, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: junio de 2020.

2.1.1. **Características del cable coaxial**

Este medio transmisión de datos es uno de los básicos e importantes para el área de telecomunicaciones por sus características y especificaciones técnicas.

2.1.1.1. **Impedancia característica**

Los cables coaxiales tienen una propiedad conocida como impedancia de sobretensión o usualmente conocida como, impedancia característica, que está relacionada con la capacitancia y la inductancia, por longitud de unidad del cable. La impedancia característica se ve más fácilmente en términos del efecto en las señales que se transportan: si un cable está conectado a una resistencia pura

ideal cuyo valor es igual a su impedancia característica, una señal transmitida hacia la resistencia será totalmente absorbido por la resistencia y convertido en calor. En otras palabras, no se reflejará ninguna energía en el cable.

La impedancia característica, Z_0 en ohmios, es una función de los diámetros relativos del conductor central y la superficie interna del conductor exterior y de la constante dieléctrica del dieléctrico:

$$Z_0 = 138 \text{Log}(D/d) \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \right)$$

D = Diámetro interno de la cobertura

d = Diámetro interno del conductor central

ϵ = Constante dieléctrica

2.1.1.2. Atenuación

La pérdida de señal a través del cable coaxial puede ocurrir a través de cualquiera de los cuatro medios:

- Radiación fuera del cable debido al blindaje imperfecto
- Pérdidas resistivas en los conductores de cable
- Absorción de señal en el dieléctrico del cable

Se tendrá reflexión de la señal debido a discrepancias entre el cable y las terminaciones o a lo largo del cable causada por la impedancia no uniforme. Incluso cuando los cables tienen escudos perfectos, coincidencias de impedancia exactas y construcción uniforme, los dieléctricos imperfectos y los conductores resistivos causarán pérdida. La ecuación general para esta pérdida de cable residual es:

$$\alpha = 4.344 \left(\frac{R}{Z_0} \right) + 2.774 F_p \sqrt{\epsilon} f$$

α = Atenuación del cable dB/100 pies

R = Resistencia óhmica efectiva de los conductores centrales

F_p = Factor de potencia del dieléctrico utilizado

F = Frecuencia en MHz

Las corrientes en los conductores son proporcionales a la fuerza de los campos magnéticos en la superficie del conductor. Si los conductores no tuvieran resistencia, las corrientes RF viajarían sólo en la superficie. En los conductores reales, sin embargo, la corriente se extiende en el conductor, disminuyendo exponencialmente con la profundidad. Esta propiedad se conoce como efecto piel y la distancia desde la superficie hasta donde la corriente ha disminuido a 36.8% de la cantidad de superficie se conoce como la profundidad de la piel a esa frecuencia. Está relacionado con la frecuencia por la fórmula:

$$\delta = 2.60 \left(\frac{1}{f} \right) \sqrt{\rho / \rho_c}$$

δ = Profundidad de la piel (milésimas de pulgada)

ρ / ρ_c = Resistividad del conductor con relación al cobre

f = frecuencia en MHz

En un rango de frecuencia descendente típico de 54 a 750 MHz, la profundidad de la piel en cobre variará de 0,00035 a 0,00009 pulgadas y aumentará a 0,0012 pulgadas a 5 MHz

La resistencia efectiva del conductor es la misma que si se tratara de un tubo de material cuyo grosor es igual a la profundidad de la piel con la corriente

distribuida equitativamente a lo largo de su volumen. La resistencia de este tubo será:

$$R = 0,0996(\sqrt{f}/d)(\sqrt{\rho/\rho_c})$$

R = Resistencia por 100 pies del conductor

ρ/ρ_c = Resistividad del conductor con relación al cobre

f = frecuencia en MHz

2.1.1.3. Longitud de onda

A lo largo de la longitud del cable, en cualquier instante en el tiempo, los campos eléctricos varían sinusoidalmente en fuerza. En algún momento, el conductor central estará en su punto más positivo con respecto al blindaje. Dirigiéndose a lo largo del cable, la tensión disminuirá a cero, se volverá negativa, se moverá a cero y luego volverá a su máximo positivo de nuevo. La distancia entre los puntos máximos de una polaridad se conoce como la longitud de onda en la frecuencia que se transmite y es igual a la distancia que la señal atraviesa durante un período de su frecuencia.

En el espacio libre, las señales viajan a una velocidad de 3×10^8 metros por segundo o, en términos más convenientes, de unos 984 pies por microsegundo. Las señales en el cable, sin embargo, viajan más lentamente debido a la constante dieléctrica más alta del material dieléctrico. La relación entre la velocidad en el cable y la velocidad del espacio libre es la velocidad de propagación relativa, VP, y varía de aproximadamente 0,85 a 0,95 para los tipos de cable comunes. VP está relacionado con la constante dieléctrica:

$$Vp = 1/\sqrt{\epsilon}$$

Por lo tanto, la longitud de onda de una señal en un cable coaxial:

$$\lambda = \frac{984V_p}{f} = \frac{984}{f\sqrt{\epsilon}}$$

λ = Longitud de onda, pies

f = Frecuencia

ϵ = Constante dieléctrica

2.1.2. Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de la utilización del cable coaxial:

Sistema de banda ancha, el coaxial tiene un rango de frecuencia suficiente para soportar los canales múltiples, que permite el rendimiento mucho mayor.

Mayor capacidad de canal: cada uno de los múltiples canales ofrece una capacidad sustancial. En el sistema norteamericano, cada canal del sistema de televisión por cable tiene 6 MHz de ancho, según el estándar del Comité Nacional de Sistemas de Televisión, NTSC. En Europa, con el estándar Phase Alternate Line PAL, los canales son de 8 MHz de ancho. Dentro de uno de estos canales, usted puede aprovisionar el acceso a Internet de alta velocidad. Pero ese canal ahora está siendo compartido por todos los que usan ese coaxial de ese nodo de vecindad, que puede variar de 200 a 2 000 hogares.

Mayor ancho de banda: En comparación con el par trenzado, el coaxial proporciona un mayor ancho de banda en todo el sistema, y también ofrece un mayor ancho de banda para cada canal. Debido a que tiene un mayor ancho de

banda por canal, admite una gama mixta de servicios. La voz, los datos e incluso el vídeo y multimedia pueden beneficiarse de la capacidad mejorada.

Tasas de error más bajas: dado que el conductor interno está en un escudo Faraday, se mejora la inmunidad al ruido y el coaxial tiene tasas de error más bajas y, por lo tanto, un rendimiento ligeramente mejor que el par trenzado. La tasa de error es generalmente de 10⁻⁹.

Mayor espaciado entre amplificadores: el blindaje de cables de Coaxial reduce el ruido y la interferencia, lo que significa que los amplificadores se pueden separar más que con el par trenzado.

Las principales desventajas del coaxial son las siguientes:

Problemas con la arquitectura de implementación: la topología de bus en la que se implementa el coaxial es susceptible a los riesgos de congestión, ruido y seguridad.

Se requiere una actualización bidireccional: en los países que tienen un historial de televisión por cable, los sistemas de cable se diseñaron para la radiodifusión, no para las comunicaciones interactivas. Antes de que puedan ofrecer al suscriptor cualquier forma de servicios bidireccionales, esas redes tienen que ser actualizadas a los sistemas bidireccionales.

Ruido: El trayecto de retorno tiene algunos problemas de ruido, y el equipo final requiere inteligencia adicional para cuidar del control de errores.

Altos costos de instalación: los costos de instalación en el entorno local son altos.

Susceptible a los daños causados por los rayos: el coaxial puede ser dañado por los rayos. Las personas que viven en un área con muchos rayos deben ser cautelosos porque si ese relámpago es conducido por un coaxial, podría freír muy bien el equipo al final de esta.

2.2. Fibra óptica

Las ondas de luz son ondas RF de frecuencia mucho más alta, aproximadamente 300 000 veces la frecuencia más alta utilizada en los sistemas de cable coaxial y 20 000 veces las frecuencias de microondas que a veces se utilizan para transmitir señales de televisión por cable.

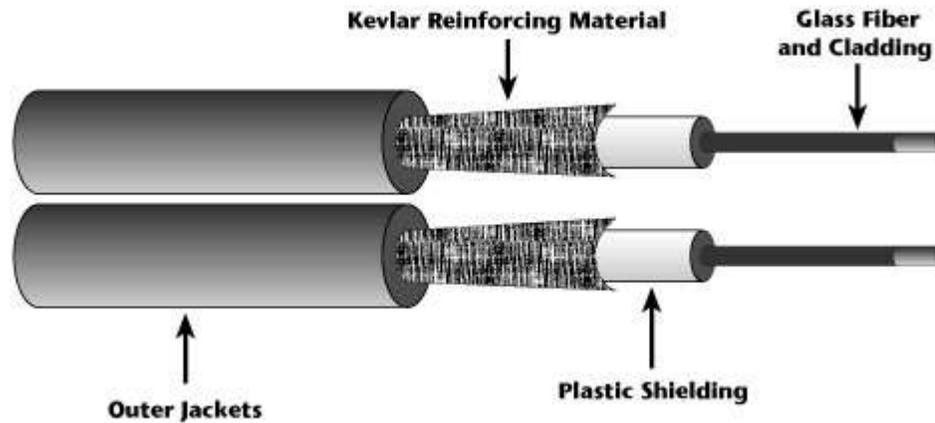
Las longitudes de onda ópticas son muy cortas, por ejemplo, la luz amarilla visible tiene una frecuencia de aproximadamente 5,5 a 1 014 Hz, y por lo tanto una longitud de onda de sólo 0,00000055 m, usualmente expresada como 550 nm, considerablemente menos de 1/10 000 de pulgada.

A estas frecuencias, las ondas electromagnéticas se comportan de maneras que a veces son contraintuitivas. Por un lado, los físicos han entendido durante mucho tiempo que el flujo de energía no es continuo, sino que viaja en paquetes. En el caso de la luz, los portadores de la energía son partículas subatómicas sin masa llamadas fotones que viajan, no es de extrañar, a la velocidad de la luz. La energía transportada por cada fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la señal, por lo que los fotones en frecuencias de luz son mucho más energéticos que los de las frecuencias de radio VHF. Como resultado, la granularidad de la transmisión de potencia VHF es extremadamente fina, mientras que es lo suficientemente gruesa en frecuencias ópticas para agregar ruido mensurable a los enlaces de transmisión óptica.

Existen varios factores que determinan el rendimiento de una implementación de fibras ópticas como el tipo de fibra utilizada, el recubrimiento y el tipo de fuente de luz utilizada. Los cables de fibra óptica están disponibles en muchos tamaños, y pueden llegar a tener de 2 pares de fibras o tener paquetes que tienen más de 400 pares de fibras. En la Figura 25, se muestran los componentes básicos del cable de fibra óptica, cada una de las fibras está protegida con revestimientos, lo que garantiza que la energía que se transfiere a través de la luz permanezca dentro de la fibra en lugar de rebotar y dirigirse hacia el exterior.

El revestimiento está rodeado de blindaje de plástico que asegura que no se pueda doblar la fibra hasta el punto de ruptura, el blindaje de plástico, por lo tanto, limita la cantidad de estrés que se puede poner en una fibra dada. Ese blindaje de plástico se refuerza aún más con material de refuerzo de kevlar, material que es cinco veces más fuerte que el acero, para evitar otras intrusiones. Las chaquetas exteriores que cubren el material de refuerzo de kevlar varían en el tipo y cantidad dependiendo del entorno donde serán desplegadas.

Figura 25. Componentes de la fibra óptica



Fuente: WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: junio de 2020.

En el ámbito de las fuentes de luz, también hay dos categorías: diodos emisores de luz y diodos láser. La categoría más barata y de menor rendimiento son los LED. Los LED son relativamente baratos, tienen una larga vida útil y son bastante tolerantes a las temperaturas extremas. Sin embargo, acoplan sólo alrededor del 3 % de la luz en la fibra, por lo que sus velocidades de datos son bajas, actualmente alrededor de 500 Mbps.

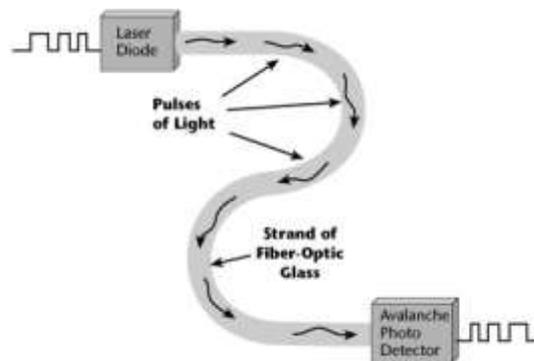
Los diodos láser son capaces de velocidades de transmisión mucho más altas que los LED. Un diodo láser es una fuente de luz pura que proporciona energía coherente con poca distorsión. Por lo tanto, los diodos láser se utilizan comúnmente para la transmisión de larga distancia y alta velocidad. Los diodos láser ofrecen un mejor rendimiento que los LED, y son más caros, aunque el costo de estos componentes ha estado bajando alrededor del 40 % por año. A

medida que los costos caen, el rendimiento también está mejorando; en un futuro muy próximo, deberíamos ver la introducción de fuentes de luz que su pulso un billón de bits por segundo y más allá.

Para transportar el tráfico a largo plazo, la mejor combinación es la fibra monomodo con diodos láser. Para implementaciones muy cortas, como en un entorno de red de campus, las rentabilidades de la fibra multimodo y los LED pueden hacer de esta combinación una solución más adecuada.

Como se muestra en la figura 26, en la transmisión de fibra óptica, el flujo de bits digital entra en la fuente de luz, en este caso un diodo laser, la fuente de luz pulsa la luz en ese intervalo de tiempo, pero si hay un bit cero, no hay pulso de luz o viceversa, dependiendo de cómo se configure. Por lo tanto, la ausencia o presencia de luz representa los discretos y los ceros. La energía lumínica, al igual que otras formas de energía, se atenúa a medida que se mueve a distancia, por lo que tiene que funcionar a través de una amplificación o proceso de repetición.

Figura 26. **Transmisión en fibra óptica**



Fuente: WILSON, Kitty, GOLENIEWSKI, Lillian,

Telecommunications Essentials, The Complete Global Source.

<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>.

Consulta: junio de 2020.

2.2.1. **Características de la fibra óptica**

La utilización de la fibra óptica para las implementaciones de proyectos en proveedores de servicios ha tomado mucha relevancia, debido a los beneficios que aporta la fibra óptica.

2.2.1.1. **Velocidad de propagación y longitud de onda**

Las señales RF se propagan más lentamente a través de cables coaxiales que en un vacío, la relación entre la velocidad de propagación del cable y la del espacio libre es la que se encuentra con la constante dieléctrica relativa. Dado que las ondas de luz son simplemente ondas de radio de mayor frecuencia, esperaríamos que se produjera un fenómeno similar en las líneas de transmisión óptica.

La diferencia es que la constante dieléctrica, a longitudes de onda ópticas, varía con la frecuencia. A frecuencias de RF y por debajo, la constante dieléctrica está dominada por efectos moleculares y atómicos. En frecuencias por encima de las resonancias naturales de las estructuras moleculares, esos factores tienen menos efecto. El resultado es que la constante dieléctrica efectiva depende tanto de la parte inferior como de la longitud de onda.

En lugar de hablar en términos de constante dieléctrica, se utiliza el término índice de refracción. El índice de refracción de un material es numéricamente igual a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica efectiva en la frecuencia óptica que se está considerando.

La velocidad de propagación a través de un material puede expresarse como:

$$v = c/n$$

v = La velocidad de la señal propagada en metros / segundos.

c = La velocidad de la luz en el vacío.

La desaceleración de las ondas de luz a través de los materiales es el resultado de un fenómeno conocido como dispersión. Cuando las señales de luz viajan a través del material, interactúa con los átomos individuales. El modelo de onda de lo que sucede es que los electrones individuales se "excitan" en un estado de energía más alto y luego renuncian a esa energía generando una onda propia.

La energía de la onda transmitida se transfiere temporalmente al material y luego se libera en forma de nuevas ondas en las mismas frecuencias. En el vidrio casi puro de densidad uniforme utilizado para las fibras ópticas, la mayoría de las nuevas ondas se transmiten en la misma dirección que la onda original, pero se

retrasan por el período de tiempo entre la excitación y la reemisión cuando las ondas se retransmiten en diferentes direcciones o con retrasos variables, la energía total transmitida en la onda principal se reduce, como se discutirá más adelante.

Las nuevas ondas se combinan vectormente con la onda original para formar una onda transmitida compuesta que se retrasa ligeramente desde el original. Esta nueva onda entonces interactúa con el material más a lo largo de su camino, añadiendo más retraso. Puesto que este retardo es proporcional a la distancia a la que se transmite la onda a través del material, el resultado es una velocidad de transmisión uniformemente más lenta. El índice de refracción es cómo expresamos la velocidad resultante en relación con la de un vacío.

La longitud de onda de la señal está relacionada con la frecuencia, la velocidad de propagación y el índice de refracción por:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\lambda_o}{n} = \frac{c}{f n}$$

λ_o = Longitud de onda en un vacío

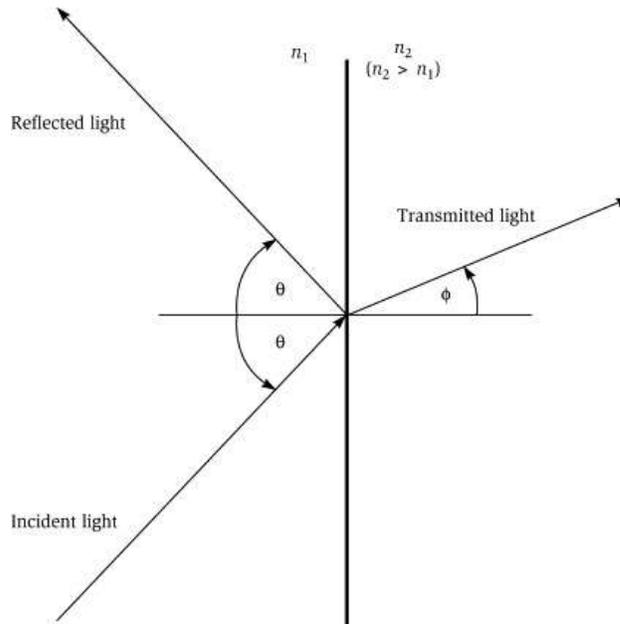
f = Frecuencia en Hz

2.2.1.2. Reflexión y refracción

Cuando la luz golpea una superficie lisa y no regular, sabemos por experiencia común que algunos pueden reflejarse y otros pueden transmitirse al material. También observamos que cuando la luz golpea un pedazo de vidrio o una superficie de agua quieta en un ángulo muy bajo, casi todo se refleja, y el material se asemeja a un espejo. En ángulos mayores, sólo se refleja una pequeña porción, y el material aparece transparente. Estos efectos se deben a la diferencia en el índice de refracción entre el vidrio y el aire.

Específicamente, si dibujamos un diagrama general como se muestra en la figura 27, se observa que la luz se propaga desde un material a la izquierda con el índice de refracción n_1 y golpea una interfaz plana y perfectamente lisa con el material a la derecha, índice de refracción n_2 en un ángulo de lo normal, podemos expresar las ecuaciones que rigen las ondas reflejadas y transmitidas de la siguiente manera.

Figura 27. **Reflexión de luz y transmisión entre interfaces**



Fuente: LAGER, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>

Consulta: junio de 2020.

La onda transmitida dejara la interfaz en un ángulo ϕ en relación con la normal de tal manera que se define con la siguiente expresión:

$$\frac{\sin\theta}{\sin\phi} = \frac{n_2}{n_1}$$

Por lo tanto, si $n_2 > n_1$, la onda transmitida estará más cerca de la normal en relación con el plano de la interfaz, mientras que si $n_2 < n_1$ será más paralelo a la interfaz, a esta relación se le conoce como ley de Snell.

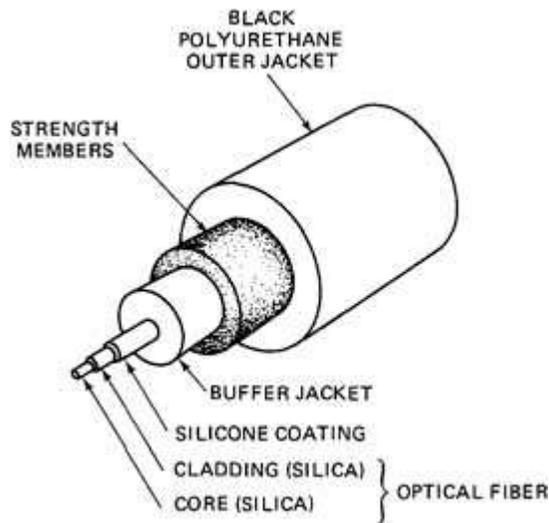
En particular, si $\sin\theta > n_2/n_1$ no hay onda transmitida, y toda la energía se refleja, este efecto ocurre estrictamente solo si el material n_2 es grueso. Esta es una condición crucial para algunos tipos de transmisión de fibra, puesto que el valor de la función seno no puede exceder el valor de 1, la reflexión total solo es posible cuando $n_1 > n_2$. La onda reflejada dejara la superficie en un ángulo exactamente opuesto a la onda incidente, es decir, en un ángulo de la normalidad.

2.2.1.3. Dimensiones

Las fibras ópticas se hacen típicamente en longitudes de hasta 10 km sin empalmes. El diámetro del núcleo y el revestimiento determina muchas de las propiedades ópticas de la fibra. El diámetro también determina algunas de las características físicas. La fibra debe ser lo suficientemente grande como para permitir el empalme o la fijación de los conectores. Por el contrario, si es demasiado grande, será demasiado rígido para doblarse y utilizar demasiado material

Una fibra óptica es muy pequeña, comparable en tamaño con el cabello humano. Su diámetro recubierto se encuentra típicamente entre 250 y 500 μ m. Compare esto con el cable de cobre de grado de comunicaciones, que normalmente tiene un diámetro exterior de 320 a 1 200 μ m.

Figura 28. **Construcción de la fibra óptica**



Fuente: J. HOSS, Robert, A. LACY, Edward. *Fiber Optics*.

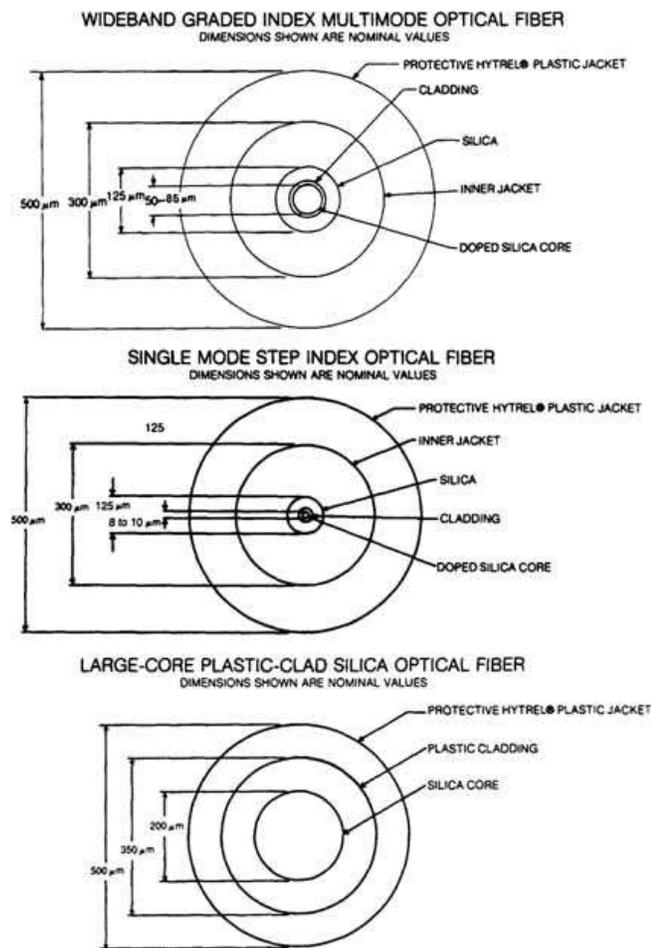
<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>

Consulta: Julio de 2020.

Los diámetros de los núcleos oscilan entre 8 y 10 μm para la fibra monomodo y de 50 a 100 μm para el modo múltiple. Los diámetros exteriores de la fibra de vidrio se mantienen típicamente a 125 μm , aunque se utilizan 140 μm para las fibras de núcleo de 100 μm . Como ilustra la figura 28, el núcleo está rodeado por una capa de vidrio de revestimiento. Tiene un índice de refracción que es menor que el del núcleo para formar una guía de onda óptica. Para mantener la mayor parte de la energía lumínica dentro del núcleo, el revestimiento debe tener un espesor mínimo de una o dos longitudes de onda de la luz transmitida. El vidrio restante fuera del revestimiento es para protección y para formar un tamaño de fibra estándar para la unión. El recubrimiento exterior es un material plástico añadido para proteger el vidrio de la abrasión de la superficie. Por lo general, tiene un diámetro de 250 μm para fibras recubiertas individuales a 500 μm para fibras con

un segundo tampón exterior, más resistente a la abrasión. Las dimensiones típicas de la fibra se indican en la figura 29.

Figura 29. Dimensiones típicas de la fibra óptica



Fuente: J. HOSS, Robert y A. LACY, Edward. *Fiber Optics*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>

Consulta: julio de 2020.

Las tolerancias dimensionales de fibra deben mantenerse muy firmemente para que las fibras se puedan unir, empalmar y conectar con una pérdida

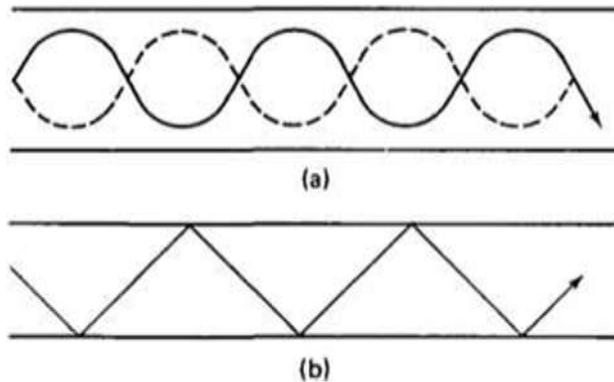
mínima. Las tolerancias para las dimensiones exteriores de la fibra, y para los diámetros de núcleo multimodo, se mantienen dentro de los 3 μ m. La concentricidad y la no circularidad del núcleo se mantienen dentro del 6 %.

