

TECANA AMERICAN UNIVERSITY
ACCELERATED DEGREE PROGRAM
BACHELOR OF SCIENCE IN ELECTRONIC ENGINEERING



INFORME N° 4
“Sistemas de Comunicaciones Digitales, Analógicas y
Telecomunicaciones”

Arcelio Bravo

“Por la presente juro y doy fe que soy el único autor del presente informe
y que su contenido es fruto de mi trabajo, experiencia e investigación
académica”

Ciudad Ojeda, Octubre de 2017

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
SISTEMAS ANALÓGICOS Y DIGITALES	3
1. SISTEMAS ANALÓGICOS.....	3
1.1. Presentación. Sistemas de comunicaciones.....	3
1.2. Análisis de sistemas de comunicación banda base.....	3
1.2.1. Caracterización de la señal y el ruido.....	4
1.2.2. Cálculo de SNR.....	5
1.2.3. Modelo simplificado de canal.....	6
1.2.4. Formalización del modelo de canal.....	6
1.2.5. Repetidores analógicos.....	6
1.3. Modulación de Onda Continua.....	7
1.3.1. Modulación Lineal: AM, DBL, BLU. BLV.....	7
1.3.2. Modulación Exponencial.....	8
1.4. Ruido pasabanda en modulación lineal de onda continua y en modulación exponencial de onda continua.....	9
1.5. Modulación analógica de pulsos (PAM, PPM, PDM). Muestreo real. Espectro de señal PAM.....	10
2. SISTEMAS DIGITALES.....	12
2.1. Introducción a sistemas de comunicación digitales.....	12
2.2. Transmisión digital bandabase. Ruidos y errores. Performance en el caso de ruido blanco gaussiano. (Cálculo del umbral óptimo).....	13
2.3. Receptores óptimos para comunicaciones digitales (filtro apareado). Cálculo de la probabilidad de error para distintos tipos de señal. Receptor de Correlación. Señalización M-aria.....	15
2.4. Repetidores Regenerativos.....	15
2.5. Interferencia Intersimbólica: problemas y posibles soluciones. Conformación de pulsos (Pulsos de Nyquist). Teoremas de Nyquist. Ecuación.....	16
2.6. Modulación por pulsos codificados (PCM).....	17
2.7. Predictores (diagrama de bloques y cálculo de la SNR). Distintas técnicas de codificación de voz. (DPCM, ADPCM, Codificación en subbandas, etc). Comparación de la performance de los sistemas.....	18
2.8. Modulación pasabanda (BPSK, ASK, FSK). Señalización Multinivel (MPSK).Modulación Pasabanda QASK, QAM. Diagrama de un Modem. Desempeño de modulación pasabanda.....	22

2.9. Técnicas de acceso al medio (TDMA, FDMA, CDMA).	23
CAPÍTULO II	28
INFORMACIÓN y TELECOMUNICACIONES	28
3. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN	28
3.1. Conceptos básicos.	28
3.2. 1er. teorema de Shannon.	29
3.3. 2do. teorema de Shannon.	30
4. TELECOMUNICACIONES	31
4.1. Elementos básicos de telecomunicaciones	31
4.2. Modulación y codificación.	32
4.2.1. Moduladora analógica y portadora analógica.....	33
4.2.2. Moduladora analógica y portadora digital.....	34
4.2.3. Moduladora digital y portadora analógica (modulación digital)	34
4.3. Multiplexación.	35
4.3.1. Multiplexado por división de frecuencia (FDM).....	36
4.3.2. Multiplexado por división temporal síncrona (TDM síncrona).....	37
4.3.3. Multiplexado por división temporal asíncrona (TDM asíncrona o TDM estadístico).....	38
4.4. Redes de telecomunicaciones.....	39
4.4.1. Transmisión en modo paralelo	40
4.4.2. Transmisión en modo serie.....	40
4.4.3. Canal de comunicación.....	41
4.4.4. Comunicación Simplex	42
4.4.5. Comunicación Half-duplex.....	42
4.4.6. Comunicación Full Duplex.....	42
4.4.7. Tipos de conexión.....	42
4.4.8. Definición de medio de transmisión.....	43
4.5. Conmutación telefónica y señalización.	47
4.5.1. Conmutación de Mensajes.....	49
4.5.2. Conmutación de Paquetes.....	50
CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Moduladores de Amplitud	7
Figura 2. Espectro de la Señal PAM.....	12
Figura 3. Sistema de comunicación Basebanda	14
Figura 4. Repetidores Regenerativos	16
Figura 5. Modulación por pulsos codificados (PCM).....	18
Figura 6. DPCM, utilizando predicción a partir de las muestras de la señal de entrada.....	20
Figura 7. DPCM, utilizando predicción a partir de una señal diferencial cuantificada.....	20
Figura 8. Diagrama de bloques de un codificador y descodificador basado en subbandas	21
Figura 9. Transmisión Paralela y Serial	40
Figura 10. Conmutación de Circuitos de Telefónicos.....	48
Figura 11. Conmutación de Mensajes.....	50
Figura 12. Conmutación de paquetes	51