2.2.1.4. Propagación de la luz

Una fibra óptica se produce formando capas concéntricas de vidrio de revestimiento alrededor de una región central. La región central mantiene las propiedades de baja pérdida óptica necesarias para la propagación de la energía óptica. Cuanto mayor sea el índice de refracción, más lenta será la energía óptica. Cuando un núcleo de vidrio de alto índice de refracción está rodeado por el material de revestimiento de índice inferior, la energía de la luz se encuentra dentro del núcleo de índice superior debido a la reflexión en la interfaz de los dos materiales. Además, si el índice de refracción del núcleo es variado, más alto en el centro e inferior hacia el exterior, entonces la luz se refractará para permanecer dentro del núcleo.

Las fibras ópticas guían la luz por reflexión o refracción, dependiendo del tipo de fibra que se utilice. En los tipos reflectantes, los rayos de luz viajan en zigzag como se muestra en la figura 30. En los tipos de refracción, los rayos de luz viajan en una curva continua, en cualquier caso, los rayos de luz se limitan al núcleo.

Figura 30. **a) Confinamiento refractivo b) Confinamiento reflexivo**



Fuente: J. HOSS, Robert y A. LACY, Edward. *Fiber Optics*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>

Consulta: julio de 2020.

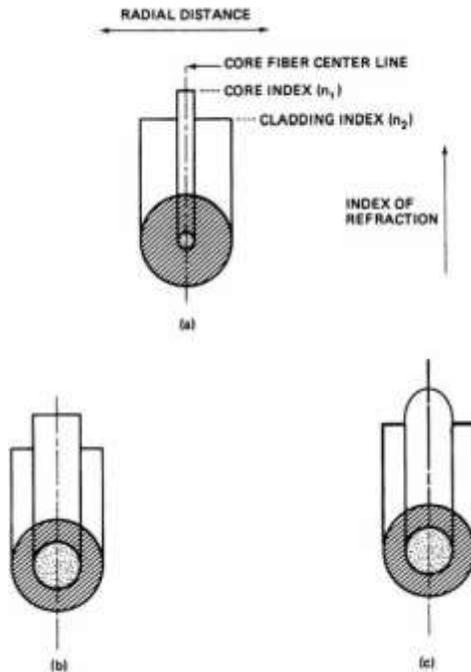
El modo es un concepto matemático y físico complejo que describe la propagación de ondas electromagnéticas, el modo es simplemente los diversos caminos que la luz puede tomar en una fibra. Por monomodo queremos decir que sólo hay un camino para la luz; multimodo significa varias rutas. Para explicar el índice de pasos, hay que recordar que los materiales transparentes tienen un índice de refracción. Este parámetro óptico se designa n y se puede calcular desde la ecuación: $n = c/v$

En esta ecuación, c es la velocidad de la luz en un vacío y v es la velocidad de la luz en el material. De esta ecuación vemos que un índice más alto corresponde a una velocidad de luz más lenta en el material. Por lo tanto, la luz que viaja en un material con n a 1,48 viajará más lento que en un material con n a 1,47.

En las fibras ópticas, el índice de refracción del núcleo es mayor que el índice del revestimiento n_2 . Es decir, $n_1 > n_2$.

En una fibra de índice de paso, el índice de refracción es constante en todo el núcleo. Como se muestra en la figura 31. a) y b), el índice del núcleo está representado por una línea plana, paralela al horizonte. Observe en este perfil el cambio abrupto entre el índice del núcleo y el índice del revestimiento. Este cambio abrupto da a estas fibras el nombre de índice de paso.

Figura 31. a) Índice de paso - monomodo y b) Índice de paso - multimodo



Fuente: J. HOSS, Robert y A. LACY, Edward. *Fiber Optics*.

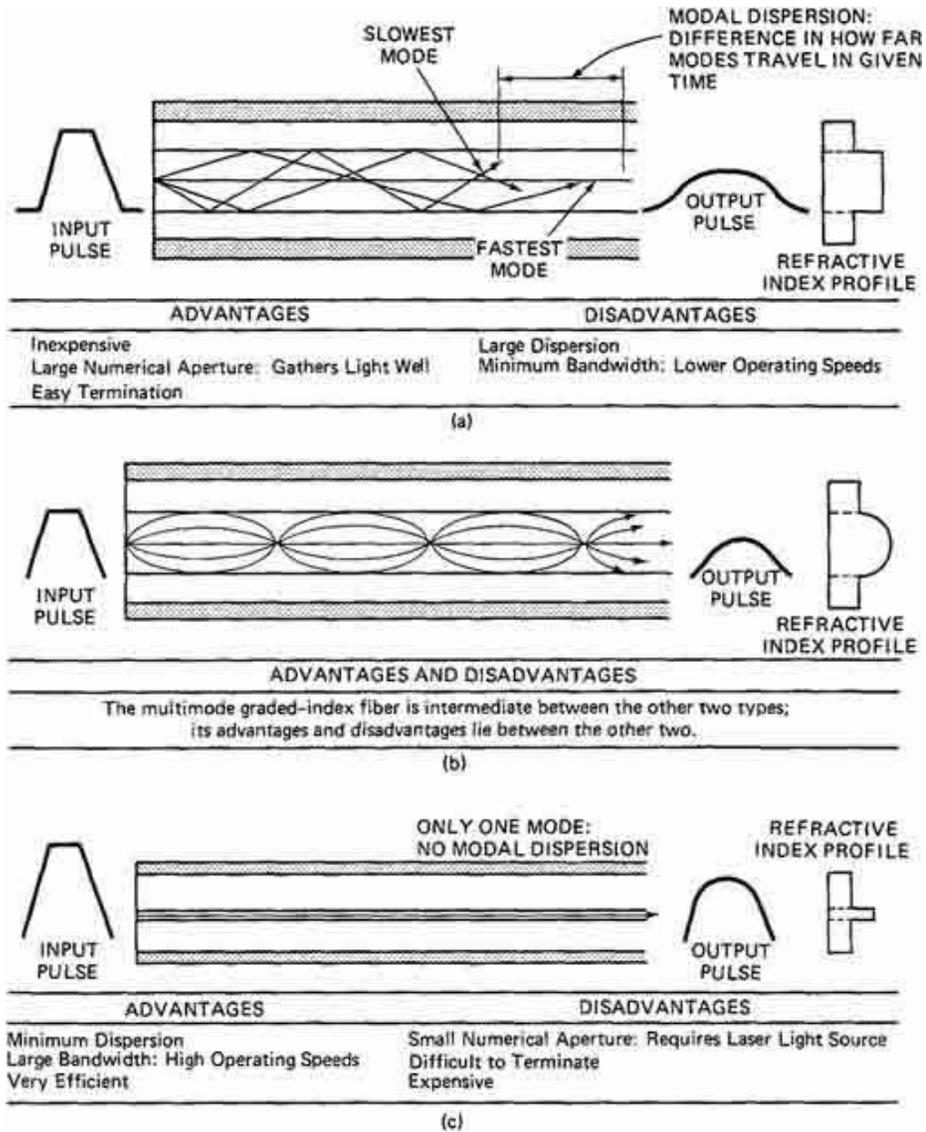
<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>

Consulta: julio de 2020.

En una fibra de índice calificado, el índice de refracción no es el mismo en toda la fibra. Es más alto en el centro del núcleo, pero disminuye o se estrecha radialmente hacia el borde exterior, como se muestra en la figura 31 c).

En la fibra de índice escalonado de monomodo, el núcleo es tan pequeño que permite que un solo rayo viaje por la fibra. Este rayo en efecto viaja por el eje de la fibra como se muestra en la figura 32 c).

Figura 32. Tipos de propagación de la luz en las fibras.



Fuente: J. HOSS, Rober y A. LACY, Edward. *Fiber Optics*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>

Consulta: julio de 2020.

2.2.2. Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de la fibra óptica:

Ancho de banda extremadamente alto. La fibra ofrece mucho más ancho de banda que cualquier otro medio basado en cable.

Capacidad de transporte de tráfico elástico. Sin tener que cambiar la fibra, suponiendo que sea la generación correcta de fibra, puede agregar equipos que proporcionen capacidad adicional sobre la fibra original solo. Esto, junto con la capacidad de DWDM para activar y desactivar varias longitudes de onda a voluntad, permite el aprovisionamiento dinámico del ancho de banda de la red para acomodar las fluctuaciones en el tráfico.

No es susceptible a impedimentos electromagnéticos o interferencias. Debido a que la fibra no es susceptible a impedimentos electromagnéticos o interferencias, tiene una tasa de error de bits muy baja, 10⁻¹³, lo que significa que las transmisiones de fibra óptica están prácticamente libres de ruido.

Transmisión segura y detección temprana. Al monitorear constantemente una red óptica y medir el tiempo de reflexión de la luz, puede detectar empalmes en el cable.

Bajo en peso y masa. Debido a que la fibra es baja en peso y masa, se necesita mucha menos potencia de instalación humana que con los paquetes de cable de cobre tradicionales o coaxiales.

Las principales desventajas de la fibra óptica:

Altos costos de instalación. La instalación de fibra sigue siendo relativamente costosa, aunque el costo ha estado bajando alrededor de 60% por año, dependiendo de los componentes. A medida que el costo sigue cayendo y el rendimiento aumenta, la fibra finalmente se está moviendo fuera de su aplicación principal en el reino de la columna vertebral portadora y en el bucle local, apoyando el acceso de banda ancha del suscriptor vía técnicas tales como FTTx y PONs.

Se requiere equipo de prueba especial, se necesita un OTDR, y cuando entra en redes ópticas más sofisticadas, necesita sondas ópticas altamente especializadas que pueden ser bastante costosas, y necesita una en cada ubicación.

Vulnerabilidad al daño físico. La fibra es un medio pequeño, por lo que se puede cortar o dañar de otra manera muy fácilmente durante las actividades de construcción.

3. SERVICIOS DE TELEVISIÓN

3.1. Televisión análoga

Una de las tecnologías más exitosas de nuestro tiempo se basa en el estándar creado por el Comité Nacional de Sistemas de Televisión, NTSC. Comenzando con tubos de vacío y progresando a circuitos integrados, la televisión analógica ha sobrevivido y prosperado en nuestra época actual. Aunque gran parte de los consumidores de los servicios de TV se centra en la televisión digital, es razonable suponer que la televisión analógica estará con nosotros durante muchos años más. Incluso después de que los receptores digitales penetren significativamente en los hogares, servirán a la sala de observación principal, mientras que los receptores analógicos más antiguos se encontrarán en el resto de la residencia.

La tecnología de la televisión analógica es la base de la industria del cable. La comprensión de la televisión analógica es importante para conocer el desarrollo y avances que han promovido en la última década. Comprender la señal de televisión es un requisito básico para diseñar sistemas para entregarla a los suscriptores.

Es un sistema analógico, en el que la imagen se transmite a través de la modulación de banda vestigial de la portadora visual y el sonido se modula en frecuencia en un portador separado. En la década de los 50, el NTSC amplió el sistema para incluir información de color mediante el aumento de la utilización del espectro de 6 MHz ocupado por el canal de televisión, al tiempo que permite el uso continuo de esencialmente todos los receptores más antiguos con poca

degradación del rendimiento. En 1976, la FCC reservó la línea 21 para el sistema de subtítulos, y en 1983 se autorizó un servicio de teletexto. En la década de los 80, el sistema NTSC se amplió de nuevo de nuevo para incluir sonido estéreo.

El sistema de televisión NTSC se denomina analógico porque las señales que representan la imagen y la información sonora pueden tomar cualquier valor entre los límites mínimo y máximo. En particular, la intensidad de la señal visual está inversamente relacionada con el brillo de la imagen, con partes negras de la imagen que tienen la potencia más transmitida.

Esta modulación negativa de la información de vídeo se encontró para reducir el impacto del ruido blanco gaussiano en la imagen mostrada. Los pulsos periódicos se incluyen en potencias superiores a las utilizadas para representar áreas negras en la imagen. Estos pulsos proporcionan la información de sincronización necesaria para sincronizar el transmisor y el receptor, lo que permite que la imagen se pinte correctamente en la pantalla.

3.1.1. Televisión a color

La televisión analógica moderna difiere del sistema original en sólo tres aspectos: la adición de color, sonido estéreo y señales auxiliares. Todo esto se ha logrado sin hacer que los productos anteriores sean obsoletos. Si el primer receptor de televisión comercial estuviera operativo y alimentado hoy en día, seguiría recibiendo y mostrando programación de televisión. La compatibilidad es un término ambiguo, y los receptores más antiguos experimentan un rendimiento ligeramente reducido. Estos compromisos son la prueba del costo-beneficio y han proporcionado al público un beneficio positivo neto.

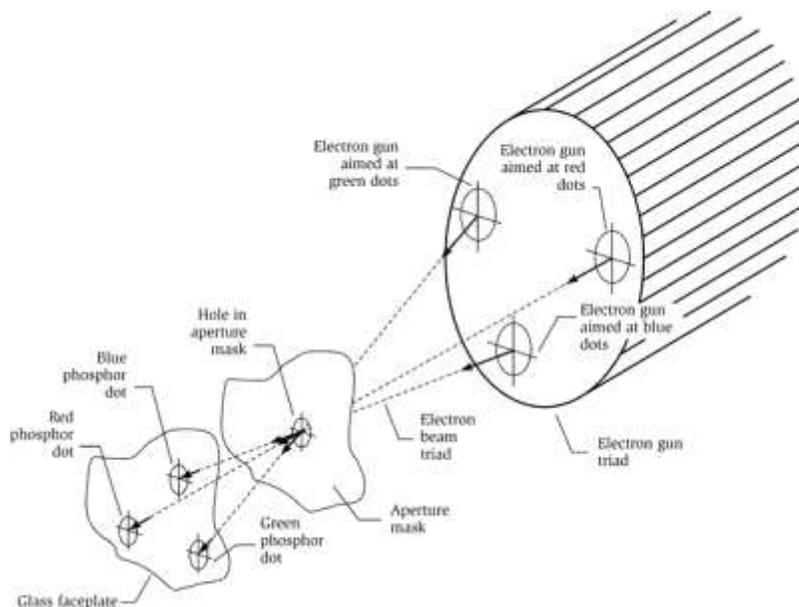
El color es la adición más significativa al NTSC, un gran número de compensaciones fueron necesarias en el sistema NTSC original para hacerlo práctico y asequible, pero aún más se requirió para añadir color. El sistema de color ajusta cuidadosamente su diseño con el sistema visual humano para minimizar la velocidad de información incremental requerida.

El descubrimiento más importante es que el sistema visual humano responde al color de dos maneras distintas: 1) como respuesta a la frecuencia, o longitud de onda de la luz, y 2) como respuesta a combinaciones de colores primarios. Si pasamos la luz del sol a través de un prisma de vidrio, descomponemos la luz en longitudes de onda individuales que vemos como muchos colores separados. Si esta fuera la única manera en que el ojo percibe el color, un sistema de televisión en color, o incluso la impresión en color y la fotografía, sería casi imposible. Afortunadamente, el ojo humano, en respuesta a varias proporciones de rojo, verde y azul, percibe casi todos los colores posibles.

En el receptor de color, el tubo de imagen es en realidad tres tubos de imagen en uno. Hay tres pistolas de electrones y tres conjuntos de elementos de fósforo de color en la pantalla. Una máscara de sombra en el tubo se alinea cuidadosamente para permitir que sólo los electrones de un arma en particular golpeen los fósforos de su color asignado. La máscara de sombra también se denomina máscara de apertura debido a su matriz de agujeros o aberturas, figura 33. Las tres pistolas de electrones están inclinadas en un ángulo con respecto al eje del tubo de imagen. Los tres haces de electrones pasan a través de los mismos agujeros en la máscara de sombra, que se encuentra muy cerca de la pantalla. Debido a que apuntan desde diferentes ángulos en el cuello del tubo, las vigas aterrizan en puntos adyacentes pero diferentes. Las manchas tienen fósforos que emiten luz roja, verde y azul. Las manchas son pequeñas y

cercanas, y el ojo los fusiona en un color continuo a partir de las distancias de visualización normales.

Figura 33. Estructura de tubo para imagen de color



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

Consulta: julio de 2020.

Si se necesita una combinación de tres imágenes completas en rojo, verde y azul para hacer una imagen en color, el ancho de banda de transmisión requerido se triplicaría. Incluso el color de mejora trae podría no valer la pena que drástica una pérdida de capacidad de canal. Afortunadamente, el ojo está muy contento con un sistema de televisión coloreado y no requiere un verdadero sistema de color. Si consideramos los cómics a color, nos damos cuenta de que tenemos una imagen detallada en blanco y negro con algo de color, El ojo y la

imaginación nos ayudan a completar la imagen, en la televisión de color, se adopta el mismo enfoque.

El detalle está en la señal de luminancia. La señal de color contiene una resolución mucho más baja y sólo rellena aproximadamente los contornos monocromos. Que este es el caso se puede ver cuando el texto de color está en la imagen.

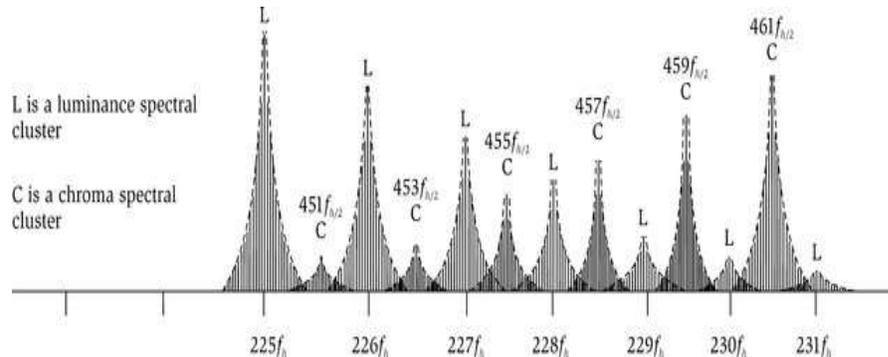
Para hacer que la señal de color sea compatible con receptores monocromos más antiguos, era necesario combinar las señales de una manera que arrojara la señal de luminancia más dos señales de diferencia de color de ancho de banda más estrecho. Dado que el ojo es más sensible al detalle en ciertos colores que en otros, es posible reducir el ancho de banda de algunos de los colores de forma más agresiva. El sistema de televisión a color manipula las señales de color utilizando un conjunto de ecuaciones de matriz lineal. Esto separa la señal en un componente que contiene tonos de carne y tonos de carne cercanos y otro componente que tiene colores muy diferentes. La señal de color principal, la que se denomina señal I, tiene un ancho de banda transmitido de alrededor de 1,5 MHz. La señal de color secundaria, la que se denomina señal Q, tiene un ancho de banda transmitido de alrededor de 0,5 MHz. En un receptor de color, las redes lineales pueden separar las señales en los tres colores primarios, rojo, verde y azul. Simultáneamente, un receptor monocromo responderá sólo a la señal de luminancia e ignorará las señales de color.

Aunque el sistema NTSC utiliza anchos de banda de 1,5 MHz en el canal I y 0,5 MHz en el canal Q, los receptores de color prácticos implementan realmente un ancho de banda de solo unos 0,5 MHz en cada canal. Esto se compara con varios mega-hercios para la señal de luminancia. La razón principal de la reducción del ancho de banda es el problema del ruido de croma. Cuando las

señales de croma de mayor frecuencia se demodulan sincrónicamente en un proceso de conversión de frecuencia, el ruido añadido en esas frecuencias también se reduce en frecuencia. Esto hace que la interferencia resultante del ruido aumente de tamaño en la pantalla. La reducción del ancho de banda de croma minimiza este efecto desagradable, pero con una reducción en la resolución del color.

Incluso con sólo 1,5 MHz de señal I y 0,5 de señal Q, todavía tenemos que encontrar un lugar para poner 2,0 MHz de información adicional. El principio de compatibilidad impide simplemente añadir más ancho de banda, la Figura 34 muestra que la energía de la señal está agrupada alrededor de múltiplos de la frecuencia de escaneo horizontal, con brechas espectrales significativas. Dado que esto es una consecuencia del escaneo y la información de color también es un producto del escaneo, también tiene huecos espectrales. El truco entonces es organizar los dos espectros de tal manera que los cúmulos de energía se entrelazan. La figura 34 muestra que, si la señal de color se modula en un portador que es un armónico impar de la mitad de la frecuencia de línea, el espectro de la señal de color se entrelazará con el espectro de señal monocroma. La señal de color ocupa frecuencias que están casi vacías en una señal monocroma.

Figura 34. **Energía espectral de luminancia**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

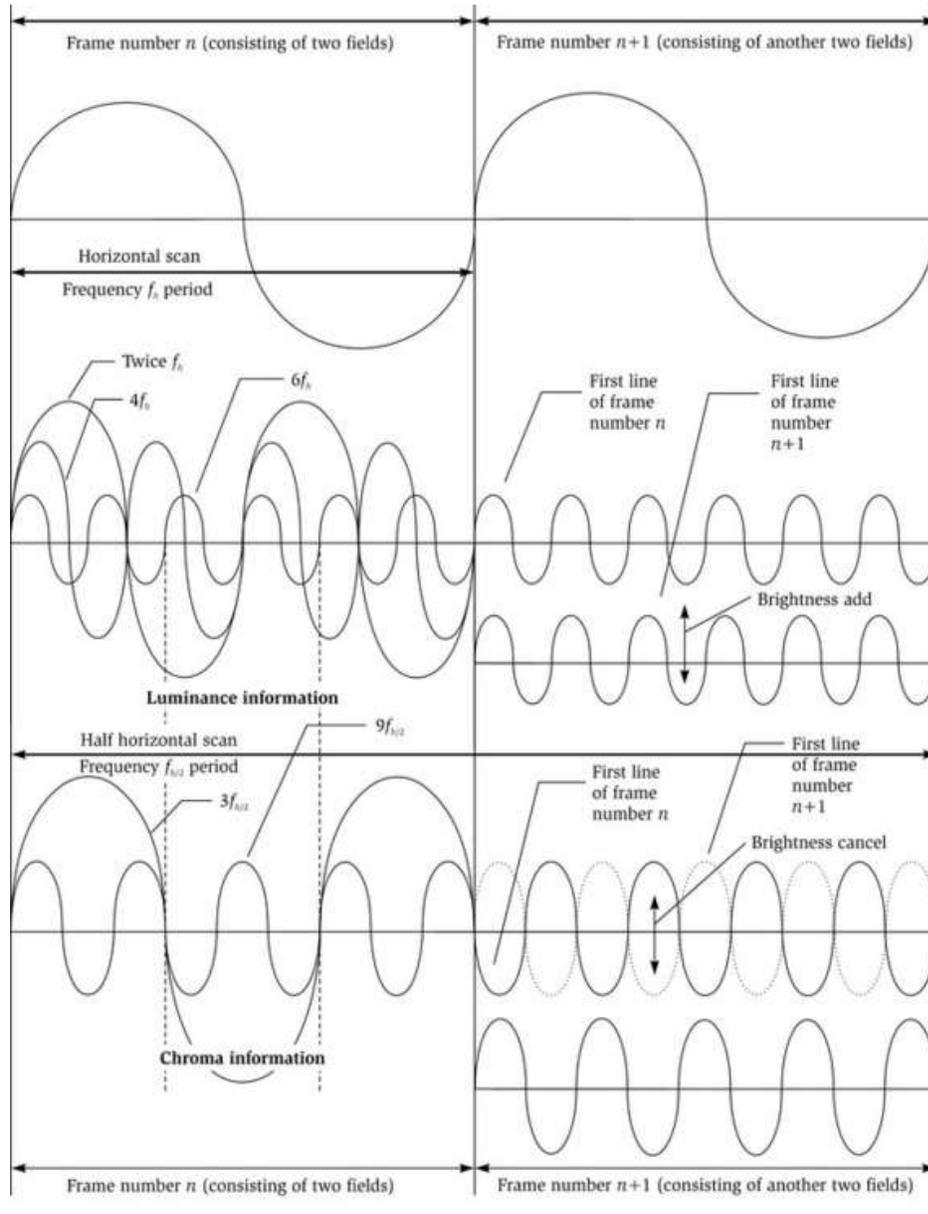
Consulta: julio de 2020.

La energía espectral de luminancia se agrupa alrededor de los armónicos de la frecuencia de escaneo horizontal f_h hasta el borde superior de la banda. Los componentes de energía de espectros de croma se agrupan alrededor de múltiplos impares de la frecuencia de escaneo medio horizontal y se entrelazan con luminancia.

Esta técnica para ocultar la señal de croma en la luma también se puede visualizar en el dominio del tiempo, figura 35, una onda de coseno que es un armónico comenzará con la fase opuesta en las líneas adyacentes. En el caso básico, el primer armónico de la mitad de la frecuencia de línea hará sólo la mitad de una onda de coseno en el tiempo de un escaneo horizontal. Comenzará la siguiente línea con la fase opuesta. Así que donde la señal es más brillante en una línea, será más atenuada en la línea adyacente, y viceversa. Estos brillos opuestos en las líneas adyacentes tenderán a promediar hacia fuera y reducir la visibilidad de la portadora de color. Lo mismo ocurre en los armónicos impares más altos. En la frecuencia de la subportadora de color, las manchas brillantes y

oscuras en la pantalla son muy pequeñas y se colocan en líneas adyacentes relativas entre sí con el fin de promediar el brillo que causan.

Figura 35. Vista en dominio de tiempo



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

Consulta: julio de 2020.

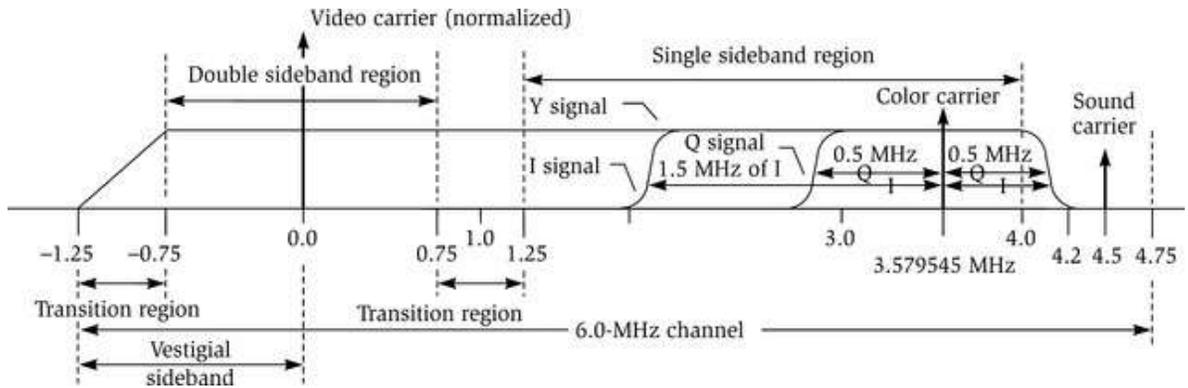
Las dos señales de color, I y Q, se modulan en cuadratura entre sí en la modulación de subportadora de color. La modulación de cuadratura significa que se utilizan dos portadoras de la misma frecuencia, una fase desplazada por 90 grados de la otra. La señal de color se puede expresar como:

$$c(t) = I(t) * \text{Cos}(2\pi f_c t) + Q(t) * \sin(2\pi f_c t)$$

La función seno es una fase de 90 grados desplazada de la función coseno. El proceso de detección requerido se llama detección en cuadratura. En el receptor, la detección en cuadratura separa limpiamente las dos señales.

La señal I es la señal de color en fase y se modula la amplitud en una subportadora de color que se encuentra en 3,5 MHz, el 455 o múltiplo impar de la mitad de la frecuencia de escaneo de línea. La señal Q es la señal de color de cuadratura. Es amplitud modulada en una portadora que se deriva de un desplazamiento de fase de 90º de la subportadora de color. Tenga en cuenta que la señal Q es una señal de doble banda lateral, mientras que la señal I tiene un componente de doble banda lateral de 0,5 MHz y 1,0 MHz adicionales de modulación de banda lateral única. Sin embargo, como ya se ha mencionado, los receptores de consumo prácticos limitan el ancho de banda en ambos canales a alrededor de 0,5 MHz.

Figura 36. **Ubicación y ancho de banda de las señales**



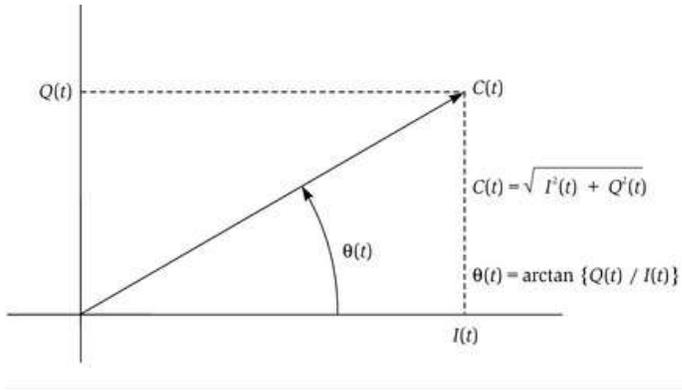
Fuente: LARGE David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

Consulta: julio de 2020.

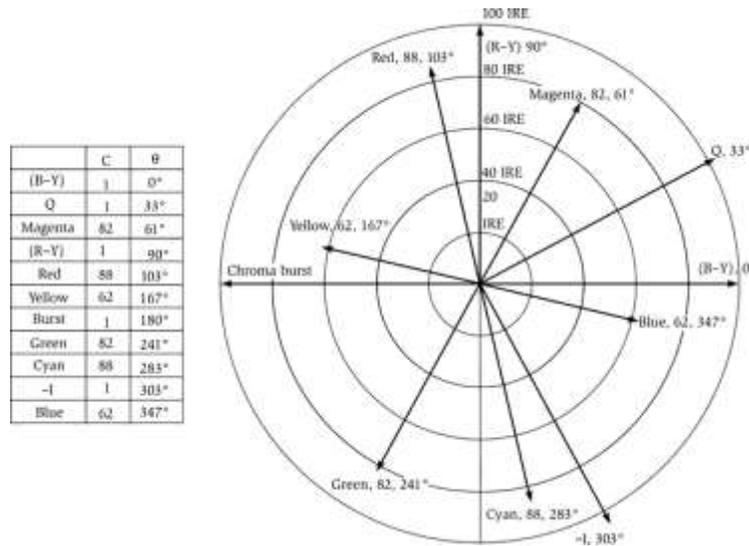
El diagrama de la figura 37 aplica el sistema polar de coordenadas para su representación, a la ecuación de color de cuadratura. La señal de color $C(t)$ se puede dar ya sea como la suma de la señal $I(t)$ y la señal $Q(t)$ o como la magnitud resultante $C(t)$, que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de $I(t)$ y $Q(t)$ en un ángulo dado por la tangente inversa de la relación de $Q(t)$ a $I(t)$. En esta forma polar de interpretar la señal de color, el color, o tono, se define por el ángulo, y la intensidad del color se describe por la longitud $C(t)$. La Figura 38 muestra la ubicación de varios colores en un gráfico polar.

Figura 37. **Representación polar**



Fuente: LARGE David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>
 Consulta: julio de 2020.

Figura 38. **Colores de la televisión en representación polar**



Fuente: LARGE David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>
 Consulta: julio de 2020.

3.1.2. Sonido estéreo

La siguiente mejora a NTSC llegó en el área de sonido. El sonido de televisión es frecuencia modulada en una portadora separada que es un fijo de 4,5 MHz por encima de la portadora visual. Cuando se añadió sonido estéreo al sistema de televisión, se volvió a aplicar el requisito de compatibilidad. Esto evitó el caos que habría resultado de hacer obsoleto el sistema de sonido existente. Al igual que con el color compatible, hubo compromisos con los receptores monoaurales cuando se añadió sonido estéreo. Pero el beneficio neto para los consumidores se consideró positivo. El mercado dio su aprobación tanto al color compatible como al sonido estéreo compatible.

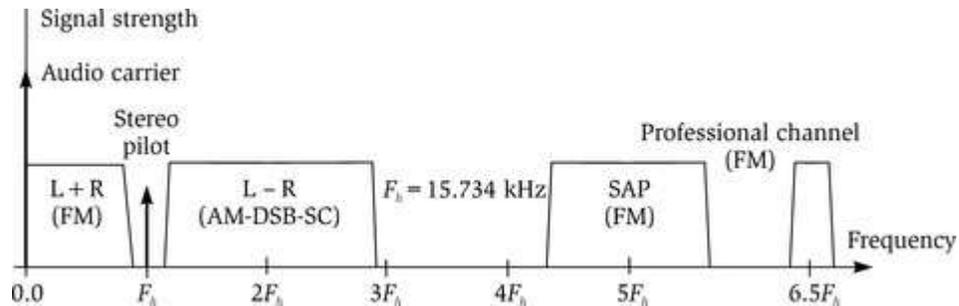
El sonido estéreo se implementa creando primero un espectro que incluye la suma de los canales de sonido izquierdo y derecho en la banda base. Al igual que en la radiodifusión de radio FM y la práctica de televisión monofónica, la señal de suma se enfatiza utilizando una curva a 75 microsegundos. La diferencia entre los canales izquierdo y derecho es la portadora suprimida de doble banda lateral modulada en una portadora al doble de la frecuencia de escaneo horizontal. Para mejorar la relación señal-ruido, esta señal de diferencia se compone; es decir, la señal se comprime en amplitud en el punto de transmisión y se expande en el receptor. La compresión es selectiva de frecuencia y se basa en un algoritmo propuesto originalmente por dBx Corporation, cuyo nombre lleva.

Esto contrasta con el sistema estéreo de radio FM, que no está acompañado, sino que emplea la misma desviación de la portadora de sonido, tanto por la suma como por los portadores de diferencia. Ambos cambios en el sistema de televisión se lograron por la necesidad de mejorar la relación señal-ruido.

Un canal de programa de audio, SAP monoaural de ancho de banda limitado a 10 kHz se modula la frecuencia en una portadora a cinco veces la frecuencia de escaneo horizontal. El canal SAP está destinado a un segundo idioma u otros fines de este tipo. Un canal profesional de ancho de banda muy estrecho a 3,4 kHz se modula la frecuencia en una portadora a seis veces y media la frecuencia de escaneo horizontal. Se utiliza para intercomunicaciones de plantas de televisión. Este espectro complejo entero se modula entonces la frecuencia sobre la portadora de 4,5 MHz. La relación entre el video y los portadores auditivos está estrechamente controlada, ya que casi todos los receptores de televisión dependen de esta relación.

El portador visual se utiliza como el oscilador local para llevar el espectro auditivo a la banda base. Esta técnica se denomina método de sonido inter portador del diseño del receptor de TV. Dado que el proceso de modulación auditiva final es el de la modulación de frecuencia, el receptor de TV utiliza un circuito limitador para quitar cualquier modulación de amplitud que pueda haber quedado impresionado en la señal auditiva. Las fuentes típicas de esta modulación de amplitud son el ruido, particularmente el ruido de impulso, y la modulación cruzada en los elementos no lineales en la trayectoria de la señal. El sistema auditivo del receptor de TV se vuelve relativamente insensible a la modulación de amplitud en el portador auditivo.

Figura 39. Espectro del ancho de banda para el sonido estéreo



Fuente: LARGE David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

Consulta: julio de 2020.

3.2. Televisión digital

Durante estas épocas de renovación tecnológica la industria del cable se ha transformado para adoptar la tecnología digital. En la década de los 90 la industria del cable estaba iniciando un programa de actualización híbrido de fibra coaxial HFC para ampliar la capacidad del canal a más de 100 canales analógicos.

La compresión digital se aplicó por primera vez a imágenes en movimiento en aplicaciones de videoconferencia. Desde allí, el interés en su aplicación a las señales de televisión comenzó con los primeros sistemas de satélites. Sin embargo, la iniciativa esencial puede haber sido proporcionado por la televisión de alta definición HDTV. Una señal de HDTV contiene aproximadamente seis veces más información que una señal de televisión de definición estándar SDTV y consume al menos 12 MHz de espectro en formato analógico. Este hecho hace que la compresión digital sea una necesidad para HDTV. Una vez que se había realizado la inversión para comprimir digitalmente una señal HDTV, la misma tecnología se aplicó naturalmente a SDTV. La primera aplicación fue en sistemas

de satélite de transmisión directa DBS: la compresión digital era perfecta para un nuevo sistema que estaba limitado por una capacidad de transpondedor satelital costosa y limitada. La transmisión digital también redujo la relación señal-ruido requerida, lo que permite una antena parabólica más pequeña para los servicios domiciliarios.

Con la compresión digital, los sistemas DBS podían ofrecer suficientes canales para representar una amenaza competitiva para los sistemas de cable, especialmente aquellos que no habían realizado una actualización de HFC. La gama de programación continuó expandiéndose, y de repente incluso 100 canales analógicos no fueron suficientes para llevarlos todos.

Además, la industria dbS comenzó a comercializar activamente su calidad de imagen digital y sonido. Como resultado, la industria del cable centró su atención en lo digital. El nuevo nivel digital permitió que el cable elevara sus ingresos por suscriptor mediante la adición de nuevo contenido de suscripción premium, y el pay-multiplex.

Las trampas y las luchas analógicas son relativamente fáciles de eludir, y el robo de señales se ha convertido en un problema importante en los sistemas analógicos. La tecnología digital permite un mecanismo de acceso condicional más seguro basado en la criptografía de las señales transmitidas.

3.2.1. Transmisión de televisión digital

El sistema de televisión NTSC se tenía el pensamiento que la electrónica era costosa y el procesamiento de señales era difícil y limitado, en esas épocas no se encontraban desarrollados programas o áreas para explotar eficientemente el espectro de radiodifusión, la prioridad era la rápida penetración del mercado y la generación de demanda de programación y receptores.

La situación es ahora todo lo contrario. El recurso escaso es el espectro. La electrónica y el procesamiento electrónico son asequibles para las industrias y en un camino predecible de reducción adicional de costos. El objetivo ahora es crear sistemas que utilicen eficientemente el espectro y que duren varias décadas sin quedar expuestamente obsoletos. El primer paso es evaluar las redundancias en las imágenes de televisión que se pueden eliminar para aligerar la carga del espectro.

El interés por la televisión digital se remonta a varias décadas, mucho antes de que la televisión digital fuera práctica para el uso del consumidor, tenía interés para aplicaciones militares y profesionales. Las señales digitales tienen algunas ventajas importantes:

- La capacidad de transmitir señales a distancias arbitrariamente largas utilizando repetidores si es necesario.
- La capacidad de almacenar las señales sin degradación.
- La capacidad de procesar señales para seguridad y otros propósitos.
- La capacidad de eliminar la redundancia innecesaria para aumentar la eficiencia de la transmisión y el almacenamiento.

- La capacidad de agregar codificación y redundancia apropiadas para que las señales puedan sobrevivir a entornos de transmisión complicados.

3.2.1.1. Televisión de alta definición

El gran impulso para la televisión digital de consumo llegó como consecuencia de la búsqueda de un sistema práctico de televisión de alta definición HDTV, se definió como tener el doble de resolución horizontal, el doble de la resolución vertical, una imagen amplia con una relación de 16 unidades de ancho por cada 9 unidades de altura, sin artefactos visibles a distancias de visualización razonables y sonido compacto con calidad de disco.

Antes de cualquier procesamiento, la señal analógica procedente de una cámara HDTV podía consistir en 30 MHz de información roja, 30 MHz de información verde y 30 MHz de información azul. Casi 100 MHz de información analógica está involucrado. Para convertirlo a forma digital, primero se muestrea al doble de la frecuencia más alta según el teorema de Nyquist. El desarrollo en HDTV comenzó en Japón en 1970 utilizando tecnología de transmisión analógica junto con un procesamiento digital significativo tanto en el punto de origen como en el receptor. La propuesta japonesa se llamó codificación de muestreo sub-Nyquist. Aplicó muchas de las técnicas utilizadas para minimizar el ancho de banda NTSC. El objetivo era hacer coincidir el sistema HDTV con la respuesta visual humana, ya que no hay necesidad de transmitir lo que el ojo humano no logra ver.

Cuando la FCC continuó con el desarrollo de la HDTV en los Estados Unidos, estableció una serie de desafíos, El primer desafío fue un sistema de

HDTV compatible que no haría obsoletos los receptores NTSC actuales. El segundo gran desafío fue limitar las señales NTSC originales y las nuevas señales de HDTV a no más de dos bandas de 6 MHz en el espectro de televisión. Otra restricción exigía que las nuevas señales evitasen daños indebidos a las transmisiones NTSC existentes.

Después de una búsqueda prolongada de un método compatible para crear HDTV, quedó claro que todos los métodos propuestos utilizaban la señal NTSC original más señales auxiliares dentro y fuera de banda. Todos estos recursos eran necesarios para crear la señal compatible, y se consumieron dos bandas de 6 MHz para cada señal HDTV. Este enfoque significaba que NTSC siempre tendría que ser compatible.

La empresa norteamericana Zenith Electronics Corporation rompió por primera vez filas con los proponentes analógicos al proponer un sistema híbrido que continuó la transmisión de las altas frecuencias de la imagen en forma analógica, pero convirtió las frecuencias más bajas en una forma digitalizada. Este enfoque híbrido parecía utilizar lo mejor de ambos mundos. Reconoció que la mayor parte de la energía en una señal NTSC está en sus frecuencias bajas, que incluyen los pulsos de sincronización. En NTSC, los pulsos de sincronización tienen la energía más alta porque están separados de la señal de vídeo por la discriminación de amplitud. Al digitalizar las frecuencias bajas, la mayoría de su consumo de energía fue eliminado, sin embargo, la carga en los circuitos digitales se disminuye porque sólo se procesaban frecuencias relativamente bajas. Las altas frecuencias se mantuvieron analógicas y contribuyeron poco a los requisitos de potencia. Las señales digitales de menor velocidad de datos también serían menos susceptibles a los efectos de transmisión multitrayecto.

El problema restante era que este enfoque ya no era compatible con los receptores NTSC existentes. Este problema se solucionó al permitir que la

compatibilidad incluyese la difusión simultánea. Es decir, tanto la señal híbrida como la señal NTSC llevarían la misma programación, pero a dos resoluciones diferentes y en dos frecuencias diferentes. Esto preservaría la utilidad de los receptores más antiguos. Además, dado que no se había propuesto un sistema exitoso que pusiera tanto NTSC como HDTV en los mismos 6 MHz, todavía sería necesario dos canales de 6 MHz, como en todos los demás sistemas propuestos.

Este enfoque tenía una serie de ventajas importantes. La señal HDTV de baja potencia se aficionó para causar interferencias mínimas de co-canal en ubicaciones adyacentes utilizando las mismas frecuencias. Además, dado que la señal NTSC no era necesaria como componente de la señal HDTV, eventualmente podría ser abandonada. El canal NTSC podría reasignarse a otros fines. Incluso antes de que eso sucediera, el requisito de la difusión simultánea podría flexionarse sobre la base de restricciones políticas y no tecnológicas. A través de este proceso paso a paso, la compatibilidad se abandonó por primera vez en la televisión de difusión.

Desde entonces, las industrias de la televisión y la informática han creado conjuntamente kits de herramientas estandarizados para la compresión de audio y vídeo. El estándar de compresión de vídeo MPEG-2 proporciona una caja de herramientas de técnicas que se pueden seleccionar de acuerdo con la naturaleza de una aplicación. El estándar de sistemas MPEG-2 define cómo se pueden multiplexar varios canales de audio y vídeo en una única secuencia de bits digital, las industrias de radiodifusión y cable han desarrollado normas de modulación y transmisión para ofrecer de forma fiable la corriente de bits digital a través de un canal analógico.

Usando estos estándares, un solo programa de HDTV ahora se puede transmitir dentro de la asignación de canales de televisión de difusión analógica de 6 MHz en lugar de las decenas de megahercios una vez que se pensó

necesario. En el caso del espectro de cable bien comportado, es posible duplicar la velocidad de transmisión de datos; dos o tres señales HDTV se pueden llevar en 6 MHz.

La misma tecnología que hace posible la HDTV en 12-18 Mbps también permite una compresión muy eficiente de la televisión de definición estándar. Ahora se están obteniendo excelentes resultados a velocidades de datos de 2-3 Mb/s utilizando la compresión de vídeo MPEG-2. Dado que la velocidad de transmisión de cable es de aproximadamente 38 Mb/s en 6 MHz, se pueden transportar 12-18 programas en el mismo espectro que anteriormente llevaba uno.

3.2.1.2. Procesamiento de señales digitales

Los sistemas sensoriales humanos para imágenes y sonidos son analógicos. Las imágenes y los sonidos comienzan como fenómenos analógicos, para ser comprendidos por los seres humanos, los fenómenos deben convertirse en señales, y las señales deben mostrarse eventualmente como estímulos analógicos para que los ojos y los oídos disfruten. Desafortunadamente, a medida que las señales analógicas se transmiten a largas distancias, se encuentran con ruido, distorsión y señales que interfieren que degradan la calidad de las imágenes y sonidos, por lo que se vuelven desagradables y, eventualmente, inutilizables. Si las señales analógicas se convierten en señales digitales, se introduce un grado arbitrariamente pequeño de ruido en el proceso de conversión, pero toda degradación posterior de la señal se puede evitar utilizando técnicas prácticas.

Las ventajas de las señales digitales de banda base no moduladas, incluyen la capacidad de regenerar completamente la señal, evitando así la acumulación

de ruido y distorsión, y la capacidad de aplicar técnicas computacionales con fines de detección de errores y corrección y reducción de redundancia. La reducción de redundancia es importante porque ahorra espacio de almacenamiento de datos y tiempo de transmisión y ancho de banda.

Las ventajas de los números binarios incluyen que tienen dos estados, que pueden ser representados por circuitos simples y baratos, y que el impacto del ruido eléctrico y la distorsión pueden ser minimizados o incluso eliminados por el diseño adecuado. Un elemento de circuito, como un transistor, que procesa una señal analógica debe reproducir fielmente todos los valores de la señal mientras se añade un mínimo de distorsión y ruido. Si muchos de estos elementos de circuito procesan una señal analógica, sus contribuciones individuales de ruido y distorsión se acumulan, causando una degradación sustancial de la señal.

En cambio, un circuito binario puede tener dos estados bien definidos, encendido y apagado, que son fácilmente distinguibles. El estado on puede representar el número binario 1, mientras que el estado off puede representar el número binario 0. El punto importante es que, si el elemento de circuito está mayormente apagado, pero no completamente apagado, no se confundirá con el estado on. Del mismo modo, si el elemento de circuito está encendido en su mayoría, pero no completamente encendido, no se confundirá con el estado apagado.

Por lo tanto, el rendimiento imperfecto del circuito todavía puede representar fielmente los valores binarios. Sólo cuando el estado on se acerca a la mitad del valor asignado o cuando el estado apagado está casi a la mitad de la condición de encendido puede resultar de confusión. Si se evita este grado de rendimiento deficiente, los dos estados pueden ser discriminados y la señal perfectamente resuelta.

Eventualmente, se acumularán suficientes ruidos y distorsiones para que los dos estados se confundan. Si el sistema está diseñado para que la señal se regenere, una nueva señal binaria se puede sustituir por la señal degradada, y todo el daño causado por el ruido y la distorsión se puede deshacer por completo. Los repetidores pueden realizar esta operación un número arbitrario de veces, lo que permite comunicaciones libres de errores a largas distancias arbitrariamente. Esto es algo que no se puede lograr con señales analógicas.

Otra ventaja de las señales digitales es que el arte del diseño de circuitos ha progresado hasta donde los transistores que procesan señales digitales son muy pequeños y baratos. Una ventaja adicional de las señales digitales es que pueden ser manipuladas matemáticamente de maneras muy complejas que conducen a métodos para determinar si se han producido errores de transmisión e incluso para corregir algunos de esos errores. Tenga en cuenta que sólo hay dos tipos posibles de errores: un símbolo binario 1 puede dañarse y convertirse en un símbolo binario 0, y un símbolo binario 0 puede dañarse y convertirse en un símbolo binario 1. No hay otras alternativas en un sistema binario.

3.2.2. Compresión de video digital

El vídeo digital sin comprimir requiere una velocidad de datos muy alta, estas tasas son tan altas que sería poco económico transmitir o almacenar vídeo digital sin comprimir. Por lo tanto, la compresión de datos es necesaria para que el vídeo siga siendo de calidad aceptable mientras se describe con muchos menos bits. Este tipo de compresión se conoce como compresión con pérdida, ya que parte de la información se descarta durante el proceso de codificación.

La calidad aceptable se define por las expectativas del cliente y las condiciones de negocio, tanto para los operadores y programadores, más es

mejor; cuanto más agresiva sea la compresión, más canales para un ancho de banda determinado. Muchos televidentes parecen ser muy indulgentes con una imagen más suave siempre y cuando la imagen permanezca libre de ruido. Sin embargo, los espectadores más sofisticados ciertamente han mostrado su preferencia por una mejor resolución, como lo demuestra el fenomenal éxito del DVD. Esta tendencia puede continuar a medida que las pantallas de gran pantalla y alta resolución se vuelven más asequibles.

La primera aplicación a gran escala de compresión de vídeo digital fue, y sigue siendo, servicios de televisión de radiodifusión. Todas estas aplicaciones requieren un mecanismo de codificación estándar que sea entendido por todos los decodificadores en el mercado. El estándar MPEG familiar es el mejor ejemplo de esto. También permitió la producción en volumen de chips decodificadores MPEG-2 para que se volvieron lo suficientemente baratos como para poner en el terminal decodificador STT y, finalmente, el televisor.

Una segunda aplicación es el disco digital versátil, originalmente vídeo. Al igual que en los servicios de televisión de radiodifusión, el decodificador en cada reproductor de DVD tenía que funcionar de forma idéntica; una vez más, se adoptó el formato de vídeo MPEG-2.

Por último, el vídeo bajo demanda VOD, que ahora está siendo implementado agresivamente por muchos operadores de cable, también utiliza estándares MPEG-2. En este caso, MPEG-2 es una opción natural, ya que VOD aprovecha la inversión existente en el STT.

Una aplicación muy diferente, llamada streaming multimedia, ha surgido con Internet. En los medios de transmisión, la transferencia de vídeo suele ser una transacción de 1 a 1, por lo que es análogo a VOD. Sin embargo, el entorno de

Internet permite especificar el formato de codificación para cada transacción, incluso permitiendo que se descargue un decodificador de software justo antes de que sea necesario. Además, el omnipresente ordenador personal ahora proporciona suficiente rendimiento y memoria de la unidad de procesamiento central CPU sin procesar en bruto para permitir que la decodificación se realice sin silicio de propósito especial. Estas propiedades hacen de Internet una generadora perfecta para nuevos algoritmos de compresión.

3.2.2.1. Principios de la compresión de video

La compresión de vídeo digital puede lograr una reducción drástica de la velocidad binaria; un factor de 50:1 es bastante alcanzable para el video de calidad de entretenimiento. Hay dos razones principales para esto.

- Una secuencia de vídeo típica contiene una enorme cantidad de redundancia espacial y temporal.
- El sistema ojo-cerebro humano es relativamente insensible a ciertos impedimentos en el resultado mostrado.

En el primer caso, recuerde que el vídeo NTSC se actualiza 60 veces por segundo y el vídeo PAL 50 veces por segundo, para evitar la percepción de parpadeo. Hay muchos segmentos en los que se tiene que transmitir muy poco movimiento, y un campo es muy similar al anterior. Fundamentalmente, si los cambios se pudieran enviar, en lugar de actualizar completamente el campo, entonces se podría guardar una gran cantidad de transmisión de datos.

En segundo lugar, el sistema humano ojo-cerebro es bastante indulgente cuando se trata de la fidelidad de la interpretación de vídeo. Por ejemplo, las células de la varilla del ojo son muy sensibles a la intensidad total de la luz,

luminancia, mientras que las células del cono del ojo son menos sensibles a las diferencias de color, particularmente para ciertos tonos. El ojo también es menos sensible a los detalles de color, crominancia. NTSC aprovecha esto para limitar drásticamente el ancho de banda de las señales de crominancia I y Q, como se comentó en la sección anterior. Finalmente, el sistema ojo-cerebro es aún menos sensible a los detalles si hay un movimiento significativo en esa parte de la escena.