INTRODUCCIÓN

El siguiente informe tiene como propósito profundizar conocimientos teóricos sobre Sistemas de Comunicaciones Digitales, Analógicas y Telecomunicaciones como parte de la formación académica en ingeniería electrónica, sobre el particular, las telecomunicaciones tratan lo referente con la transmisión y recepción de señales e interconexión de redes. Dentro de esta área se aborda la comunicación a distancia, generalmente a través de la propagación de ondas electromagnéticas. Esto incluye muchas tecnologías, como radio, televisión, teléfono, comunicaciones de datos y redes informáticas como Internet.

En este sentido, la definición dada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, International Telecommunication Union) para telecomunicación es toda emisión, transmisión y recepción de signos, señales, escritos e imágenes, sonidos e informaciones de cualquier naturaleza, por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos. Con la intención de desarrollar este interesante tema, en el capítulo I se abordan los conceptos generales de los sistemas analógicos y digitales, iniciando por los sistemas analógicos, caracterizando los sistemas de comunicación, la caracterización de la señal, el cálculo de SNR, se consideran los repetidores generativos, así como los diferentes esquemas de modulación AM, PAM, PPM, PDM. Además de analizar el ruido como elemento de distorsión.

De igual manera, se estudió los sistemas digitales, contemplando dentro de este sistema de comunicación la transmisión banda base y pasa banda los receptores óptimos la interferencia intersimbólica, los diferentes esquemas de modulación por pulso, BPSK, ASK, FSK, señalización multinivel (MPSK), modulación pasabanda QASK, QAM, y las técnicas de acceso TDMA, FDMA, CDMA.

Paralelamente, en el capítulo II titulado INFORMACIÓN Y TELECOMUNICACIONES se abordó la teoría de la información de Shannon en sus dos teoremas, para posteriormente profundizar sobre los elementos básicos de la telecomunicaciones, teorías sobre la modulación y codificación, los diversos tipos de multiplexión, transmisión de datos, canales, tipos de conexión, conmutación en sus variantes para telefonía, voz y datos.

El objetivo principal de este informe consiste en proporcionar una herramienta para aportar conocimientos técnicos sobre los sistemas de comunicación analógicos y digitales dentro del universo de las telecomunicaciones, considerando sus técnicas, protocolos y teoremas que brinden al lector un marco conceptual de amplitud teórica.

Los objetivos específicos se centraran en lograr la comprensión de los fundamentos de los sistemas analógicos, digitales, de la teoría de la información y

las telecomunicaciones para ser aplicados dentro del ejercicio como profesionales de la ingeniería electrónica.

Por todo lo anteriormente descrito, el presente informe pretende profundizar de manera sintetizada dichos conceptos, considerando el marco teórico disponible y los aspectos metodológicos aplicables. Todo con el propósito de brindar al ingeniero electrónico una herramienta de consulta que le permita consolidar sus conocimientos para lograr un desempeño profesional de excelencia dentro del estado del arte de la ingeniería.

CAPÍTULO I

SISTEMAS ANALÓGICOS Y DIGITALES

1. SISTEMAS ANALÓGICOS

1.1. Presentación. Sistemas de comunicaciones.

Los sistemas de comunicación están compuestos por tres partes principales: transmisor, medio o canal de comunicación y receptor. El mensaje puede ser la voz de un emisor cualquiera, una imagen fija o un video, un fax, un archivo digital de una computadora, un mensaje de correo electrónico o cualquier otro tipo de información.