Estos descubrimientos sobre el sistema ojo-cerebro humano han sido investigados a fondo y codificados en un modelo perceptivo que se puede utilizar para reducir la fidelidad en aquellas áreas donde es menos perceptible manteniendo la fidelidad donde el ojo es más discriminatorio. Sin embargo, mucho trabajo de compresión avanzado trasciende el modelado perceptivo, convirtiéndose en bastante empírico. Esto explica la falta de técnicas de medición de calidad de vídeo buenas y objetivas basadas en el modelado perceptivo.

Para realizar la compresión de video, se comienza por la comprensión de imágenes fijas y luego este modelo se extiende para tratar imágenes en movimiento, el video se puede representar como una serie de imágenes fijas, por lo tanto, debemos codificar periódicamente un marco completo como una imagen fija esto proporciona la propiedad de acceso aleatorio. Un marco contiene toda la información necesaria para decodificar el marco dentro la propia trama. El acceso aleatorio es muy importante para las aplicaciones de difusión; cuando el espectador está cambiando de un canal a otro, debe ser posible reinicializar el proceso de decodificación en un corto período de tiempo.

Tanto para la compresión de imágenes fijas y como en movimiento se suele aplicar una serie de pasos: muestreo, formación de bloques, transformar la

codificación, cuantificación, codificación de longitud de ejecución y codificación de la entropía

3.2.2.2. Estándares MPEG

El Motion Picture Experts Group MPEG, de la Organización Internacional de Estándares ISO, ha estado activo en los estándares de compresión de vídeo desde principios de la década de 1990. Todos los estándares MPEG se basan en un conjunto de principios que han permitido una innovación increíble manteniendo un estándar interoperable.

Estos estándares no especifican el funcionamiento del codificador, sólo el de un decodificador de referencia y la sintaxis de la secuencia de bits que espera. Esto permite que las implementaciones del codificador mejoren con el tiempo, a medida que se desarrollan mejores algoritmos de búsqueda de compensación de movimiento, lo cual nos conduce al desarrollo de varias versiones del estándar con mejoras con respecto a la versión previa.

MPEG-1: Se introdujo una codificación eficiente para el material basado en fotogramas que es un escaneado progresivamente utilizando la codificación DCT de 8 por 8 bloques. MPEG-1 se basa en los principios de codificación de trama para JPEG, pero añade técnicas de codificación entre fotogramas, incluida la compensación de movimiento y las imágenes de diferencia asociadas, los llamados fotogramas P y B. MPEG-1 solo admite resoluciones bajas, lo que es insuficiente para vídeo con calidad de entretenimiento.

MPEG-2: Añade soporte para la codificación adaptable de campo/marco, que es particularmente para codificar material entrelazado con contenido de alto

movimiento, esta versión ha sido adoptada por las industrias de televisión y cable en todo el mundo.

MPEG-4: 4 es muy diferente en el enfoque de los estándares MPEG anteriores, ya que se centra en multimedia e interactividad. Las escenas visuales se dividen en objetos y se envían como capas independientes, que se componen en el decodificador, MPEG-4 también introduce algunas técnicas innovadoras para la codificación de velocidad de bits muy baja. Estos incluyen mapeo de imágenes en una malla generada por computadora es posible mapear expresiones faciales y enviarlas independientemente de la imagen de una persona y luego reconstruir la cara animada en el receptor.

MPEG-4 Part 10, Advanced video coding AVC: utiliza la predicción espacial para la codificación intratrama para reducir el tamaño de los fotogramas. La transformación espacial básica es una transformación de enteros, que funciona en un bloque de 4 x 4 píxeles más pequeño. Para mejorar la eficiencia de la compensación de movimiento, MPEG-4 AVC utiliza de forma adaptativa diferentes tamaños de bloque 4 x 4, 8 x 4, 4 x 8, 8, 16 a 8, 8 o 16 o 16 x 16 y varios fotogramas de referencia.

3.2.3. Compresión de audio digital

El sistema auditivo humano es considerablemente menos tolerante a las imperfecciones que el sistema visual humano. La compresión de audio de calidad es mucho más difícil que la compresión de vídeo. Las relaciones de compresión de sólo 4:1 u 8:1 se logran en audio, mientras que el vídeo disfruta de relaciones de compresión de 30:1 o 50:1. Afortunadamente, los anchos de banda de audio son pequeños, y las velocidades de datos resultantes no son demasiado pesadas.

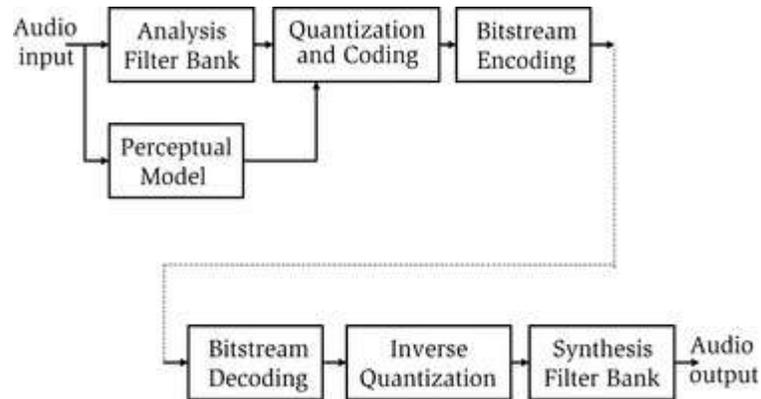
Dos importantes métodos competitivos de compresión de audio están en uso generalizado en sistemas de televisión digital: MPEG-1 Layer 2 y Dolby AC-3. En la mayoría de países de Europa han utilizado el MPEG-1 Layer 2, mientras que la industria de cable en USA utilizan el AC-3.

Al igual que con el vídeo, la compresión se logra mediante la cuantificación de los componentes de frecuencia de la señal. El oído es extraordinariamente sensible a ciertas deficiencias en la señal de audio, y la planitud espectral es muy importante. Sin embargo, el oído es más sensible a las frecuencias entre 2 kHz y 5 kHz, y la sensibilidad cae bastante rápidamente por encima y por debajo de estas frecuencias. De hecho, a 50 Hz y 17 kHz la sensibilidad del oído es aproximadamente 50 dB inferior a 3 kHz.

Otro efecto del sistema psico acústico es el enmascaramiento de audio. Un sonido más fuerte enmascarará uno más silencioso, especialmente si están cerca en frecuencia.

La figura 40, se muestra un diagrama de bloques de alto nivel de un par codificador-decodificador de audio. En el codificador, un banco de filtros de análisis divide la señal de entrada en bandas de frecuencia estrechas, cada una de las cuales puede ser cuantificada y codificada de forma independiente. El modelo perceptivo ajusta el nivel de cuantificación de cada banda de modo que el ruido de cuantificación esté idealmente justo por debajo del umbral de enmascaramiento. La secuencia de bits resultante se codifica y se transmite a través de un enlace de datos al decodificador. En el decodificador, las funciones inversas se aplican para reconstruir la señal de audio para su reproducción al oyente.

Figura 40. **Codificación y decodificación de audio**



Fuente LARGE David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>

Consulta: julio de 2020.

3.2.3.1. Sistema AC-3

El sistema AC-3 tiene 5,1 canales de audio: frontal izquierdo, delantero derecho, centro, envolvente izquierda, envolvente derecho y mejora de baja frecuencia. El ancho de banda de los canales es de alrededor de 20 kHz, con la excepción del canal LFE, que está limitado a 120 Hz. Esto da lugar al .1 de los canales 5,1. Puesto que los sonidos de baja frecuencia no están localizados, sólo se necesita un altavoz para las frecuencias bajas, y puede llevar las frecuencias bajas de todos los canales. Además, el altavoz LFE popularmente conocido como "subwoofer" se puede colocar en casi cualquier lugar de la habitación.

El audio se comprime convirtiéndolo primero a forma digital con una frecuencia de muestreo de 48 kHz. A continuación, el audio se segmenta en fotogramas de muestras de 1 536 muestras de largo. El audio analógico se cuantifica a una resolución de al menos 16 bits. El marco se divide en seis

bloques de 512 muestras. Dado que el sistema auditivo humano es tan sensible a las imperfecciones, la mitad de las muestras de cada bloque se superponen a la mitad de las muestras de los bloques adyacentes.

Es decir, hay una superposición del 25 % con el bloque anterior y una superposición del 25 % con el siguiente bloque. La sensibilidad del sistema auditivo humano a las discontinuidades requiere duplicar el número de muestras transmitidas, las muestras de audio se transforman en el dominio de frecuencia como un conjunto de puntos de datos espectrales utilizando una versión modificada de la transformación de coseno discreta llamada transformación de cancelación de alias de división de tiempo, TDAC. Sus propiedades especiales permiten la recuperación de la necesidad de tener superposición de bloques que de otro modo generaría el doble de coeficientes de frecuencia.

El resultado es que las 512 muestras de un bloque de audio producen sólo la mitad de 256, coeficientes de frecuencia. Estos coeficientes de frecuencia dividen el espectro de audio en 256 sub-bandas de menos de 100 Hz cada una. Hasta este punto, el procesamiento de las muestras digitales es totalmente reversible, y sólo se ha logrado la digitalización, La compresión de datos se logra mediante la cuantificación y la codificación de entropía. El modelo psico acústico dicta el grado de tosquedad que se puede aceptar en la cuantificación de los datos del espectro de audio.

3.2.3.2. Estándares MPEG audio

La codificación MPEG-1 audio define tres capas, que son el equivalente de audio de los perfiles de vídeo. Cada capa añade complejidad, pero reduce la velocidad binaria. El audio MPEG-1 se basó originalmente en los principios del

sistema MUSICAM masking-pattern adapted universal sub-band integrated coding and multiplexing.

MPEG-1 capa 2 se utiliza comúnmente en aplicaciones por satélite y en aplicaciones de difusión europeas. Utiliza 32 sub-bandas usando filtrado de espejos de cuadratura y codifica música de calidad de entretenimiento a 128 Kbps por canal.

La capa 3 MPEG-1 subdivide aún más las 32 sub-bandas de la capa 2 en 576 sub-bandas mediante el uso de una transformación de frecuencia. Puede proporcionar aproximadamente la misma calidad que MPEG-1 capa 2 usando sólo 64 Kbps por canal. MPEG-1 capa 3 es más conocido como MP3 de la extensión de archivo.mp3 y se ha convertido en el algoritmo de codificación de audio de facto utilizado para ripping CDs y compartirlos en Internet. MP3 también es ampliamente utilizado en reproductores de música portátiles.

El audio MPEG-2 tiene dos variantes principales: audio compatible con versiones anteriores y codificación de audio avanzada. El audio compatible con versiones anteriores añade soporte para audio multicanal 5.1 mientras mantiene la compatibilidad con la transmisión de bits con MPEG-1. AAC es un algoritmo de segunda generación que proporciona un aumento considerable en la eficiencia de codificación sobre el audio MPEG-1.

Los buenos resultados se obtienen a 64 Kbps por canal. AAC también es muy flexible, proporcionando hasta 48 canales de audio, 16 canales de efectos de baja frecuencia, 16 canales y 16 flujos de datos.

3.3. Redes HFC

La televisión popularmente conocida como TV fue inventada en la década de 1930 y a través del tiempo se han tenido desarrollos tecnológicos con el propósito de proporcionar una mejor señal de televisión a aquellos cuya recepción era pobre porque las altas montañas y edificios bloqueaban las señales de televisión por aire. Originalmente, la planta de cable, un término para la infraestructura de cable utilizada en la industria de la televisión por cable fue diseñada para las comunicaciones unidireccionales desde el extremo principal Head End a los suscriptores utilizando el espectro de radiofrecuencia RF de 5 a 500 MHz. Esto se superpone con la parte del espectro 110-130 MHz sobre la cual los controladores de tráfico aéreo se comunican con los aviones.

Los rangos de frecuencia de 5 a 50 MHz se dejaron reservados para cualquier señal de suscriptor a red, pero ya que, en una comunicación unidireccional, no era posible, por lo que este extremo bajo del espectro se dejó sin usar. Las señales de televisión reales, que eran analógicas en la naturaleza comenzaron a partir de 50 MHz y hasta 500 MHz. Cada canal ocupaba 6 MHz, y como resultado, se podían acomodar unos 80 canales. Ahora este espectro se ha aumentado hasta 1 000 MHz, por lo que se pueden acomodar unos 150 canales de TV cuando la señalización es analógica.

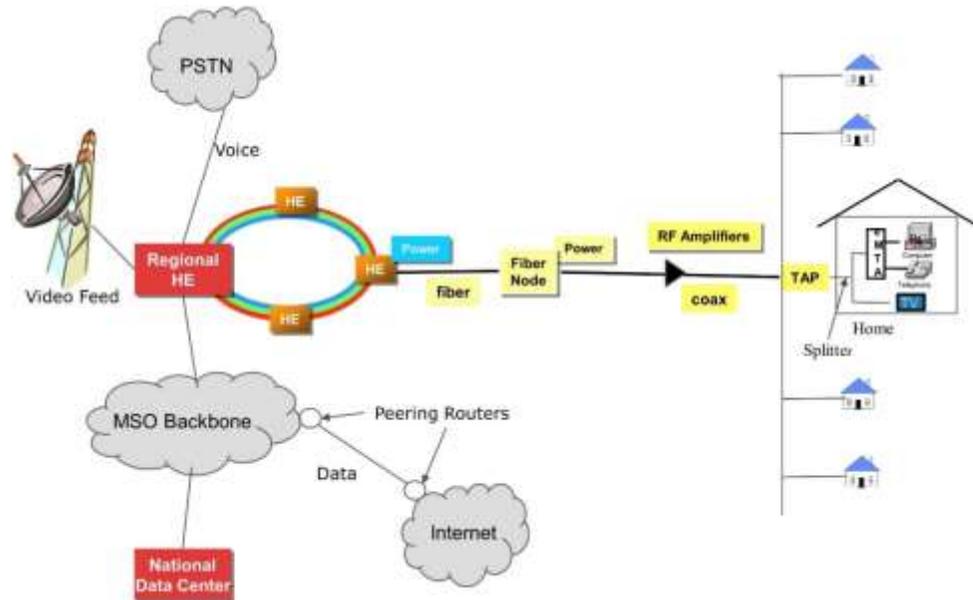
Las compañías de televisión por cable también conocidas como múltiples operadores de sistemas MSO reconocieron que tienen un importante activo de cable que pasa por millones de hogares que podrían utilizarse para la conexión a Internet de alta velocidad y las comunicaciones de voz. Su consorcio publicó una especificación de interfaz de sistema de datos sobre cables, DOCSIS, para transportar el tráfico de datos IP a través del cable.

Este tráfico requería comunicación bidireccional, por lo que las compañías de cable actualizaron su planta de cable con cables de fibra óptica para acomodar el canal digital DOCSIS, y más tarde los canales de video analógicos también se convirtieron en digitales. Sin embargo, muchas plantas de HFC todavía tienen canales de video analógicos National Television System Committee, NTSC, este nuevo sistema se conoce como HFC que significa sistema híbrido-fibra-coaxial. En HFC, el cable de fibra óptica corre hasta un punto, y luego el cable coaxial corre por la calle también la caída de una calle a otra, y el cableado dentro de la casa es un cable coaxial. La especificación DOCSIS hizo uso del rango de frecuencia de 5-50 MHz no utilizado para la comunicación de datos ascendentes realmente 5-6 MHz no se utiliza debido al ruido y 6-42 MHz se utiliza para la comunicación de datos ascendente y 42-50 MHz se reserva para los propósitos de control.

Desde entonces la especificación DOCSIS se ha revisado muchas veces para acomodar la calidad de servicio necesaria para la telefonía IP, soporte para la versión IP 6, mejorar el ancho de banda de transmisión a 10 Gbps downstream y 1 Gbps upstream usando modulación de amplitud de cuadratura 4 096, y para eliminar el espaciado de canal de 6 MHz y en su lugar usando subportadoras de canal ancho más pequeños de 20 a 50 kHz basadas en subportadoras de división de frecuencia ortogonal, OFDM. La última versión es DOCSIS 3.1.

En la figura 41, muestra un servicio típico de triple reproducción basado en HFC que consiste en servicios de audio, vídeo y datos que son el acceso a Internet de alta velocidad ofrecidos a los suscriptores por las compañías de cable.

Figura 41. Red típica de HFC



Fuente: KAMGOVI, Sachidananda. *Peering Carrier Ethernet Networks*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/peering-carrier-ethernet/9780128092491/>

Consulta: julio de 2020.

Cada HE sirve entre 20 000 y 40 000 hogares a través de un anillo de fibra de nodos de fibra en una red de área metropolitana. Cada nodo de fibra tiene uno a seis cables coaxiales conectados a él, y cada cable coaxial sirve para alrededor de 500 a 1 000 hogares. El acceso a cada casa se proporciona desde una derivación en el cable coaxial que tiene un divisor. Una rama se conecta al televisor, y la otra se conecta a un adaptador de terminal multimedia integrado comúnmente pero erróneamente conocido como módem de cable CM.

El CM a su vez se conecta a un PC directamente o a un router Wi-Fi que permite una LAN dentro de las instalaciones del cliente. Un teléfono está conectado a eMTA mediante un conector RJ11. El CM en las instalaciones del

cliente es terminado por un sistema de terminación del módem de cable, CMTS, en el HE. Los HE a su vez forman parte de una red de área regional que se conecta a una HE regional o super HE. Un super HE típico sirve entre 200,000 y 400 000 hogares. Estos súper HE están conectados a la estructura básica MSO que a través de los routers de emparejamiento está conectado a Internet para formar la red de área amplia. La columna vertebral de la MSO también se conecta al centro de datos nacional de MSO, donde se alojan los sistemas de facturación y otros sistemas centralizados de tecnología de la información.

Aunque la arquitectura de red se piensa a menudo en términos de topología de distribución física, desde el procesamiento interno de cabecera, pre-headend y a través de equipos de terminación de red afecta la forma de cómo se entregan los servicios. Por lo tanto, es importante comprender las implicaciones de las opciones disponibles en todos los niveles de la red.

3.3.1. Equipos terminales

El equipo terminal es relevante para esta estructura en la medida en que afecta al diseño y funcionamiento de la red HFC. La mayoría de los equipos terminales de los clientes están conectados a puntos de venta dentro de las instalaciones del cliente. Dado que los clientes pueden modificar su propio cableado interno utilizando cables y dispositivos de rendimiento incontrolado, las características de las redes coaxiales en el hogar pueden variar ampliamente, sin embargo. El equipo de punto de entrada se encuentra donde la conexión entra en las instalaciones del cliente, antes de cualquier división.

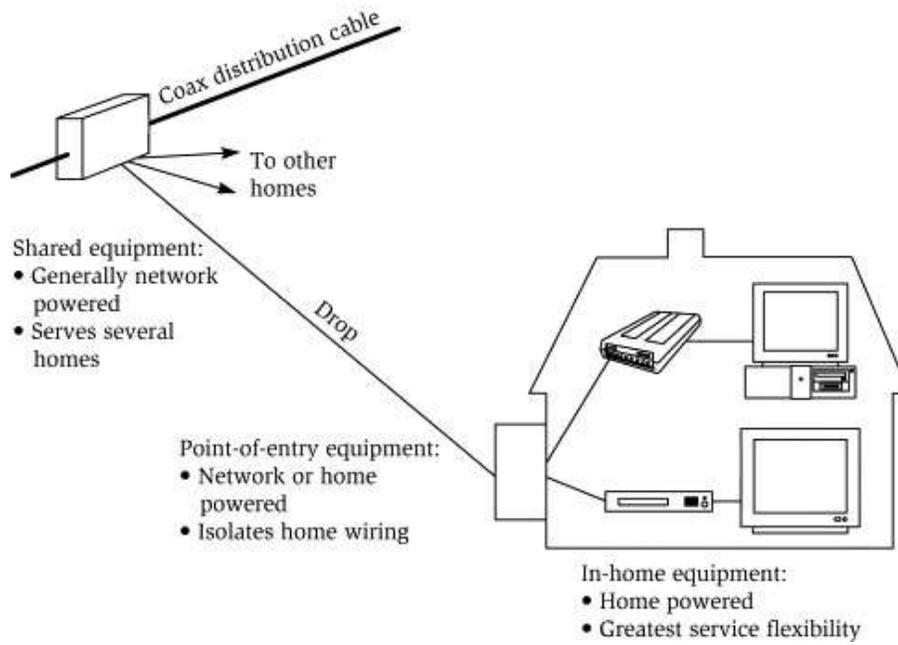
Por naturaleza de su ubicación, un dispositivo POE que incorpora un transceptor RF puede tolerar un nivel de recepción más bajo en la derivación, y no requerirá un nivel de transmisión ascendente tan alto como un dispositivo

conectado a una toma de corriente en el hogar, ya que evita las pérdidas debidas a los divisores internos del cliente y el cableado de salida. Al evitar la variación en las pérdidas de cableado interno, los dispositivos POE también pueden tolerar una variación más amplia en los niveles de la derivación y tendrán un nivel de transmisión más consistente.

Otra categoría de dispositivo POE es el amplificador de caída. Al agregar ganancia a veces bidireccional, este dispositivo reduce el nivel de derivación requerido y supera la alta división interna y las pérdidas de cable, pero también agrega distorsión y ruido que deben tenerse en cuenta en el presupuesto general de rendimiento del sistema, ya que los operadores de cable son responsables del rendimiento de la señal medido en el puerto de entrada de los receptores de televisión y modems de los clientes.

Los dispositivos POE afectan al diseño de alimentación general del sistema de distribución coaxial y también requieren que todas las derivaciones sean capaces de extraer energía de la red. Por último, los dispositivos POE pueden incluir el filtrado total o parcial del espectro ascendente y, por lo tanto, ofrecen cierta protección para la red contra las señales que entran o se generan dentro de las instalaciones de los clientes. En la figura 41, se muestra las ventajas de la colocación de POE frente a los equipos terminales en el hogar.

Figura 42. Punto de entrada



Fuente: LARGE, David FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

3.3.2. Red de distribución coaxial

En secciones anteriores ya hemos revisado los sistemas de distribución coaxial, sin embargo, dentro del marco general de la ampliación de redes, divisiones y seccionamiento se presentan muchas variables. El ancho de banda RF es el parámetro más básico de cualquier red coaxial es el ancho de banda de reenvío y retorno. Dado que estos están determinados principalmente por el equipo de amplificación, algunos operadores están proponiendo el uso de redes de distribución coaxial lo suficientemente pequeñas como para que puedan ser totalmente pasivas entre la salida del nodo de fibra y el usuario.

Tales redes tienen la ventaja de que la división entre el ancho de banda ascendente y descendente se puede alterar a voluntad, al igual que el límite de frecuencia superior. Sin embargo, como cuestión práctica, estas libertades están restringidas por reglamentos que abarcan el transporte de señales de radiodifusión por aire, las regulaciones sobre la entrega de señales a dispositivos propiedad del cliente y el rango de ajuste de los dispositivos suministrados por cables desplegados.

Otro factor muy importante en el diseño de una red HFC es el tamaño del área que es la medida en número de hogares pasados que debe ser servida por cada subred coaxial físicamente separada que puede transportar un conjunto único de señales. Puesto que el uso del ancho de banda RF se comparte entre todos los usuarios en el área de servicio, esto determina el límite superior en el ancho de banda por el hogar pasado.

Dado que la confiabilidad es inversamente proporcional al número de componentes críticos conectados en serie, la disponibilidad de red necesaria y la tasa de fallas para los servicios que se ofrecerán también debe ser un factor para determinar el tamaño del área de servicio.

La fiabilidad media de la potencia comercial es a menudo menor que el rendimiento total de la red de extremo a extremo requerido. Por lo tanto, los sistemas suelen emplear una estrategia de potencia que minimiza los efectos de las interrupciones de energía. Las fuentes de alimentación convencionales de televisión por cable en espera suelen proporcionar de 1 a 2 horas de funcionamiento de baterías independientes. Si bien esto es suficiente para interrupciones cortas, algún porcentaje de interrupciones excederá esta longitud. En los sistemas en los que los clientes se ven afectados por más de una

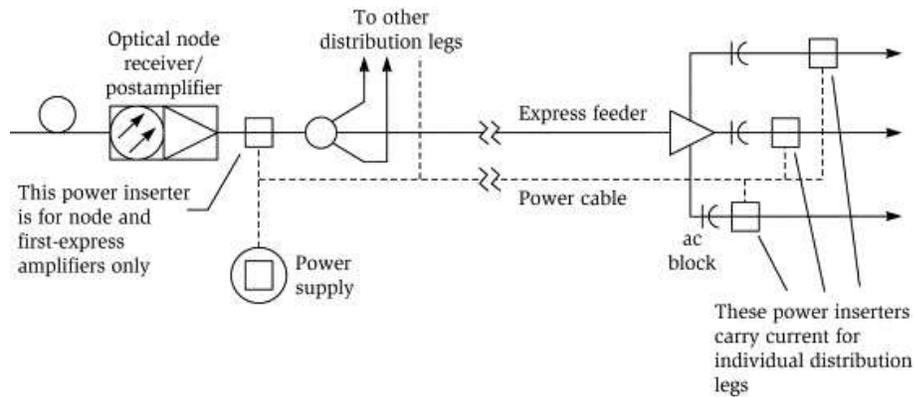
fuentes de alimentación de este tipo, la fiabilidad disminuirá aún más debido a la naturaleza típicamente no correlacionada de esas interrupciones.

Cuando las patas de distribución coaxial individuales están limitadas a aproximadamente 150 hogares pasados, suponiendo densidades típicas suburbanas de hogar unifamiliar, es práctico alimentar toda la subred coaxial desde una sola ubicación, incluso cuando se utilizan dispositivos de interfaz POE alimentados por red. Esta es, de hecho, la estrategia típicamente utilizada por las compañías telefónicas estadounidenses que han construido redes de HFC. La alimentación de un solo punto de esta red de tamaño, sin embargo, generalmente requiere el uso de 90 voltios, con corrientes máximas en el orden de 15 amperios.

Con el fin de lograr la confiabilidad de grado telefónico, los operadores que ofrecen servicios telefónicos de línea primaria y servicios de datos de alta disponibilidad a veces han equipado estas fuentes de alimentación comunes con capacidad de batería de 8 horas y/o generadores de respaldo.

Cuando las capacidades de manipulación de corriente de los componentes o la caída de tensión a través de los cables de distribución podrían limitar la aplicación de alimentación de un solo punto, la salida de una fuente de alimentación a veces se divide entre varios cables de distribución de energía cuya resistencia por longitud de unidad es menor que los cables de distribución de RF. Estos cables de derivación de potencia se pueden enrutar junto con los cables de señal más allá del primer punto de división, donde se pueden insertar corrientes inferiores en cada uno de los tramos de red como se ilustra en la figura 43. Puesto que estos cables de distribución de energía no llevan RF, las impedancias más bajas y la construcción no estándar se utilizan a veces para reducir la pérdida de energía.

Figura 43. **Alimentación de derivación**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

Cuando se utilizan fuentes de respaldo de batería, pueden producirse mejoras importantes en la tasa de interrupción y la disponibilidad si los suministros están equipados con sistemas de monitoreo que alertan a los operadores de red de cortes de energía comerciales para que las cuadrillas con generadores portátiles puedan proporcionar energía provisional antes de que expiren las baterías.

3.3.3. **Nodo de fibra óptica**

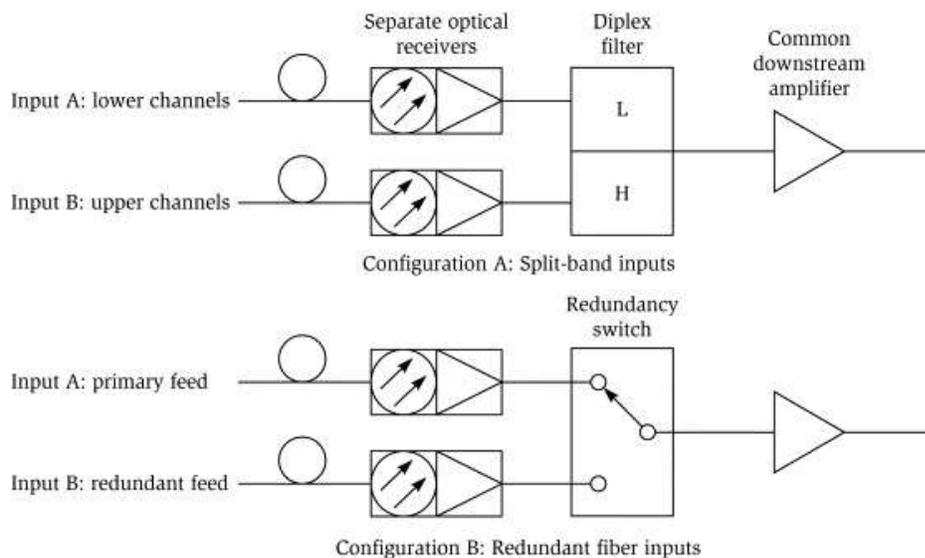
Los nodos de fibra individuales proporcionan la interfaz entre el sistema de tronco de fibra lineal y las ramas de distribución coaxial. En el nivel más simple, dicho nodo puede consistir en un único receptor óptico cuya salida se amplifica para alimentar los amplificadores descendentes y un transmisor óptico ascendente cuya entrada es impulsada por la salida de un combinador cuyas

entradas son las señales ascendentes de todas las patas de distribución coaxiales conectadas. Hay, sin embargo, muchas variaciones arquitectónicas.

En los distintos diseños de redes, se tiene el modelo de entradas de fibra múltiple de banda dividida. Algunos nodos proporcionan la opción para múltiples fibras de entrada aguas abajo que se alimentan a receptores ópticos separados cuyas salidas se combinan en un filtro diplex. Esto se traduce en una mejor calidad de la señal porque, con una menor carga de señal, el índice de modulación óptica por señal puede ser mayor mientras que el menor número de señales da como resultado menos productos de distorsión de segundo y tercer orden y, por lo tanto, se ha mejorado C/CTB y C/CSO. Además, el filtro diplex elimina los productos de distorsión en cada salida del receptor que afectarían al espectro de salida RF del otro receptor. Las ganancias relativas en C/N y la distorsión se pueden intercambiar, dentro de un rango limitado, ajustando la profundidad de modulación óptica.

En el modelo de fibras múltiples redundantes, un uso alternativo para las fibras de entrada descendentes múltiples es la redundancia de la red troncal de fibra óptica. En los nodos equipados con entradas redundantes, cada fibra se enruta a su propio receptor de ancho de banda completo. Un Switch en la salida de los receptores selecciona la mejor señal en caso de falla o degradación de un trayecto. Si las fibras que alimentan el nodo se enrutan de manera diversa de modo que la probabilidad de corte simultáneo es baja, pueden producirse ganancias significativas en la confiabilidad. Como cuestión práctica, la ganancia en fiabilidad está limitada por la fiabilidad del switch, que es un elemento crítico añadido en la trayectoria de la señal. Como se muestra en la figura 44, las configuraciones son muy similares; de hecho, algunos fabricantes ofrecen cualquiera de ellos como una opción en la misma plataforma de nodo.

Figura 44. **Nodo de fibra con múltiples opciones de entradas**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

En el manejo de múltiples derivaciones de distribución coaxial, los nodos ópticos se utilizan para alimentar más de una pierna de distribución coaxial. Aunque se trata de una comodidad de diseño que permite cascadas coaxiales más cortas colocando el punto de alimentación cerca del centro lógico del área de servicio de nodo, separar eléctricamente las patas coaxiales también ofrece oportunidades para una expansión de ancho de banda eficaz y un mejor rendimiento ascendente. Por lo tanto, el ancho de banda por hogar pasado está limitado por el área de servicio coaxial en lugar de por el área de servicio de nodo más grande. La compensación de la ganancia de ancho de banda por suscriptor es el mayor rendimiento requerido del transmisor óptico ascendente, que debe manejar más señales y mayor ancho de banda RF.

En algunos casos, esto requerirá la actualización de FP a transmisores DFB, a un aumento considerable en el costo. Además, cada paso de conversión de frecuencia generalmente implica bucles de fase bloqueada vinculados a algún tipo de piloto para asegurarse de que la conversión y la reconversión no crean ningún desplazamiento de frecuencia neta, y que, a su vez, añade una cantidad irreductible de ruido de fase a las señales convertidas, lo que no debe hacer que el ruido de fase ascendente total supere los estándares permitidos.

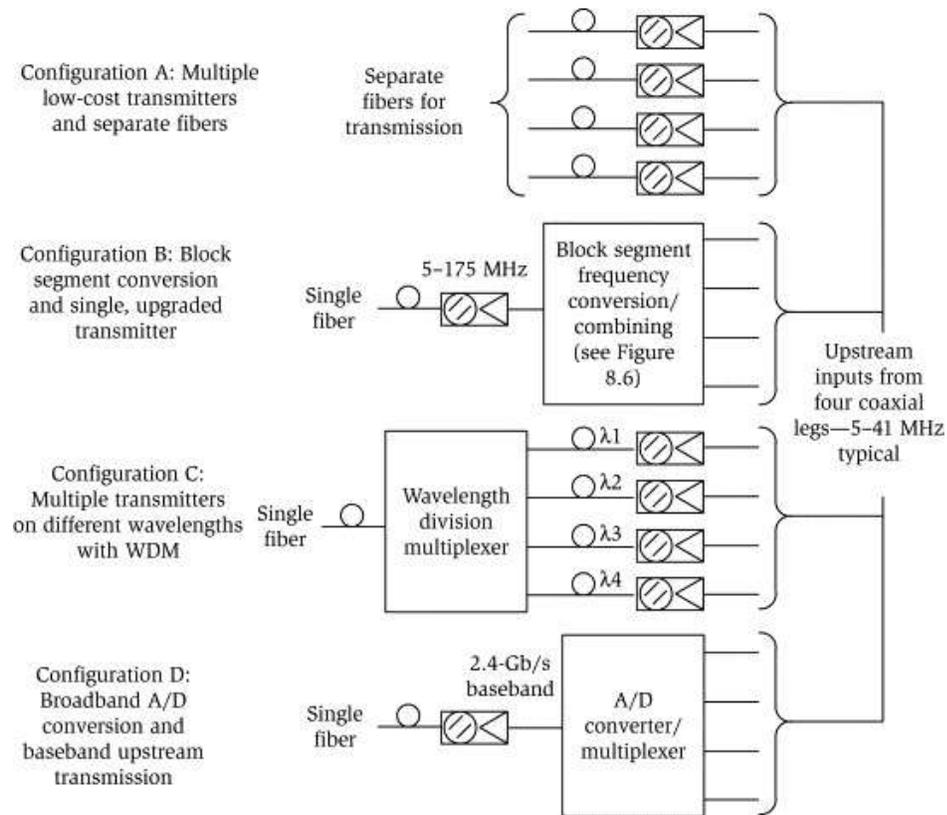
Una forma alternativa de lograr la misma expansión de ancho de banda ascendente es utilizar transmisores y fibras ascendentes separados para cada tramo de distribución. Una tercera alternativa es utilizar transmisores ascendentes separados que operan en diferentes longitudes de onda ópticas y combinar sus salidas utilizando un multiplexor de división de longitud de onda, WDM. Si las fibras separadas o la opción WDM es menos costosa dependerá de la longitud de la trayectoria de transmisión de fibra y el costo relativo de los transmisores y multiplexores.

Una última opción es procesar primero todo el espectro ascendente de cada tramo coaxial convirtiéndolo en una señal digital de banda base de alta velocidad, para multiplexar el tiempo de estas señales, y luego alimentarlas a un transmisor óptico digital de banda base de alta velocidad. Varios fabricantes ofrecen versiones de esta técnica, con dos o cuatro entradas multiplexadas para crear un único flujo de datos de banda base de aproximadamente 2 Gb/s. Estos transmisores también están disponibles en longitudes de onda DWDM de la red UIT para que puedan ser multiplexados en el concentrador antes de la transmisión al headend.

Estas cuatro opciones se ilustran en la figura 45. Se tiene en cuenta que la división óptica o el uso de transmisores láser adicionales se pueden utilizar, en

teoría, con cualquier opción para crear salidas duales para alimentar fibras enrutadas de forma diversa para una mayor confiabilidad ascendente, aunque el costo incremental es menor para configuraciones de fibra única.

Figura 45. Opciones para segmentación de entradas coaxiales



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>

Consulta: julio de 2020.

3.3.4. Interconexiones de fibra óptica

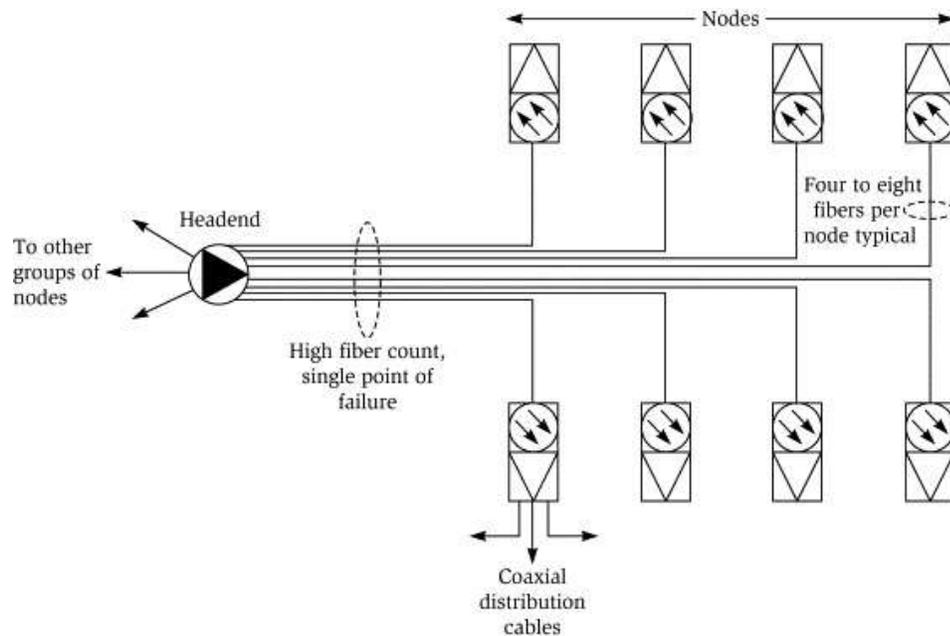
Los enlaces lineales de fibra óptica proporcionan la conectividad entre el punto donde se crea el espectro FDM y su entrega a las patas de distribución coaxiales. Los enlaces de fibra también se utilizan en niveles más altos de la red para distribuir señales seleccionadas de todo tipo, a menudo en forma digital. Aunque los enlaces de fibra óptica se utilizan entre los headends y entre los headends y las fuentes de información externas tales como los organismos de radiodifusión y los proveedores de servicios de Internet, esta sección discutirá solamente aquellos enlaces que forman parte de la red lineal que se extiende desde los headends hacia y desde los clientes finales. La arquitectura de fibra formará la mayor parte de este capítulo, comenzando con las opciones básicas de red y procediendo a ejemplos específicos.

La topología estrella, es La arquitectura óptica más simple, y la más comúnmente desplegada para transmitir señales FDM analógicas desde headends o hubs hacia y desde nodos, es la estrella, definida como trayectos separados de un punto común a múltiples puntos de terminación. Cuando se construye con fibras ópticas dedicadas, impulsadas por transmisores separados, la arquitectura estelar permite una independencia total en las señales entregadas a cada nodo. De hecho, muchos sistemas de cable dividen ópticamente las salidas del transmisor de fibra para alimentar de dos a tres nodos, pero hacen esa división en el headend para permitir una fácil separación de los nodos en el futuro cuando una mayor segmentación de la red es apropiada.

Aunque la falla de una fibra individual que alimenta un punto de recepción afecta solamente a los suscriptores en ese nodo, el ruteo práctico del cable a menudo da lugar a una vaina del cable que sostiene las fibras para muchos

Nodos y así crea un solo punto de falla que sea mucho más grande, como se muestra en la figura 46.

Figura 46. **Arquitectura de estrella**



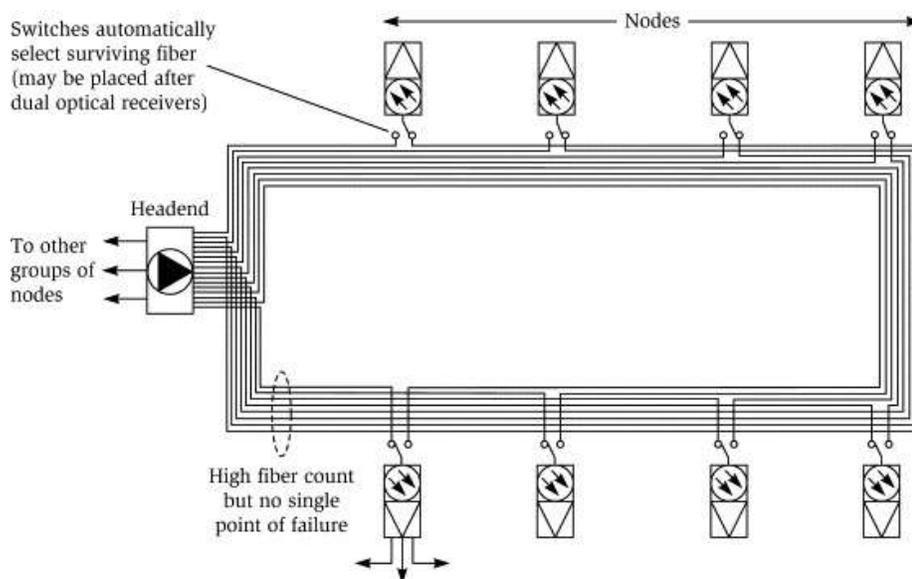
Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>

Consulta: julio de 2020.

En la topología de anillo se presenta La exposición a interrupciones causadas por cortes o fallos de fibra puede reducirse significativamente enviando las señales entre el punto común y cada terminación a través de rutas físicamente diversas. Cuando se pueden organizar varios puntos de terminación en una configuración de anillo, el ahorro considerable resulta del uso compartido de los costes de construcción comunes, como se muestra en la figura 47. Esta arquitectura se conoce como un anillo. Observe que el diagrama muestra solamente una sola línea en cada dirección alrededor del loop desde el punto

común a cada nodo, mientras que de hecho puede haber varios al menos un downstream y un upstream. El análisis de la figura mostrará que el cable se puede cortar en cualquier punto sin destruir la continuidad desde el punto común a cada nodo.

Figura 47. **Arquitectura de anillo**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

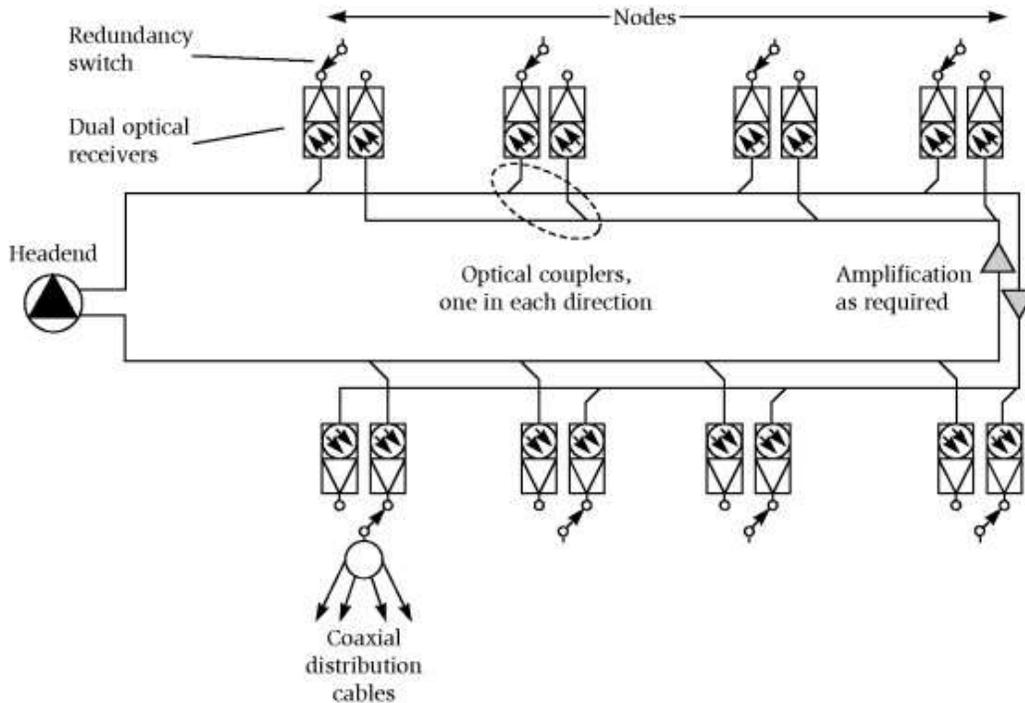
Aunque la arquitectura del anillo de vaina preserva la independencia de la señal de la estrella y añade un grado considerable de protección contra los cortes de fibra, lo hace a expensas de un aumento considerable en el material de archivo total de fibra. Sin embargo, dependiendo de la disposición física del anillo, el material de archivo total del cable puede ser sólo ligeramente mayor que para una estrella simple. Dado que los costos de construcción suelen ser mucho

mayores que los costos de fibra, el costo incremental de la instalación puede ser sólo moderadamente más alto.

Otro tipo de topología comúnmente utilizado en estos diseños es el anillo compartido analógico, cuando se debe enviar un conjunto común de señales a varios nodos, una estructura económica es el anillo compartido, ilustrado en la figura 48. El espectro de señal común se transmite tanto en el sentido de las agujas del reloj como en el sentido contrario a las agujas del reloj desde el punto común utilizando fibras separadas.

En cada nodo, una parte de la señal se acopla de ambos anillos y se alimenta a receptores ópticos separados. Un switch de redundancia, como se describe en la sección de opciones del nodo óptico, selecciona la trayectoria de supervivencia en caso de un corte de cable o una falla del transmisor. Alternativamente, el interruptor óptico se puede colocar por delante de un solo receptor.

Figura 48. **Arquitectura de anillo compartido analógico**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

Aunque los anillos compartidos se pueden construir en una longitud de onda de 1 310 nm, el presupuesto óptico máximo disponible de aproximadamente 17 dB limita el número de nodos receptores. A 1 550 nm, sin embargo, las pérdidas de fibra son menores, y hay amplificadores ópticos disponibles que pueden aumentar considerablemente el presupuesto de pérdida disponible.

Una ventaja importante del anillo compartido es obviamente un ahorro considerable en el uso de fibra óptica y el número de transmisores, en comparación con una simple estrella o un anillo de vaina, preservando la protección contra cortes de fibra y fallas del transmisor. Aunque su aplicación se

limita a la distribución de un espectro de señal común, los anillos compartidos analógicos son eficaces cuando se combinan con otras estructuras.

3.4. Diseños de arquitecturas

La ingeniería es el arte de resolver un problema técnico al menor costo, dado un conjunto bien definido de requisitos de rendimiento, confiabilidad, escalabilidad y otros factores. Desafortunadamente para el ingeniero, el problema no siempre está bien definido, aunque el presupuesto para un proyecto dado puede ser. En ese caso, la tarea consiste en encontrar formas innovadoras de alcanzar los objetivos esenciales a corto plazo mientras se planifica una expansión futura mal definida. Tal es casi siempre el caso cuando se diseña la arquitectura para un sistema de televisión por cable. Las muchas variantes ahora desplegadas son testimonio del ingenio de diferentes diseñadores. Por lo tanto, esta sección se centrará más en las compensaciones entre las opciones que en comparar arquitecturas completas.

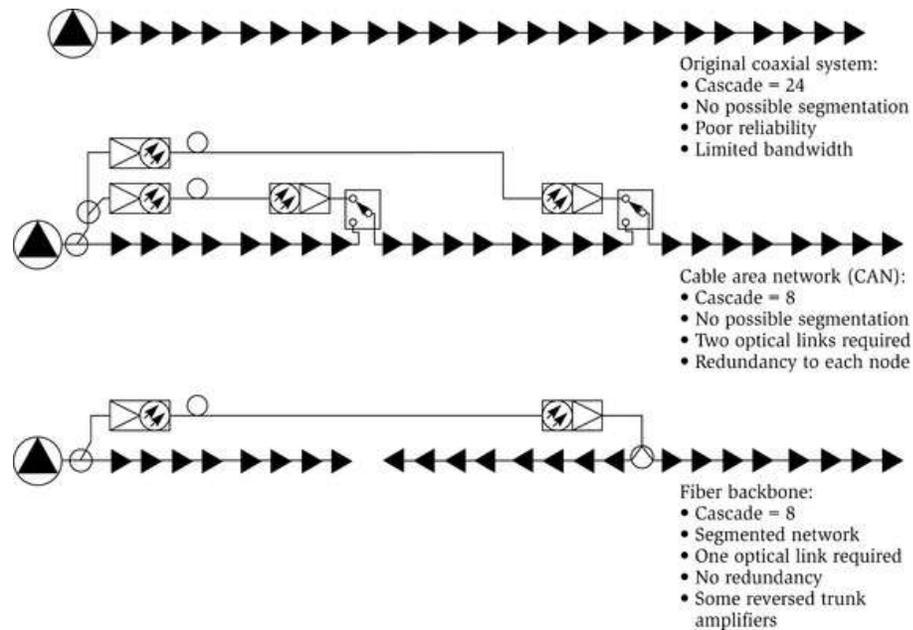
Los requisitos básicos son los mismos para cualquier arquitectura:

- La calidad técnica de fin de línea debe cumplir con los estándares corporativos. Como mínimo, debe cumplir con los niveles de rendimiento definidos por la FCC con un margen suficiente para cubrir las variaciones de funcionamiento normales.
- La fiabilidad y disponibilidad deben ser adecuadas para los servicios que se van a ofrecer.
- El ancho de banda debe ser suficiente para ofrecer todos los servicios a todos los clientes. Como cuestión práctica, el ancho de banda disponible se dividirá entre las señales comúnmente entregadas y las entregadas a clientes específicos sobre una base de demanda.

- El número de clientes potenciales afectados por cualquier fallo de un solo elemento de red debe limitarse a aquellos que pueden ser razonablemente respondidos por la organización de servicio al cliente.
- La inversión de capital inicial debe ser lo más pequeña posible, de acuerdo con la entrega de la lista inicial de servicios al número inicial de clientes existente o previsto.
- La red debe ser capaz de una expansión rentable para ofrecer servicios adicionales, para responder a una mayor utilización de los servicios definidos inicialmente y para responder a una mayor penetración entre los hogares pasados. Esto es especialmente cierto cuando el operador no es el operador actual con una base de clientes establecida. Este requisito se conoce como escalabilidad, los mejores diseños permiten una escalabilidad específica para servicios individuales y áreas geográficas específicas.

Una de las primeras arquitecturas HFC en desarrollarse fue la red de área de cable, CAN, concebida como una estrategia de reconstrucción para redes coaxiales más antiguas. El principal se ilustra en la figura 48. Los links de fibra óptica del headend se utilizaron para transmitir el espectro común a los nodos seleccionados insertados a intervalos regulares en una antigua red de distribución coaxial. Esto acortó efectivamente las cascadas, lo que permitió que el sistema se actualizara a un mayor ancho de banda RF. La fiabilidad, que se mejoró acortando la cascada, se mejoró aún más al dejar la red coaxial entre los nodos en su lugar como respaldo en caso de que un hilo de fibra o transmisor fallara.

Figura 49. Estructura básica de la red de fibra



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
Consulta: julio de 2020.

Aunque se actualizaron varios sistemas utilizando la arquitectura CAN, estaban limitados por estar restringidos a una línea de canales común. De hecho, la arquitectura fue útil principalmente como un mecanismo para la expansión del ancho de banda de costo mínimo y la mejora de la confiabilidad.

El primer paso hacia arquitecturas de fibra verdaderamente innovadoras fue similar a la arquitectura CAN, excepto que, en lugar de simplemente insertar nodos en una cascada de amplificador existente, se realizó una mayor reducción en cascada alimentando ambas direcciones desde los nodos. Esto fue originalmente conocido como una columna vertebral de fibra y, al igual que CAN, fue propuesto como una estrategia de actualización del sistema rentable. Se

convirtió en favor sobre CAN porque, aunque perdió la característica de redundancia, se necesitaban muchos menos enlaces de fibra para una reducción dada en cascada y los links de fibra eran percibidos como altamente confiables.

La diferencia crítica, sin embargo, era que la arquitectura de la estructura básica de fibra había creado la capacidad de programar nodos de forma independiente, creando así una red estelar simple.

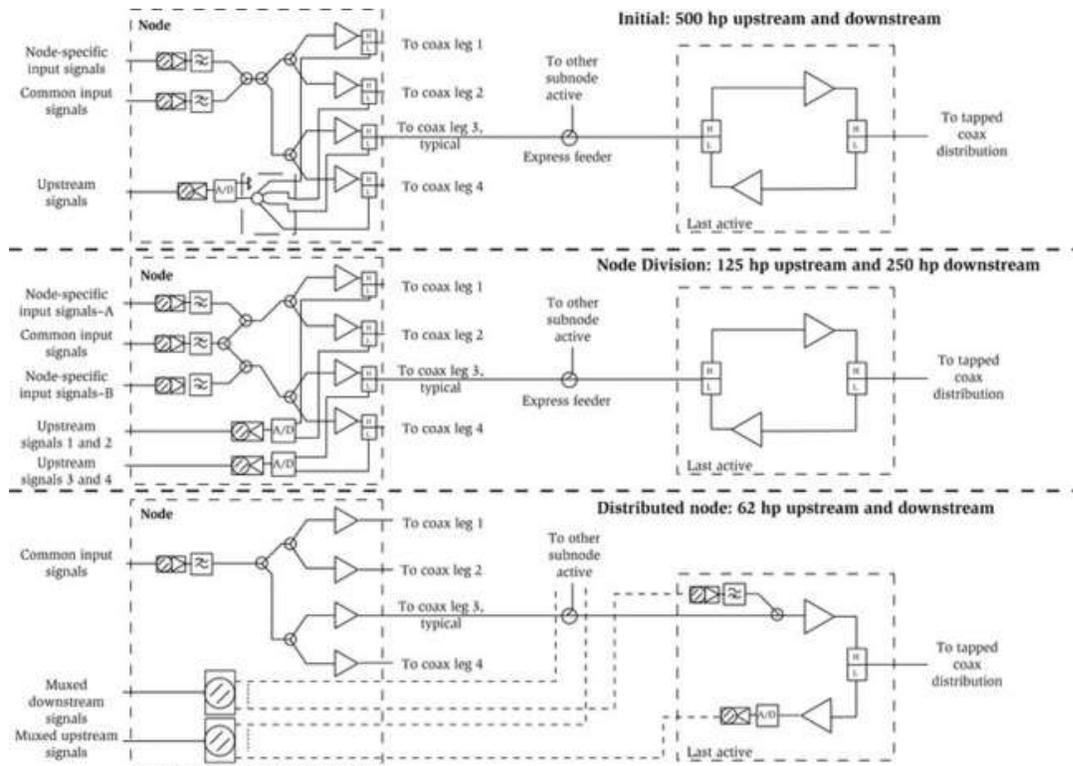
3.4.1. Tamaño del nodo

Un componente básico en cualquier arquitectura HFC es el nodo, donde las señales ópticas se detectan y se lanzan en cables de distribución coaxiales, y la subred de distribución coaxial que se extiende desde allí a los clientes. Una decisión importante que limita fundamentalmente el ancho de banda efectivo por cliente es el número de clientes potenciales atendidos por cada nodo.

A medida que el costo de los cables de fibra, transmisores y receptores ha disminuido y el rendimiento ha mejorado, los tamaños de nodo económico más pequeños han disminuido continuamente. Con nodos suficientemente pequeños, se ha vuelto práctico ofrecer servicios específicos para suscriptores con un uso intensivo de ancho de banda, como telefonía, módems de alta velocidad y vídeo bajo demanda. Los anchos de banda RF de 870 MHz combinados con los nodos de 500 hogares son comunes para la nueva construcción, pero muchos diseños requieren nodos mucho más pequeños, con un continuo de allí a los diseños de fibra a la curva, FTTC, que utilizan caídas individuales a los clientes del nodo. También son comunes los diseños en los que se alimentan múltiples patas de distribución coaxial desde una ubicación de nodo común, con el nodo configurado para que se pueda dividir eléctricamente en nodos lógicos separados, uno para cada tramo de distribución.

La figura 50, muestra un ejemplo de un plan de división de área de servicio de tres pasos que utiliza capacidades evolutivas integradas en algunos nodos de los fabricantes. Como se instaló inicialmente, un receptor óptico detecta las señales analógicas comúnmente entregadas y el otro detecta señales específicas del nodo. Después de la combinación de RF, la salida se divide para alimentar las cuatro patas de salida coaxiales, cada una de las cuales está diseñada para entregar señales a aproximadamente 125 hogares. Cada rama consiste en un alimentador express seguido de un amplificador que impulsa los cables de distribución roscados. En la dirección ascendente, las cuatro patas se combinan en RF y se alimentan a una entrada de un convertidor A/D compartido, seguido de un transmisor ascendente. Por lo tanto, el tamaño del nodo es 500 hogares en ambas direcciones. Se requieren tres fibras activas.

Figura 50. Escalado de nodos



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>
 Consulta: julio de 2020.

En el primer nivel de escalado, se agrega un segundo receptor descendente específico del nodo y se cambia la configuración descendente para crear dos nodos virtuales descendentes de 250 hogares, y se agrega un segundo módulo de convertidor/transmisor ascendente de dos entradas o un A/D de cuatro entradas utilizado ambos están disponibles comercialmente para crear cuatro nodos virtuales ascendentes de 125 hogares. Esta asimetría es coherente con las predicciones de que el ancho de banda ascendente se saturará antes que el ancho de banda descendente. Se requieren cinco fibras para soportar esta configuración, a menos que se utilice WDM. Esta es una actualización muy

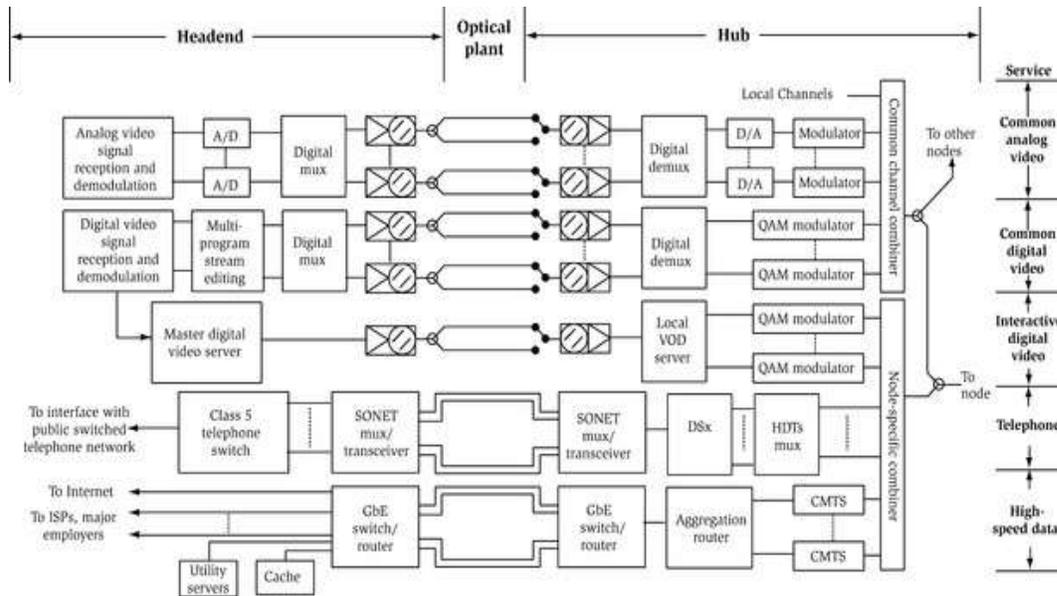
rentable, ya que solamente los módulos en el nodo, y el equipo de cabecera que corresponde, necesitan ser cambiados.

En el tercer nivel de evolución, las fibras son las líneas discontinuas en la figura, se une sobre el alimentador expreso a cada ubicación del amplificador. Los receptores ópticos se añaden allí solamente para la programación específica del nodo, con la potencia y las señales comunes viajando sobre el link coaxial. Hay varias opciones para la división de nodos ascendentes. En este ejemplo, los transmisores CWDM se agregan en cada ubicación del amplificador y un multiplexor CWDM en la ubicación original del nodo. En el supuesto de que en última instancia se requieren ocho amplificadores para servir el área de servicio de 500 hogares, el tamaño final del nodo virtual se ha reducido a aproximadamente 62 hogares. Con los dispositivos CWDM descendentes y ascendentes en la ubicación del nodo original, tan pocas como tres fibras del concentrador serían suficientes para soportar este nivel de división.

3.4.2. Arquitectura distribuida

En la figura 51, es un diagrama simplificado que muestra una arquitectura distribuida típica que ilustra las compensaciones posibles. Para mantener el diagrama despejado, las trayectorias ascendentes de los suscriptores no se muestran explícitamente. Debe entenderse, sin embargo, que terminan en el concentrador y se enrutan al equipo de servicio apropiado. Además, no se muestran los nodos de alimentación de los transmisores ópticos. La arquitectura distribuida se caracteriza de la siguiente manera.

Figura 51. **Arquitectura Headend-hub con procesamiento distribuido**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James, *Broadband Cable Access Networks*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>

Consulta: julio de 2020.

Todas las señales entre la cabecera y los concentradores se transmiten en banda base, forma digital, por lo que se eliminan las limitaciones de distancia.

Cada concentrador crea su propio espectro FDM para nodos locales, lo que permite personalizar la alineación a nivel regional por ejemplo, para canales de acceso públicos, educativos y gubernamentales e inserción de publicidad regionalizada.

La interacción electrónica directa del suscriptor tiene lugar en los hubs. Las funciones headend incluyen interfaces de mundo exterior, adquisición y manipulación de señal maestra, control de contenido maestro para servicios de video interactivos y funciones de monitoreo de red.

Dentro de esa descripción general, sin embargo, muchas variaciones son posibles. Por ejemplo, el diagrama muestra el ruteo diverso entre dos puntos, de hecho, una configuración de anillo se utiliza generalmente que conecta varios concentradores. En ese caso, se emplea alguna combinación de anillo repetido y roscado, dependiendo de la naturaleza de las señales. Además, el diagrama muestra transceptores ópticos independientes para cada categoría de servicio, aunque un operador puede optar por dividir el ancho de banda de los transceptores compartidos entre varios servicios. Por ejemplo, un transceptor SONET puede ser particionado para llevar los servicios DSx y los servicios Ethernet gigabit. Finalmente, aunque se muestra un solo headend maestro, de hecho, se pueden utilizar múltiples cabeceras para la redundancia y/o porque es más eficiente centralizar el equipo para servicios específicos en diferentes ubicaciones.

3.4.3. Arquitectura centralizada

En la figura 52, es un ejemplo de la red de distribución óptica en una arquitectura centralizada. Como se puede ver, se caracteriza por:

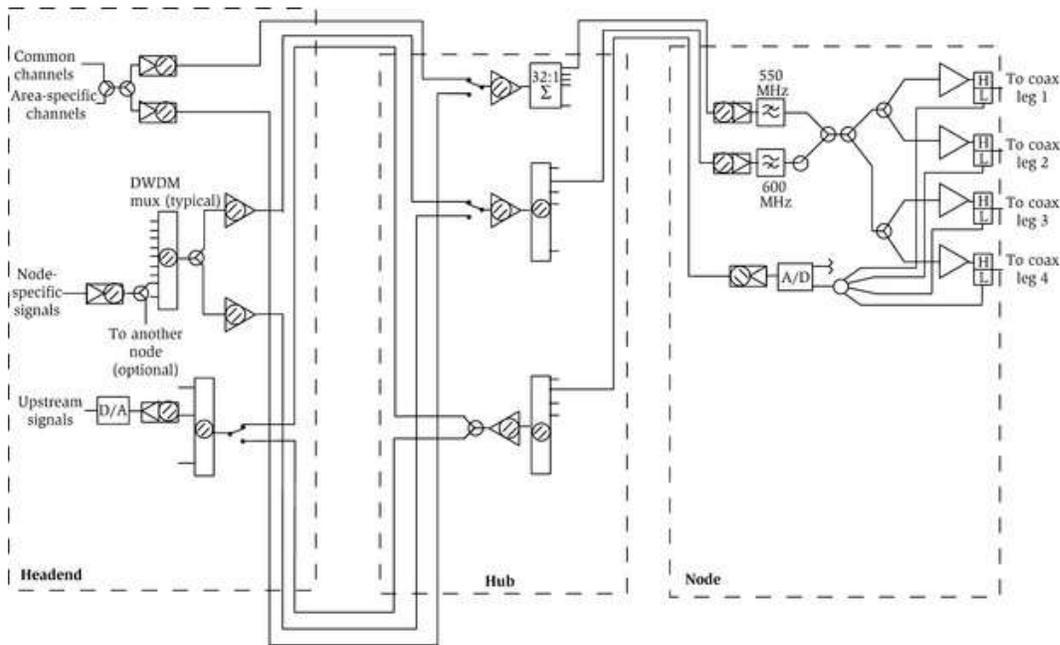
Procesamiento separado de señales descendentes comúnmente distribuidas o más exactamente, específicas del área, ya que algunos canales generalmente variarán de una ciudad a otra en un área metropolitana, señales descendentes específicas de nodos y señales ascendentes. Generación de señales específicas del nodo a nivel de cabecera.

Transporte redundante analógico, modulado por QAM de señales específicas del nodo de cabecera a concentrador óptico utilizando DWDM para reducir el número de fibras necesarias.

Transporte redundante analógico, modulado por banda base de señales ascendentes desde el concentrador hasta la cabecera utilizando DWDM.

Un concentrador totalmente óptico, sin señales de RF o banda base, excepto para la supervisión del estado flexibilidad en el escalado de cada servicio interactivo dentro de la cabecera.

Figura 52. **Arquitectura centralizada headend – hub node**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Broadband Cable Access Networks*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>

Consulta: julio de 2020.

La arquitectura de transporte óptico utiliza un transmisor modulado externamente y una fibra dedicada para las señales de vídeo moduladas por analógico. En el concentrador, la señal se amplifica ópticamente y se divide 32 veces, con una pierna alimentando cada nodo en una fibra dedicada. Dos

transmisores de cabecera impulsan fibras separadas en la configuración del anillo de vaina para proporcionar redundancia contra el transmisor y la falla del cable óptico. El DWDM no es una opción para este link porque los mecanismos de la interrogación cruzada darían lugar a la interferencia por debajo de las especificaciones del sistema. Los transmisores modulados directamente no son igualmente una opción, porque se lleva más de una octava y la modulación autofásica que interactúa con la fibra resultaría en una distorsión grave de la OSC.

Las señales QAM modulan directamente los transmisores DFB que se combinan utilizando DWDM de 16 longitudes de onda entre headend y hub. Allí, la señal combinada se amplifica y las longitudes de onda luego se separan, con una segunda fibra dedicada alimentando un receptor separado en cada nodo. Puesto que se lleva menos de una octava y la salida del detector QAM se filtra antes de combinarse con el espectro de vídeo analógico, la distorsión de segundo orden no es un problema. Los mecanismos de interferencia son un factor para determinar el C/N de fin de línea, pero es posible lograr una especificación del sistema de fin de línea de 40 dB, adecuada para señales QAM de 256.

Hay otras opciones que un ingeniero de sistemas debe considerar al decidir sobre una arquitectura para las señales descendentes. Estos son algunos ejemplos. Las señales comunes y específicas del nodo podrían haberse combinado en el headend y utilizarse para modular un transmisor modulado externamente para cada nodo. Esto requeriría menos receptores de nodo, pero transmisores más caros, así como una fibra dedicada para cada nodo.

3.4.4. Comparación de arquitecturas

Centralizada	Distribuida
La capa de acceso es el nivel más bajo en la jerarquía de red, es la capa que conecta con los dispositivos finales o suscriptores	Esta arquitectura debe de distribuir funciones de la capa de acceso en las ubicaciones de los nodos.
Este tipo de arquitectura utiliza la red HFC para proveer de conexión de fibra óptica al nodo	En esta arquitectura se requiere una conexión una conexión óptica entre el headend y el nodo
Los dispositivos de procesamiento, distribución y accesos se encuentran centralizados en un mismo Hub.	Reduce los requisitos de espacios, energización y refrigeración en el hub.
Se requiere mantenimientos preventivos y correctivos periódicos para mantener la distribución de señales eficientemente	En esta arquitectura se tiene una reducción en la cantidad de mantenimientos.
La seguridad es otro factor importante a considerar en esta arquitectura para apostar por un enfoque centralizado	Para las implementaciones se necesitan más técnicos cuentan con las herramientas y los conocimientos necesarios para trabajar con fibra óptica debido al aumento radical de su implementación
La ubicación centralizada de la cabecera se puede cerrar de forma segura y el acceso se puede monitorizar de cerca para evitar robos y sabotajes en los equipos y los datos.	Puede implementarse de forma gradual con actualizaciones de planta normal y servicio, y sin interrumpir los servicios heredados.

3.4.5. Generación de video análogo

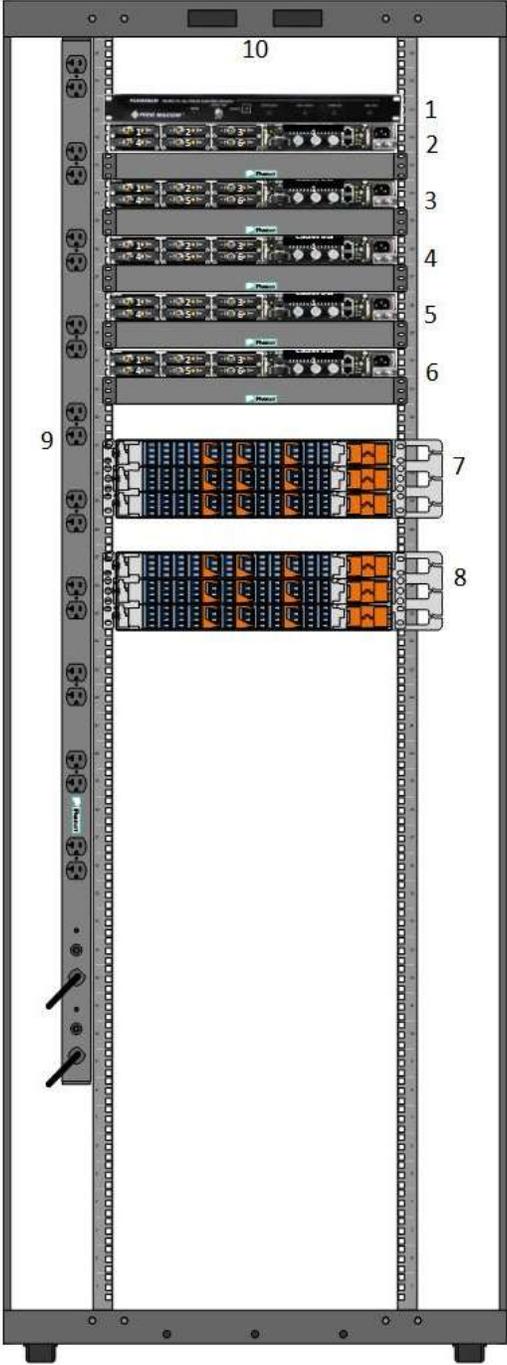
En muchos casos en los hubs de los proveedores de servicios para la generación de video análogo se utilizan los equipos llamados cablevista, estos dispositivos tienen la capacidad de manipular las señales análogas de TV y poder transmitirlos a los usuarios finales. Estos equipos son implementados en la planta interna de los proveedores de servicios, en la mayoría de los casos se realiza la construcción de cableado y conexión RF del RF Manager de generación de video análogo desde las plataformas de video hasta la combinatoria de broadcast análogo. Como se muestra en la figura 53.

Los equipos cablevista son los dispositivos que decodifican y modulan las señales análogas enviadas desde el headend para canales NTSC o PAL en un chasis compacto de 1RU, el cablevista proporciona un alto grado de flexibilidad con las numerosas funciones de redundancia y componentes intercambiables según la necesidad de cliente, además de tener un software flexible para su configuración. Los cablevistas cuenta con 6 puertos de salida tipo F para cableado coaxial, en la generación de video análogo para un proveedor de servicios estándar, se necesitan 6 equipos cablevistas para realizar la generación de video análogo como se detalla en la figura 53.

El cableado resultante de la conectorización de los seis puertos de cada cablevista, se interconecta con los combinadores 8:1 que están en el RFM Broadcast, y la salida de cada combinador a su vez se conecta a al combinador 4:2, con este proceso se logra la multiplexación de todas las señales, y obtener una sola señal análoga. Luego de este paso, dentro del hub se tiene el RFM Activo de Broadcast, el cual nos permitirá la distribución de una señal 100 % análoga, este RFM Activo este compuesto por una tarjeta switch y 2 amplificadores de señal. se conecta la salida del combinador 4:2 y la entrada del

switch del RFM Activa, y la salida se conecta a la entrada de Spliter 8:1, como lo mencionamos anteriormente con esto se obtiene un RFM con señal 100 % Análogo para la distribución dentro del Hub.

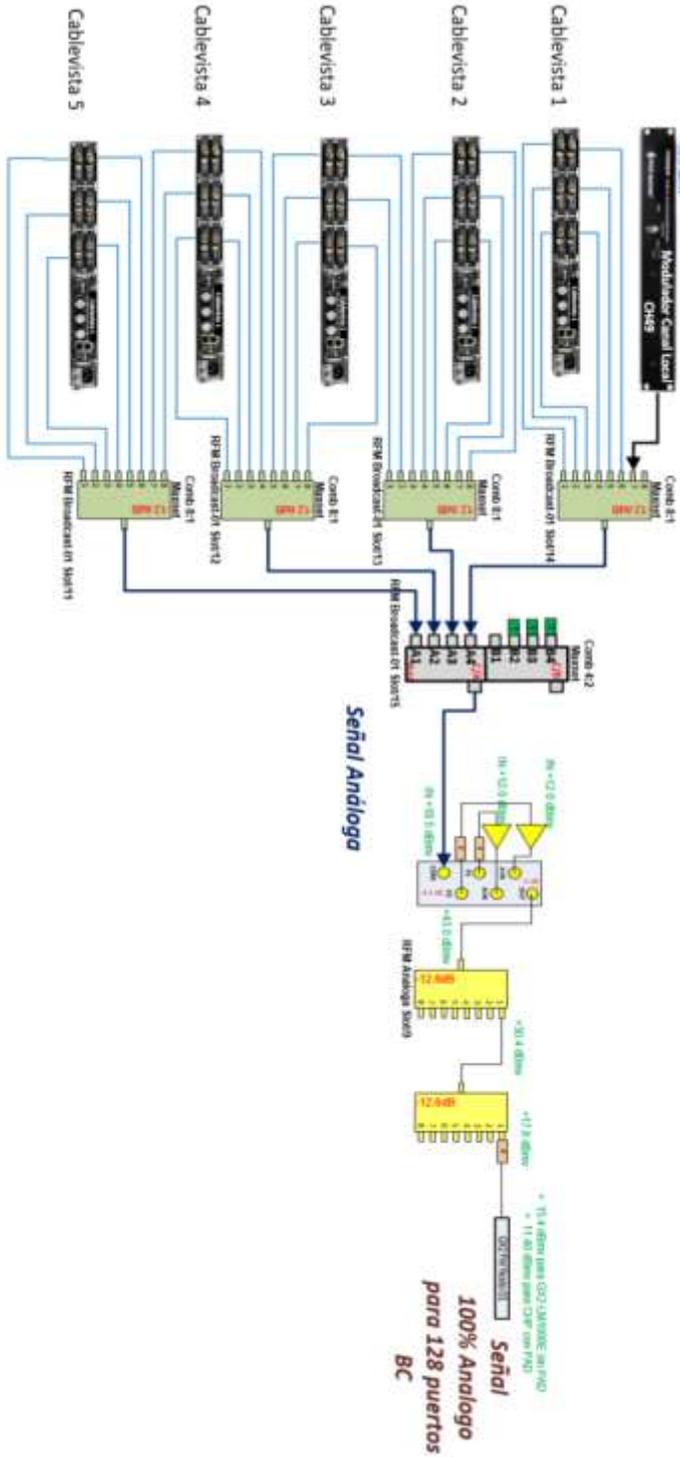
Figura 53. Diagrama facial de video analógico



- 1 -Modulador
- 2- Cablevista 1
- 3- Cablevista 2
- 4- Cablevista 3
- 5- Cablevista 4
- 6- Cablevista 5
- 7- RFM Combinatoria A+D
- 8- RFM Analogo 100%
- 9- PDU
- 10- RACK 42U

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio.

Figura 54. Video análogo



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio.

3.4.5.1. Características de TV análoga

- Los receptores de señales de tv análoga se tienen integrada de forma estándar en los televisores convencionales.
- El usuario final puede realizar múltiples conexiones a distintas TV.
- No se necesita de decodificadores para la reproducción de las señales.
- Las transmisiones analógicas presentan problemas de ruido en la imagen, dobles imágenes, colores deficientes y sonido de baja calidad cuando se tienen interferencia.
- Tienen un formato de video limitado con una relación de aspecto de 4:3.
- La resolución más alta que puede tener un televisor análogo es de 512x400.
- Los formatos disponibles para la tv análoga son 480 p y 5 716 p, son conocidos como definición estándar.
- La tecnología de tv análogo solo permite la transmisión de un único programa de televisión por canales UHF.

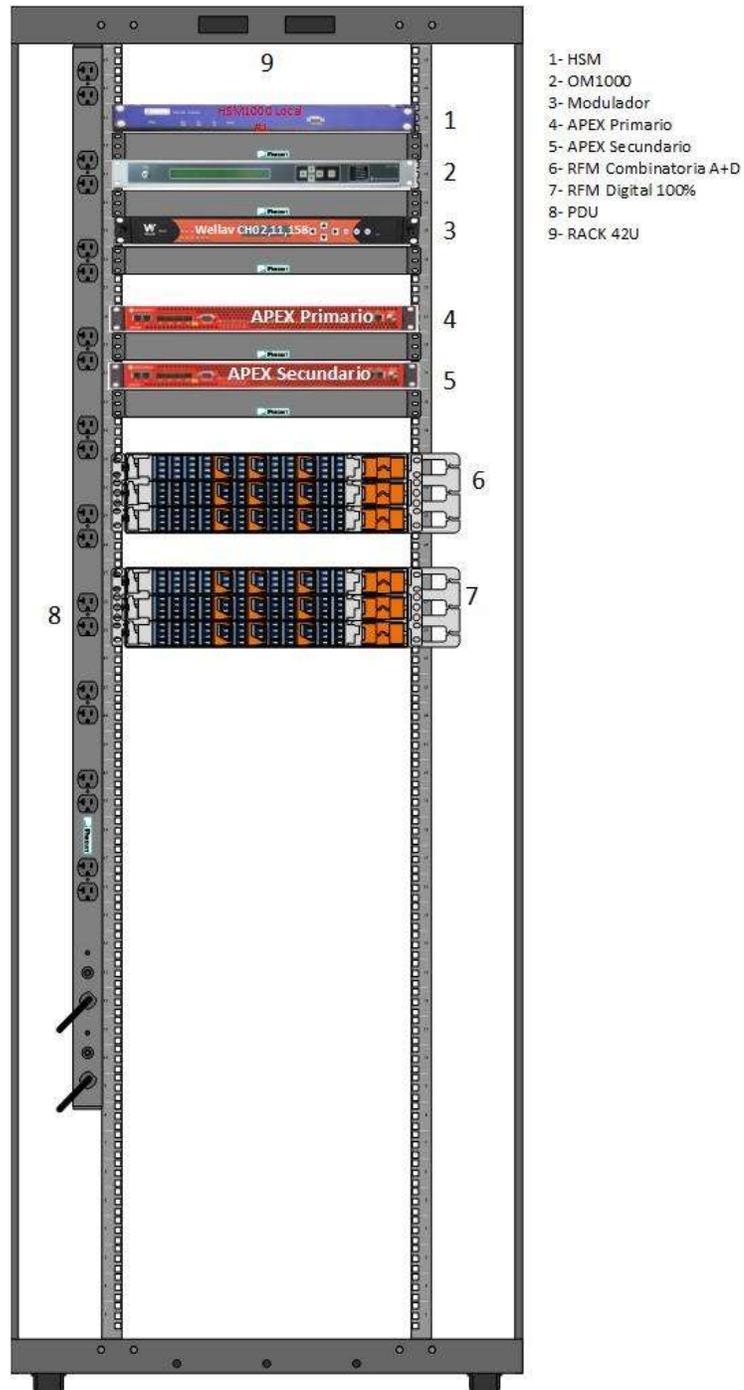
3.4.6. Generación de video digital

En muchos casos en los hubs de los proveedores de servicios para la generación de video digital se utilizan llamados APEX, estos equipos tienen la capacidad de manipular las señales digitales de TV y poder transmitirlos a los usuarios finales. Estos equipos son implementados en la planta interna de los proveedores de servicios, en la mayoría de los casos se realiza la construcción de cableado y conexión RF del RF Manager de generación de video digital desde las plataformas de video hasta la combinatoria de broadcast digital.

Los equipos APEX son los dispositivos que decodifican y modulan las señales digitales enviadas desde el headend para canales QAM que son utilizados para VOD, y otros servicios de broadcast de TV en un chasis compacto de 1RU, el APEX ofrece varios tipos de Módulos QAM intercambiables según la necesidad de cliente. Estos equipos cuentan con 6 puertos de salida tipo F para cableado coaxial, en la generación de video Digital para un proveedor de servicios estándar, se necesitan 2 equipos APEX para realizar la generación de video digital como se detalla en la figura 54.

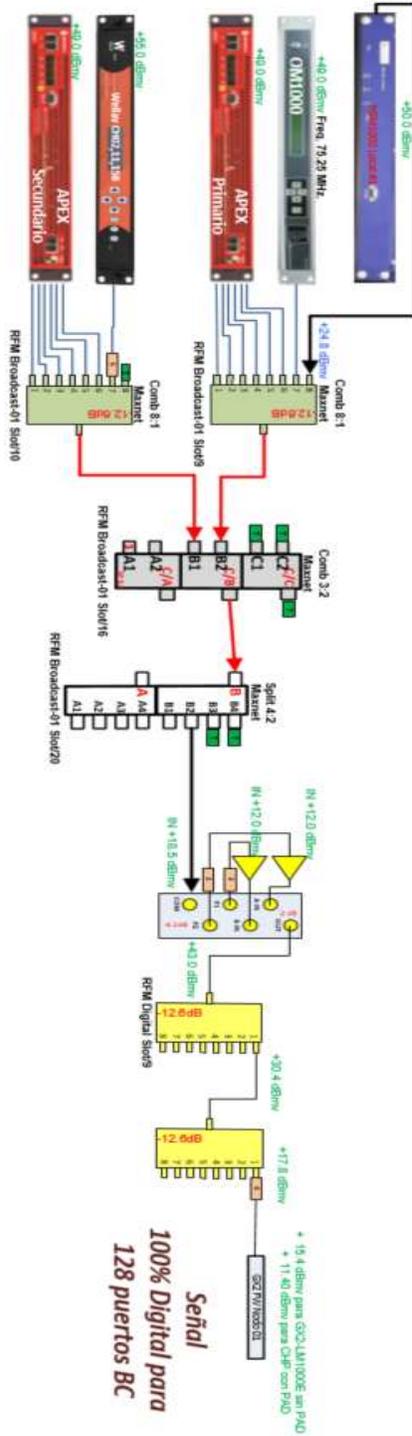
El cableado resultante de la conectorización de los seis puertos de cada APEX, se interconecta con los combinadores 8:1 que están en el RFM Broadcast, y la salida de cada combinador a su vez se conecta a al combinador 3:2, con este proceso se logra la multiplexación de todas las señales, y obtener una sola señal digital. Luego de este paso, dentro del hub se tiene el RFM Activo de Broadcast, el cual nos permitirá la distribución de una señal 100 % digital, este RFM Activo este compuesto por una tarjeta switch y 2 amplificadores de señal. se conecta la salida del combinador 4:2 y la entrada del switch del RFM Activa, y la salida se conecta a la entrada de Spliter 8:1, como lo mencionamos anteriormente con esto se obtiene un RFM con señal 100 % Digital para la distribución dentro del Hub.

Figura 55. Diagrama facial de video digital



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio.

Figura 56. Video digital



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio.

3.4.6.1. Características de TV digital

- La transmisión y recepción de imagen y sonido se realiza por medio de señales digitales.
- La televisión digital codifica sus señales de forma binaria, lo cual permite la habilitación de la comunicación de retorno entre el consumidor y el proveedor de servicios, teniendo la posibilidad de crear aplicaciones interactivas.
- Se necesitan sintonizadores o decodificadores para reproducir las señales de video.
- Por el aprovechamiento del ancho de banda se puede tener una mayor calidad audiovisual.
- La imagen, sonido y datos asociados a la emisión de señales de tv se codifican digitalmente, para la resolución estándar se suele utilizar el formato MPEG-2.
- Tiene un formato de video con relación de aspecto hasta 16:9.
- La resolución que puede tener la tv digital puede tener formatos 720p y 1080p, son conocidos como alta resolución.
- La codificación digital de las señales de TV permite que en el ancho de banda disponible en un solo canal UHF se pueda transmitir múltiples canales a alta calidad de definición.

4. CALIDAD DE SERVICIOS

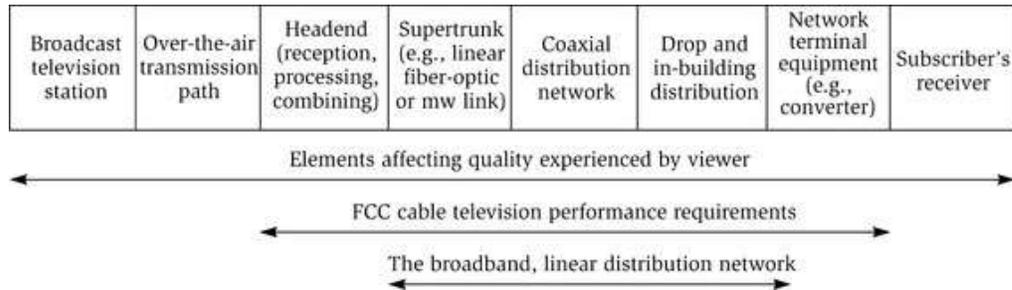
4.1. Distorsión y ruido en sistemas de distribución

En las distintas partes de los sistemas de distribución de los proveedores de servicios, desde la distribución de banda ancha, troncales, coaxial e implementaciones hacia el usuario final, deben de trabajar juntas para proporcionar una ruta de transmisión cuyo rendimiento permita la entrega de señales de calidad adecuadas para el usuario final.

Para lograr alcanzar este objetivo, significa que se deben definir los requisitos de rendimiento total del sistema y la degradación o atenuación de la señal permitida dentro un margen de error entre la generación de la señal, procesamiento en las cabeceras, sistema de distribución y los equipos terminales.

Para la comprensión de cómo se relacionan los estándares de rendimiento, es de gran importancia determinar todas las etapas que se ven involucrados desde la generación de señal hasta el usuario final. Los componentes tendrán variaciones que dependen del tipo de servicio que se estará distribuyendo, algunas señales pueden ser generadas en el headend o en hubs más cercanos al suscriptor final. Como se muestra en la figura 55, este es un ejemplo de los elementos que forman parte de la cadena de transmisión a través de los cuales se puede enviar una señal de video analógica o digital.

Figura 57. **Etapas de transmisión y medidas de rendimiento**



Fuente: LARGE, David y FARMER, James. *Modern Cable Television Technology*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/modern-cable-television/9781558608283/>
 Consulta: octubre de 2020.

La fuente de video en esta estructura está dada por una Broadcast television station, Estación de broadcast televisión, la degradación de la fuente incluye ciertos niveles de ruido blanco, interferencia, distorsión del transmisor y posiblemente ruido cuantificador si el vídeo o audio ha sido digitalizado en cualquier parte del proceso. La trayectoria desde el origen al headend, si el headend está recibiendo la señal por medio de una trayectoria de transmisión normal, se tiene probabilidad de agregarse a la señal base una distorsión multitrayecto, las variaciones de la respuesta de frecuencia debido a las características de la antena receptora, la interferencia de ruido eléctrico y otros factores.

Dentro del headend o hub, la señal puede ser demodulada, digitalizada, amplificada o combinada con otras señales. En casos especiales las señales pueden recibirse en una ubicación diferente a donde finalmente se combinan con el espectro RF para realizar la transmisión a los clientes finales, añadiendo capas adicionales de procesamiento.

El espectro de frecuencias completo entra en la red de distribución por fibra óptica o coaxial, donde en la mayoría de casos se tienen la probabilidad de añadir ruido, distorsión, modulación cruzada y retardos a la señal que se está transmitiendo

Las señales de vídeo analógicas pueden estar conectadas directamente a los receptores de los suscriptores, o pueden pasar a través de un dispositivo de terminación de red, como un terminal de decodificador analógico o digital. Si una señal pasa a través de una terminal establecida, puede ser demodulada, descodificada y remodulada, cada una de ellas un proceso imperfecto.

Por último, el propio receptor de televisión del suscriptor añadirá una medida de degradación. Además del ruido y la distorsión, puede estar inadecuadamente blindado de modo que las señales fuera del aire se mezclen con las señales entregadas por cable, creando una forma especial de interferencia.

4.2. Calidad de servicio

Otro parámetro tecnológico de interés es QoS, Quality of Services. QoS tiene varias dimensiones e incluye la probabilidad de que un mensaje llegue por error, el retraso en la recepción de un mensaje, así como la calidad de sonido o vídeo percibida por un usuario final.

Los errores en las comunicaciones pueden dar lugar a llamadas caídas, requisitos de retransmisión, pérdida de datos y, por lo tanto, calidad degradada. Los retrasos excesivos también pueden contribuir a la pérdida de datos, o la interrupción temporal de la reproducción y, por lo tanto, la mala calidad. La calidad de la reproducción de audio y vídeo también puede verse afectada por las técnicas de codificación de fuentes y la fidelidad de reproducción. Todos ellos

contribuyen a la QoS y a la calidad de la experiencia y, por lo tanto, pueden ser importantes en la comparación de dos sistemas de telecomunicaciones de banda ancha.

El retraso es de particular importancia para muchos sistemas de comunicaciones de datos. El retardo de transmisión de la red de usuario es generalmente un factor de velocidad de propagación de ondas electromagnéticas. También es una función de la estructura del marco de datos y el mecanismo de control de una tecnología. El retardo de extremo a extremo es un parámetro significativo, ya que puede significar que algunos servicios no se pueden acomodar. Algunas aplicaciones como el correo electrónico y la navegación web pueden no ser tan sensibles al retraso, pero otras aplicaciones como los juegos de ordenador requieren retrasos cortos en el orden de unos pocos milisegundos.

El retardo de la capa de infraestructura es generalmente pequeño y de poca importancia, aunque el retardo del protocolo a medida que se empaquetan los datos puede afectar a las aplicaciones sensibles al retardo como el comercio de alta frecuencia o los juegos punto a punto.

Otra métrica importante es la calidad perceptiva del sonido y el vídeo. Estas son generalmente funciones de velocidad de transmisión, así como la probabilidad de pérdida de datos. Las técnicas de codificación de origen también contribuyen a la calidad de reproducción de los medios de transmisión. Los diferentes sistemas de telecomunicaciones de banda ancha se ven igualmente afectados por estos factores, aunque las tasas de transmisión que ofrece cada tecnología conducen a variaciones en la calidad perceptiva.

4.2.1. Definición de calidad de servicio

Tradicionalmente, QoS se abordaba principalmente desde la perspectiva de que el usuario final fuera una persona, con la capacidad de oír y ver y ser tolerante con algunas degradaciones de los servicios, por ejemplo, la baja relación de pérdida de paquetes es aceptable para la voz, mientras que el retardo de extremo a extremo para la voz debe ser inferior a 400 ms.

Pero con la llegada de nuevos tipos de comunicaciones donde los servicios pueden no requerir la entrega en tiempo real y donde el remitente o el usuario final puede no ser una persona, pero podría ser una máquina, es importante tener en cuenta que no todos los servicios son los mismos, e incluso servicios similares pueden ser tratados de diferentes maneras dependiendo de si son utilizados por máquinas o por humanos en uno o ambos extremos de los extremos de una sesión de comunicación o conexión determinada.

La calidad de servicio, tal como la define la UIT, es la totalidad de las características de un servicio de telecomunicaciones que asumen su capacidad para satisfacer las necesidades declaradas e implícitas del usuario del servicio. Definiciones similares de QoS son utilizadas por otras SDO en sus estándares. Sin embargo, desde el punto de vista de las telecomunicaciones/TIC, QoS es siempre una característica de extremo a extremo, que sin embargo se puede dividir en diferentes segmentos de red entre los extremos.

Sin embargo, la percepción del usuario final de un determinado servicio de telecomunicaciones/TIC también está influenciada por diferentes factores que pueden incluir tendencias sociales, publicidad, tarifas y costos, que están interrelacionados con la expectativa del cliente de QoS. Por ejemplo, las tendencias sociales pueden ser en términos de dispositivos populares, servicios,

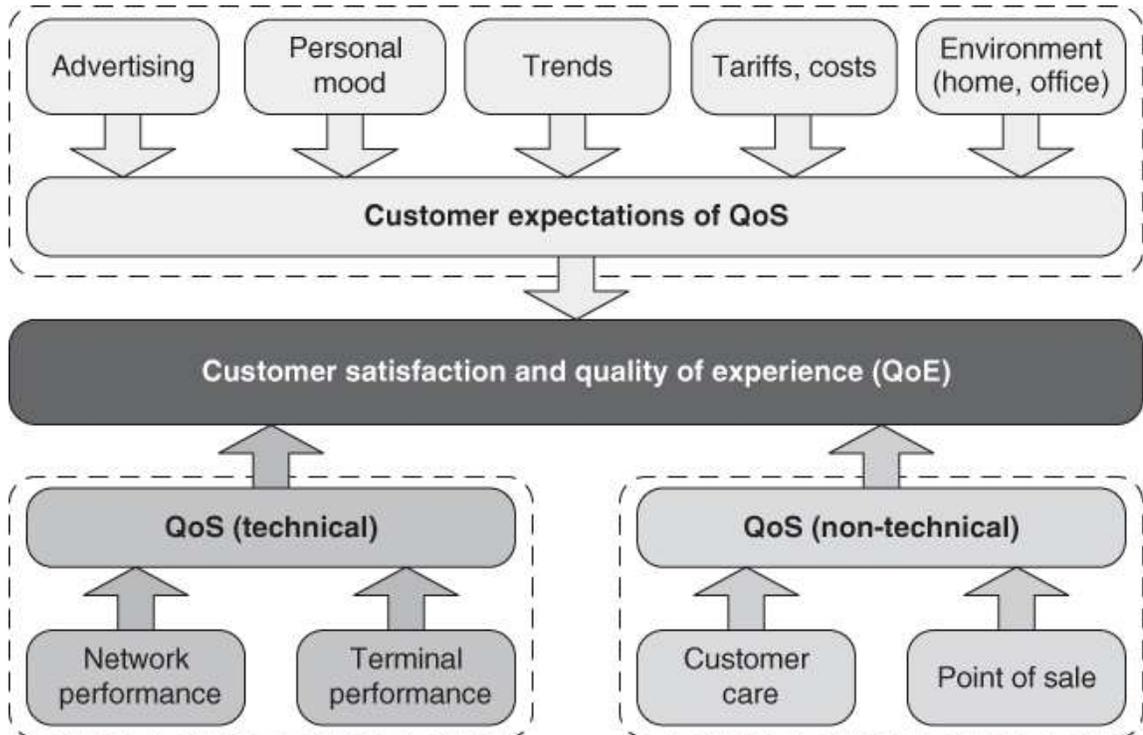
por ejemplo, algunos servicios son más populares que otros servicios similares a través de Internet, aplicaciones, por ejemplo, hay diferente popularidad de diferentes aplicaciones en sus ecosistemas.

Además, la percepción del usuario final de QoS no se limita únicamente a las características objetivas en la interfaz hombre-máquina. Para los usuarios finales, QoS se refiere a la calidad que experimentan personalmente durante el uso de un servicio de telecomunicaciones determinado.

El usuario final puede estar satisfecho con la QoS de un servicio determinado en un momento determinado y el mismo usuario puede no estar satisfecho con el mismo servicio 10 años en el futuro. Por ejemplo, cuando un usuario se adapta a una mayor resolución de TV o streaming de vídeo debido a velocidades de bits más altas en las redes de acceso, el mismo usuario aumentará las expectativas de dicho servicio, es decir, transmisión de TV o vídeo.

En la figura 56, se muestra cómo QoS depende de los aspectos técnicos de extremo a extremo, que incluyen el rendimiento de la red y el rendimiento del terminal, y aspectos no técnicos aquellos que no están directamente relacionados con el equipo, que incluyen atención al cliente y punto de venta.

Figura 58. **Puntos de vista técnicos y no técnicos para la calidad de servicio**



Fuente: JANEVSKI, Toni. *QoS for Fixed and Mobile Ultra-Broadband*.
<https://learning.oreilly.com/library/view/qos-for-fixed/9781119470502/>
Consulta: enero de 2021.

4.3. Calidad de la experiencia

Inicialmente QoE se definió como la aceptabilidad general de una aplicación o servicio, tal como lo percibió subjetivamente el usuario final.

Se ha sustituido la definición de QoE desarrollada en 2007 por una nueva definición adoptada en 2016, que actualmente es la definición real de QoE dada

de la siguiente manera. La calidad de la experiencia es el grado de deleite o molestia del usuario de una aplicación o servicio.

Sin embargo, hay una observación que hay una investigación continua sobre el tema QoE, por lo que se espera que la definición evolucione aún más. En cuanto al QoE hay dos temas que deben abordarse junto con la definición:

Factores de influencia de QoE. Incluyen el tipo y características de la aplicación o servicio, el contexto de uso, las expectativas del usuario con respecto a la aplicación o servicio y su cumplimiento, los antecedentes culturales del usuario, cuestiones socioeconómicas, perfiles psicológicos, estado emocional del usuario, y otros factores similares.

Evaluación de QoE. Este es el proceso de medir o estimar el QoE para un número determinado de usuarios finales de una aplicación determinada o un servicio. La evaluación se basa típicamente en un procedimiento establecido, y teniendo en cuenta todos los factores importantes que influyen. La salida de la evaluación QoE puede dar lugar a un valor escalar, varias representaciones multidimensionales de los resultados, así como descriptores verbales. En teoría, todas las evaluaciones de QoE deben ir acompañadas de la descripción de los factores de influencia que se incluyen.

4.4. Rendimiento de la red

El rendimiento de la red difiere de QoS porque se relaciona solamente con la parte de la red del aprovisionamiento del servicio, sin tener en cuenta diversos factores que influyen el usuario. Por un lado, QoS es el resultado de la experiencia del usuario de utilizar un servicio dado y la percepción del usuario de

él, mientras que en el otro lado el NP está determinado por las prestaciones de los elementos de red uno por uno, o por el rendimiento de la red en su conjunto.

Por lo tanto, el NP tiene una influencia en QoS, y representa una parte de él. Sin embargo, QoS no es influenciado solamente por el NP sino también por los parámetros de rendimiento que no son de red. Dicho simplemente, QoS consiste en el rendimiento de la red y la experiencia del usuario.

El concepto NP se aplica con fines puramente técnicos, es decir, para la evaluación y el análisis de las funciones técnicas. NP es la capacidad de una porción de red o de toda la red para proporcionar las funciones de QoS relacionadas con las comunicaciones entre los usuarios. El rendimiento de la red viene determinado por el rendimiento de los elementos de red uno por uno. El rendimiento de la red en su conjunto de extremo a extremo viene determinado por la combinación del rendimiento de todos los elementos individuales junto con sus interconexiones en la ruta de comunicación entre los dispositivos del usuario final.

4.5. Modelo de medición de rendimiento

El objetivo principal en el modelo de rendimiento es determinar los criterios más adecuados que se utilizan para definir los parámetros de QoS importantes tanto para los usuarios como para los proveedores. Se identificaron siete criterios básicos para el QoS como se muestra en la figura 59,

Figura 59. **Criterios QoS**

No.	Criterio QoS	Aplicando criterios de QoS en los Servicios de TV
1	Velocidad	Tiempo mínimo para la habilitación del servicio, tiempo necesario para resolución de problemas técnicos, retardo en la recepción de la señal
2	Precisión	Calidad de audio y video.
3	Disponibilidad	Áreas de cobertura, disponibilidad de servicio técnico para resolución de problemas, disponibilidad de servicio
4	Relación	Relación de llamadas a soporte técnico, número de casos de facturación/Problemas técnicos dentro de un período de tiempo específico
5	Seguridad	Protección y prevención del fraude
6	Simplicidad	Facilidad de actualizaciones de software o reemplazo de hardware, facilidad de procedimiento de cese de contrato
7	Flexibilidad	Opciones de cambio en el contrato, disponibilidad de diferentes métodos de facturación y pago del servicio

Fuente: elaboración propia, Microsoft Word.

Los criterios de calidad dados en la figura 59, se establecen en un conjunto de funciones de servicios, que incluyen la gestión de servicios como actividades de ventas y precontratos, prestación de servicios, soporte de servicio, reparación, y calidad de la conexión como el establecimiento de conexión, transferencia de información, liberación de conexión, facturación y gestión de redes o servicios por parte del cliente. La asignación entre las funciones de servicio y los criterios de calidad del servicio se conoce como modelo de rendimiento.

El QoE es influenciado por los siete criterios de QoS dados en el modelo de rendimiento. Por ejemplo, la velocidad afecta a las velocidades de bits disponibles y a las latencias, lo que es crucial para la experiencia del usuario final del servicio. La actualización a velocidades de bits de acceso más altas mejora el QoE general. Además, la disponibilidad y la fiabilidad también son muy importantes y están directamente relacionadas con la planificación y

dimensionamiento de la red, así como con sus funciones y procedimientos de operación y mantenimiento.

En este modelo de rendimiento de la Unión Internacional de Telecomunicaciones se basa en 4 puntos de vista para definir los parámetros de QoS, en estos se incluye tanto los aspectos de cliente y como de los servicios:

Requisitos del QoS del cliente: En este nivel el QoS es requerido directamente por el suscriptor, generalmente a estos usuarios no es de interés en cómo se les proporciona un servicio, sino en la calidad obtenida de extremo a extremo.

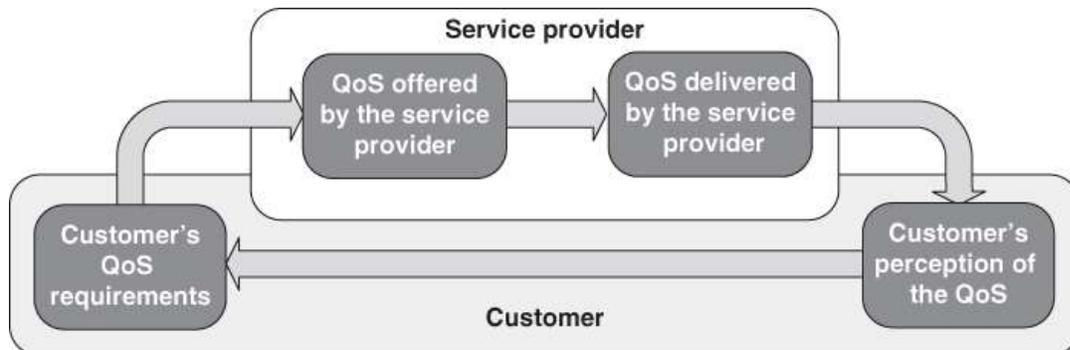
QoS ofrecidos por el proveedor: En este caso, es un compromiso establecido por el proveedor de servicios a los clientes sobre el QoS ofrecido para un determinado servicio. Para este punto de vista, usualmente se tiene un acuerdo del nivel de servicios, SLA, esto sirve como un contrato entre cliente y el proveedor de servicios. El QoS se puede dejar especificado en términos entendibles para el cliente y en términos técnicos para las implementaciones.

QoS alcanzado por el proveedor: Este punto de vista se refiere al nivel real QoS entregado exitosamente por el proveedor de servicios, para propósitos de análisis y comparación debe de expresarse en los mismos parámetros establecidos por el SLA ofrecidos al cliente.

Percepción de QoS del cliente: En este nivel de QoS, es el experimentado por el cliente, normalmente obtenido de las clasificaciones de usuario de la QoS proporcionada por el operador de servicio. Este es también un punto de vista del cliente, por lo que no se expresa en términos técnicos, sino en términos de grados

de satisfacción, la QoS percibida puede ser utilizada por los proveedores de servicios o reguladores para determinar la satisfacción del cliente,

Figura 60. **Puntos de Vista del QoS**



Fuente: JANEVSKI, Toni. *QoS for Fixed and Mobile Ultra-Broadband*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/qos-for-fixed/9781119470502/>

Consulta: enero de 2021.

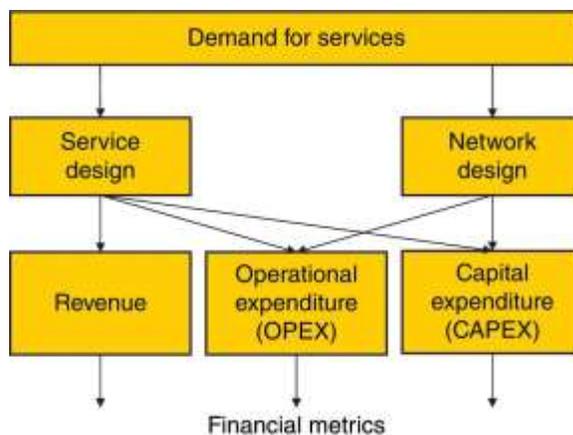
Como se muestra en la figura 58, se identifican los cuatro puntos de vista del QoS, los cuales son dependientes uno del otro siempre iniciando en los requerimientos o expectativas que el cliente espera recibir al tener un determinado servicio contratado.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. Riesgos financieros en telecomunicaciones

Una empresa o industria se caracteriza por la administración de usos costos y retornos de inversión. En el caso del sector de telecomunicaciones, los costos se ven relacionados al diseño y a la acumulación de redes e infraestructuras denominados gastos de capital y el mantenimiento de equipos o servicios contratados son conocidos como gastos operativos. Los beneficios o ingresos provienen de las tarifas y servicios pagados por los usuarios finales o suscriptores. En la figura 59, se muestra un análisis de flujo para una empresa típica en el campo de las telecomunicaciones.

Figura 61. Análisis de flujo



Fuente: ESMAILZADEHI, Riaz. *Broadband Telecommunication Technologies and Management*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-telecommunications-technologies/9781118995624/> Consulta: febrero de 2021.

La dinámica financiera para las empresas que están en la industria de las telecomunicaciones se diferencian principalmente en la inversión inicial requerida, así como el tamaño y demanda de servicios potenciales del mercado.

En este sector económico la capa de infraestructura se caracteriza por una importante inversión de costo fijo CAPEX en equipos de red y despliegue. En muchas ocasiones el sector privado tiene pocas posibilidades de realizar una inversión tan grande, en la mayoría de los proveedores de servicios en Latinoamérica inicialmente fueron financiadas por el sector gubernamental.

5.2. Análisis y propuesta de valor

Un producto puede ser analizado en función del valor que proporciona a un usuario final. Este valor se puede medir por lo que el usuario final está dispuesto a pagar por el producto y/o servicio. En esencia, el precio al que se puede vender un producto depende del valor que propone, cuanto mayor sea el valor percibido, más el precio.

Comprender el valor de un producto es fundamental para el análisis empresarial. El análisis de valor permite comprender los beneficios de un producto, cómo se pueden mejorar estos beneficios para aumentar los ingresos y cómo se puede administrar su rol. El análisis de valor se puede dividir en dos partes principales: propuesta de valor y configuración de valor.

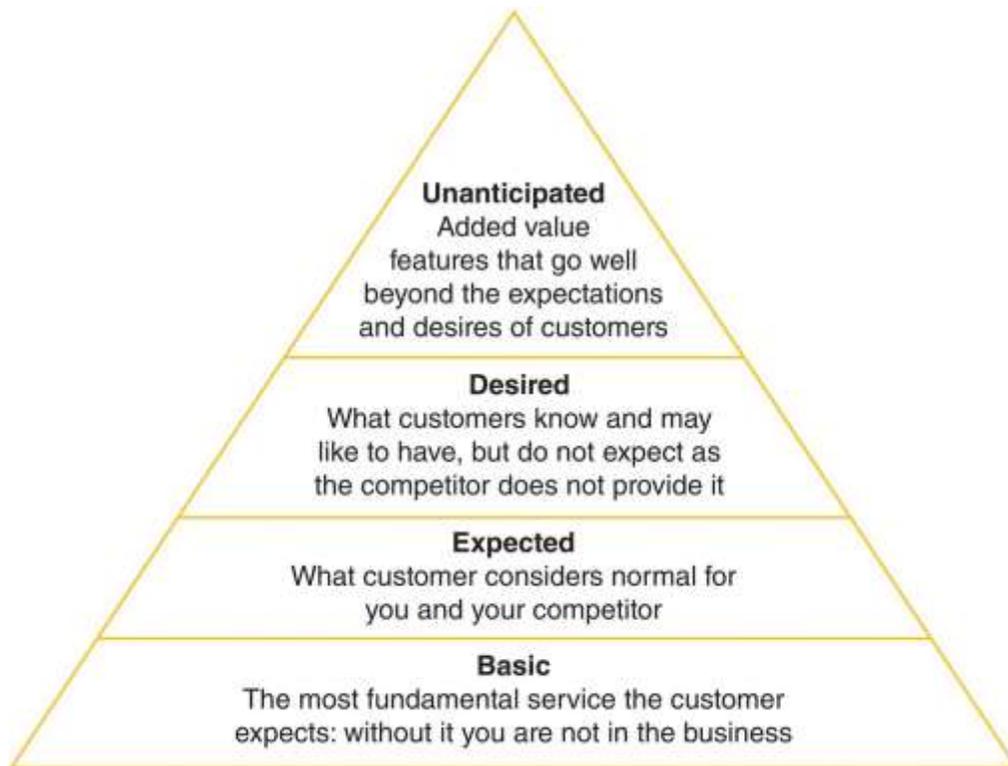
La propuesta de valor se centra en cuáles son el factor y los elementos importantes de un producto, y lo que el usuario final considera importante. En un contexto de telecomunicaciones, una propuesta de valor puede ser simple: entrega segura y rápida de mensajes entre dos centros gubernamentales o

puede ser muy complejo, como en la prestación de servicios de telecomunicaciones de banda ancha al 100 % a una población determinada.

Por otro lado, la configuración de valor se centra en cuántas organizaciones y entidades trabajan juntas para ofrecer un valor a un usuario final. Por ejemplo, como los diseñadores de redes, fabricantes, minoristas, proveedores de contenido trabajan juntos para proporcionar los servicios de banda ancha.

Una propuesta de valor de producto y el precio que se asigna puede analizarse mediante un modelo de jerarquía de valores. Este modelo jerárquico se muestra en la figura 60, donde se han definido cuatro niveles. Estos valores comienzan en básico, que es el aspecto más fundamental que un cliente espera y sin el cual el producto no se venderá. Lo siguiente es el valor esperado que un cliente puede considerar normal para el producto y que se puede esperar razonablemente. Después de esto es lo deseado, que incluye características que son conocidas por los clientes pero que no se esperan ya que no se ofrecen como estándar. En la parte superior de la jerarquía es Imprevisto que incluye características que van mucho más allá de lo que un cliente sabe o espera.

Figura 62. **Niveles jerárquicos de propuesta de valor**



Fuente: ESMAILZADEHI, Riaz. *Broadband Telecommunication Technologies and Management*.

<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-telecommunications-technologies/9781118995624/>

Consulta: febrero de 2021.

5.3. Caso de uso y análisis de costos

En los despliegues de servicios para tv en zonas residenciales, la construcción inicia desde los videos hubs del proveedor de servicios, con la implementación de las maquetas de video análogo y digital. Generalmente este tipo de implementaciones son manejadas como CAPEX para los proveedores, ya que la inversión para estas ejecuciones es de altos costos y se debe de evaluar si el despliegue del servicio sobre una determinada área pueda tener un retorno de inversión favorable según la cantidad de subscriptores asociados, además esto depende de la calidad en el servicio que pueda brindar a los usuarios finales.

Según lo mostrado en el capítulo 3 en las figuras 53 y 55, se tienen los diagramas faciales para las implementaciones de las plataformas de video digital y análogo en los hubs, los cuales son de ayuda para dimensionar los costos de infraestructura y servicios profesionales aproximados para su implementación.

Tabla I. **Costos de materiales – video análogo**

Sección	Descripción del Material	UNIDAD	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cableado y conexión RF	CABLE MINI COAXIAL AZUL, RG59	M	360	0,81	291,60
	CABLE MINI COAXIAL NEGRO, RG59	M	20	0,81	16,20
	CONECTORES MCX PECD3514	U	12	2,90	34,80
	CONECTORES MINI COAXIAL TIPO F SLC1855-FP2	U	6	0,89	5,34
	TERMINADOR DE 75 OHMS	U	6	2,37	14,22
Eléctrico	RFM Activo				
	CABLE TSJ CABLE TSJ 2X12 15mts x fuente	M	30	1,23	36,90
	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #12	PZA	10	0,66	6,60
	CABLE THHN #10	M	10	0,64	6,40
	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #10	PZA	15	0,66	9,90
	CABLE VERDE CALIBRE 6 AWG	M	20	1,40	28,00
	TERMINAL ELECTRICA TIPO ZAPATA CALIBRE 6 DE DOBLE OJILLO CAÑON LARGO DE 3/8"	PZA	10	1,35	13,50
	BREAKERS DE 10, 12 o 15 AMP PARA TABLERO Tipo Bullet o ABB	U	2	30,00	60,00
	CINTA AISLAR AZUL/NEGRA/ROJO	U	2	1,50	3,00
	TERMOFIL NEGRO DE 1/2" y 1 m	U	1	3,50	3,50

Continuación de Tabla I

	TERMOFIL VERDE DE 1/2" y1 m	U	1	3,50	3,50
	RFM Pasivo				
Eléctrico	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #6	PZA	10	0,66	6,60
	CABLE VERDE CALIBRE #6 AWG	M	20	1,40	28,00
	TORNILLOS PARA RACK UNIVERSAL	U	16	0,15	2,40
	CINTURONES PLASTICOS NEGRO/AZUL/ROJO	U	100	0,15	36,90
Fijación e identificación de Cableado	VELCRO NEGRO	ROLLO	1	5,00	6,60
	CINTA BANDERA BRADY	ROLLO	3	30,00	6,40
	CINTA CONTINUA BRADY	ROLLO	2	36,00	9,90
				TOTAL	\$ 752.48

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Tabla II. **Costos de servicios – video análogo**

Descripción del Servicios	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Site Survey en sitio	1	350,00	350,00
Realización de Diagramas Facial y As Built	1	75,00	75,00
As built Post Instalaciones	1	150,00	150,00
Documentación	1	75,00	75,00
Instalación RFM Activo	1	150,00	150,00
Instalación RFM Pasivo	1	150,00	150,00
Instalación de Cable vistas	5	175,00	875,00
Instalación Rack 42U, accesorios y PDU	1	225,00	225,00
Mano de obra por tirado de cables RF, peinado del cableado, construcción de conectores Tipo F, instalación de splitter, combinadores, tendido de cables ópticos, instalación de terminales de 75Ohms, (video Análogo)	1	1 350,00	1 350,00
Logística y bodegaje	1	325,00	325,00
Venta de energización	2	340,00	680,00
		TOTAL	4 405,00

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Tabla III. **Costos de materiales – video digital**

Sección	Descripción del Material	UNIDAD	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cableado y conexión RF	CABLE MINI COAXIAL AZUL, RG59	M	180	0,81	145,80
	CABLE MINI COAXIAL NEGRO, RG59	M	20	0,81	16,20
	CONECTORES MCX PECD3514	U	12	2,90	34,80
	CONECTORES MINI COAXIAL TIPO F SLC1855-FP2	U	6	0,89	5,34
	TERMINADOR DE 75 OHMS	U	6	2,37	14,22
Eléctrico	RFM Activo				
	CABLE TSJ CABLE TSJ 2X12 15m x fuente	M	30	1,23	36,90
	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #12	PZA	10	0,66	6,60
	CABLE THHN #10(M	10	0,64	6,40
	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #10	PZA	15	0,66	9,90
	CABLE VERDE CALIBRE 6 AWG	M	20	1,40	28,00
	TERMINAL ELECTRICA TIPO ZAPATA CALIBRE 6 DE DOBLE OJILLO CAÑON LARGO DE 3/8"	PZA	10	1,35	13,50
	BREAKERS DE 10, 12 o 15 AMP PARA TABLERO Tipo Bullet o ABB	U	2	30,00	60,00
	CINTA AISLAR AZUL/NEGRA/ROJO	U	2	1,50	3,00
	TERMOFIL NEGRO DE 1/2" y 1 m	U	1	3,50	3,50

Continuación de Tabla III

	TERMOFIL VERDE DE 1/2" y 1 m	U	1	3,50	3,50
Eléctrico	RFM Pasivo				
	TERMINAL PONCHABLE O DE ENTALLAR #6	PZA	10	0,66	6,60
	CABLE VERDE CALIBRE #6 AWG	M	20	1,40	28,00
	TORNILLOS PARA RACK UNIVERSAL	U	16	0,15	2,40
Fijación e identificación de Cableado	CINTURONES PLASTICOS NEGRO/AZUL/ROJO	U	100	0,15	15,02
	VELCRO NEGRO	ROLLO	1	5,00	5,00
	CINTA BANDERA BRADY	ROLLO	3	30,00	90,00
	CINTA CONTINUA BRADY	ROLLO	2	36,00	72,00
				TOTAL	606,68

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Tabla IV. **Costos de servicios – video digital**

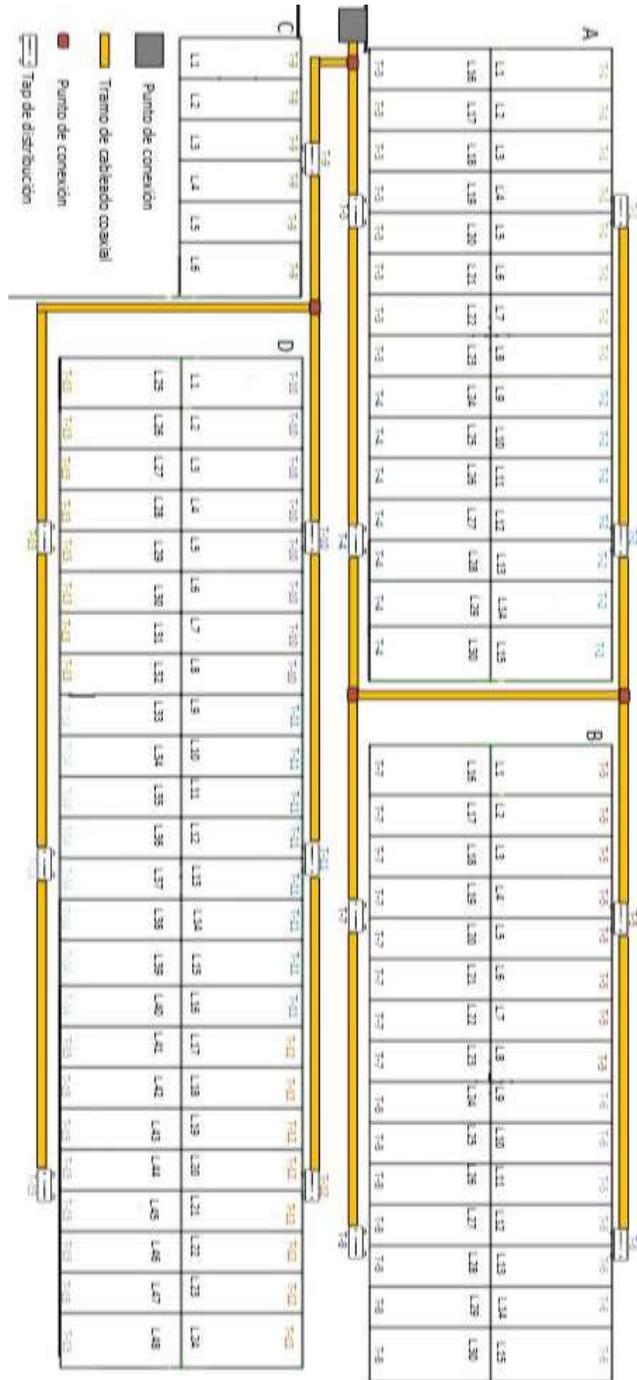
Descripción del Servicios	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Site Survey en sitio	1	350,00	350,00
Realización de Diagramas Facial y As Built	1	75,00	75,00
As built Post Instalaciones	1	150,00	150,00
Documentación	1	75,00	75,00
Instalación RFM Activo	1	150,00	150,00
Instalación RFM Pasivo	1	150,00	150,00
Instalación de APEX	2	175,00	875,00
Instalación Rack 42U, accesorios y PDU	1	225,00	225,00
Mano de obra por tirado de cables RF, peinado del cableado, construcción de conectores Tipo F, instalación de splitter, combinadores, tendido de cables ópticos, instalación de terminales de 75Ohms, (video digital)	1	540,00	540,00
Logística y bodegaje	1	325,00	325,00
Venta de energización	2	340,00	680,00
		TOTAL	3 070,00

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Como se observa en la tabla I y tabla III, la diferencia en los costos de implementación se encuentra en la cantidad de equipos que se deben de instalar, lo cual conlleva un aumento en la cantidad de materiales misceláneos y cableados datos RF y UTP, además de los servicios profesionales asociados a estas instalaciones que se muestran en la tabla II y tabla IV, el costo de servicios también depende de la cantidad de equipos necesarios para la implementación

En el despliegue en planta externa para la distribución de los servicios y conectividad en zonas residenciales, se dimensiona según el área de cobertura o casas pasadas que se tengan proyectadas para suministrar de los servicios, en la figura 63 se muestra la distribución estándar empleada para una zona residencial. Desde la derivación tomada del punto de conexión de la red de transporte general del proveedor de servicio, se distribuye por medio de cableado coaxial utilizando Tap de 8 salidas para la conectividad a cada usuario final, es decir, por cada 8 casas pasadas se tiene que utilizar un Tap para la conexión, en este ejemplo se tiene el despliegue para 114 casas pasadas para la entrega del servicio. En la figura 64, se muestra la distribución de casas pasadas para cada Tap necesarios para la conectividad en una zona residencial modelo.

Figura 63. Diagrama de distribución



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio.

Figura 64. **Distribución de casas-pasadas.**

A	T-1	L1	T-5	L1	C	T-9	L1	D	T-10	T-13	L25
		L2		L2			L26				
		L3		L3			L27				
		L4		L4			L28				
		L5		L5			L29				
		L6		L6			L30				
		L7		L7	L31						
		L8		L8	L32						
	T-2	L9	T-6	L9	T-11	T-14	L33				
		L10		L10			L34				
		L11		L11			L35				
		L12		L12			L36				
		L13		L13			L37				
		L14		L14			L38				
		L15		L15			L39				
	T-3	L16	T-7	L16	T-12	T-15	L40				
		L17		L17			L41				
		L18		L18			L42				
		L19		L19			L43				
		L20		L20			L44				
		L21		L21			L45				
		L22		L22			L46				
	L23	L23	L47								
	T-4	L24	T-8	L24	L24	L48					
		L25		L25							
		L26		L26							
		L27		L27							
		L28		L28							
		L29		L29							
		L30		L30							

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla V. **Costos de materiales – despliegue planta externa**

Descripción del Material	UNIDAD	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Coplas de 8 DBS	U	1	27,50	27,50
Coplas de 16 DBS	U	1	27,50	27,50
Soporte para TAP	U	15	11,55	173,25
Spliter de 2 way	U	5	5,00	25,00
Tap de 8 way 17 DBS	U	15	20,00	300,00
Amplificador troncal	U	1	1,00	1,00
Tapadera de concreto para caja trocal	U	1	24,00	24,00
cable coaxial RF-500 ducto	U	500	2,00	1 000,00
Canalización en baqueta en 1 vía '2	U	70	5,00	350,00
Restauración de banqueteta	U	70	7,00	490,00
Tubo BX de plástico de 1/2"	U	10	0,50	5,00
Abrazadera de 1/2" p/c	U	80	0,12	9,60
Tierra física en accesorios subterráneos	U	12	15,00	180,00
Ecuilizador de línea 9 DBS	U	2	27,67	55,34
			TOTAL	2 723,56

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Tabla VI. **Costos de servicios – despliegue planta externa**

Descripción del Servicios	Cant	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Montaje de Coplas de 8 DBS	1	8,00	8,00
Montaje de Coplas de 16 DBS	1	8,00	8,00
Montaje de soporte para TAP	15	6,50	97,50
Montaje de Spliter de 2 way	5	5,75	28,75
Montaje Tap de 8 way 17 DBS	15	5,25	78,75
Montaje de Amplificador Troncal	1	50,00	50,00
Cableado y Montaje de cable coaxial RF-500 ducto	500	0,65	325,00
Canalización en baqueta en 1 via '2	70	15,00	1 050,00
Restauración de banqueta	70	20,00	1 400,00
Instalación de Tubo BX de plástico de 1/2"	10	1,25	12,50
Instalación de Abrazadera de 1/2" p/c	80	0,75	60,00
Instalación de Tierra física en accesorios subterráneos	12	6,50	78,00
Montaje de Ecuador de línea 9 DBS	2	5,80	11,60
Montaje Ecuador de línea 11 DBS	2	6,75	13,50
		TOTAL	3 221,60

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

En la tabla V y VI, se detallan los materiales y servicios de instalación necesarios en el despliegue en planta externa para tener así la distribución de servicios de tv dentro una zona residencial estándar.

Según lo analizado la diferencia entre las implementaciones de tv digital y análoga se tiene un mayor impacto en la construcción de los hub en lo que corresponde a planta interna, debido que en la generación de video digital se requieren menos equipos para implementarse y se obtiene una mejor calidad de señal de tv, lo cual permite ofrecer un mejor servicio al usuario final con los beneficios de la tv digital.

Con respecto a la distribución en planta externa son similares los despliegues para ambos servicios de tv, en la cual se utiliza la misma arquitectura base para su construcción. Para un proveedor de servicios, le brinda mejores beneficios impulsar los servicios de tv digital, ya que le permite administrar de forma efectiva la cantidad de subscriptores que tiene en un área residencial determinada, les puede ofrecer un mejor servicio en calidad de imagen y cobertura de la guía de canales. Y con la tv análoga se dificulta tener un conteo preciso de los subscriptores asociados al proveedor, ya que la señal de tv análoga no tiene ningún tipo de encriptado para su reproducción, los usuarios pueden tomar conexión desde el cableado coaxial de un subscriptor vecino hacia domicilio, lo cual genera un fraude hacia el proveedor de servicio porque se está tomando un servicio de forma ilegal y no haciendo el debido pago para obtener el dicho servicio.

CONCLUSIONES

1. La comparación entre los sistemas de televisión análoga y digital demuestra que la digitalización de los servicios de tv permite brindar una mejor calidad de imagen y audio.
2. Al implementarse redes HFC para la distribución de servicios de tv permite aumentar el alcance de cobertura, empleando los beneficios que brinda fibra óptica para la transmisión de datos con un ancho banda más eficiente e inmunidad a ruido electromagnético.
3. Con el despliegue de las redes HFC la conexión final hacia los usuarios se realiza por medio de cableado coaxial, lo cual permite que los equipos finales para recepción de señal de tv tengan un bajo de costo.
4. Estableciendo un modelo de rendimiento con los criterios de evaluación de QoS, se analiza las características y parámetros que son esenciales para entregar un servicio integro y de calidad a los usuarios finales.
5. La calidad de experiencia, QoE, se define como la aceptabilidad de una aplicación o servicio, basándose en la opinión y expectativas que espera obtener el usuario sobre el servicio contratado.
6. La comprensión del valor de un producto o servicio es importante para el análisis empresarial, las características y beneficios de un producto ayudan a mejorar los ingresos y el retorno de la inversión.

RECOMENDACIONES

1. Analizar el crecimiento de la demanda de servicios de tv al realizar los diseños y arquitecturas de la red HFC para la distribución de señal.
2. Considerar que los servicios de televisión digitales pueden ofrecer una mejor calidad de sonido e imágenes de alta resolución.
3. Solicitar a los proveedores de servicios que cumplan con la calidad de servicio requerida.
4. Realizar un estudio de mercado y determinar los sectores óptimos para la implementación de televisión digital o análoga.

BIBLIOGRAFÍA

1. ESMAILZADEHI, Riaz. *Broadband Telecommunication Technologies and Management*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-telecommunications-technologies/9781118995624/>>. [Consulta: Febrero del 2021].
2. J. HOSS, Robert y A. LACY, Edward. *Fiber Optics, Second Edition*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/fiber-optics-second/9780132442473/>>. [Consulta: Julio del 2020].
3. JANEVSKI, Toni. *QoS for Fixed and Mobile Ultra-Broadband*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/qos-for-fixed/9781119470502/>>. [Consulta: Enero del 2021].
4. KANGOVI, Sachidananda. *Peering Carrier Ethernet Networks*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/peering-carrier-ethernet/9780128092491/>>. [Consulta: Octubre del 2020].
5. LARGE, David y FARMER, JAMES. *Broadband Cable Access Networks*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/broadband-cable-access/9780123744012/>>. [Consulta: Junio del 2020].
6. LEE FUGAL, D. *The Essential Guide to Digital Signal Processing*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/the-essential-guide/9780133812220/>>. [Consulta: Mayo del 2020].

7. PARKER, Michael. *Digital Signal Processing 101, 2nd Edition*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/digital-signal-processing/9780128114544/>>. [Consulta: Mayo del 2020].

8. WILSON, Kitty y GOLENIEWSKI, Lillian. *Telecommunications Essentials, Second Edition: The Complete Global Source*. [en línea]. <<https://learning.oreilly.com/library/view/telecommunications-essentials-second/0321427610/>>. [Consulta: Mayo del 2020].