Para tal fin, el transmisor se encarga de convertir el mensaje en una señal adecuada para transmitirse a través del canal de comunicación, en esta etapa la modulación de la señal es la operación más importante del transmisor. Luego el medio o canal de comunicación es el enlace eléctrico entre el transmisor y el receptor. Este medio puede ser el aire, el agua, el vacío, la fibra óptica, el cable coaxial y los cables de cobre, como los ejemplos más comunes.

El receptor se encarga de tomar la señal del canal y de reconstruir con ella el mensaje original. La demodulación (o detección) de la señal es la operación fundamental de este dispositivo.

1.2. Análisis de sistemas de comunicación banda base.

Considerando que para el proceso de comunicación existe un elemento fundamental, como lo es la señal la cual es la representación del mensaje que se quiere enviar, puede ser el sonido, el color o la iluminación que se convierte en forma eléctrica como tensión eléctrica (voltios). En las telecomunicaciones actuales, además de convertirlo en voltios, se le convierte en luz (fotones) para poder ser transmitida (o transmitidos) por fibras ópticas. Una señal eléctrica puede ser una onda de voltaje o de corriente eléctrica que puede describirse matemáticamente.

1.2.1. Caracterización de la señal y el ruido.

Señales analógicas: Son señales eléctricas que se corresponden al mensaje y tienen una forma análoga al fenómeno (mensaje) representado. Pueden ser representadas mediante funciones que toman un número infinito de valores en cualquier intervalo de tiempo considerado. Para transmitir señales analógicas se emplean sistemas de transmisión analógicos, y la información va contenida en la propia forma de onda.

Señales digitales: Son señales artificiales creadas por el hombre, pueden ser representadas mediante funciones que toman un número finito de valores en cualquier intervalo de tiempo. Las señales digitales necesitarán sistemas de transmisión digitales donde la información estará contenida en los pulsos codificados, y no en la forma de onda.

Señales en banda base: Son las señales que no sufren ningún proceso de modulación ni desplazamiento en frecuencia. En el caso de las señales digitales se denominan códigos en banda base o códigos de línea.

Tal como se indicó una señal es una función del tiempo (t) que toma un único valor en cada punto y que representa una información específica. Puede ser clasificada en:

Continua: puede tomar cualquier valor en cualquier instante de tiempo (continua en tiempo y amplitud).

Discreta: se define únicamente en instantes enteros o discretos de tiempo, pero puede tomar cualquier valor en esos instantes.

Periódicas y no periódicas: La señal periódica: $\exists T_0 g(t)=g(t+T_0) \forall t$ en la señal no periódica no existe T_0 .

Determinísticas: Señal completamente definida en el tiempo. No hay incertidumbre de su valor pasado, presente o futuro.

Aleatorias: Hay un grado de incertidumbre sobre los valores de la señal.

Existe un elemento de perturbación en las señales, como lo es el *ruido*, que puede ser entendido como las señales aleatorias o impredecibles de tipo eléctrico que se originan en forma natural dentro o fuera del sistema de comunicación. Dichas señales producen variaciones en la amplitud de la señal de datos, cuando el ruido se agrega a la señal portadora de la información, ésta puede quedar en gran parte oculta o eliminarse totalmente.

Dado que el ruido no puede eliminarse por completo, representando uno de los problemas más importantes de las comunicaciones eléctricas. Las señales de ruido tienen determinadas frecuencias que dependen de los dispositivos eléctricos del sistema. Cuando estas abarcan todo el espectro de frecuencias se denomina ruido blanco. Según su origen se puede clasificar al ruido en las siguientes categorías:

Ruido Térmico: Se debe a la agitación térmica de los electrones dentro del conductor y es función de la temperatura. Este tipo de ruido se encuentra presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión. El ruido térmico siempre estará presente, por lo que representa un límite superior a las prestaciones que pueden alcanzarse con los sistemas de comunicaciones.

Ruido de Intermodulación: Cuando existen señales de diferentes frecuencias que comparten un mismo medio de transmisión, entonces puede producirse un ruido de intermodulación. Generando señales a frecuencias que son suma o diferencia de las dos frecuencias originales, o múltiplos de éstas.

Ruido impulsivo: no es continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y amplitud relativamente grande, son no predecibles porque son generados por perturbaciones electromagnéticas exteriores, producidas por tormentas atmosféricas o fallos y defectos en los sistemas de comunicación.

1.2.2. Cálculo de SNR.

A los objetos de poder detectar una señal en un determinado punto, se requiere que la potencia de la señal tenga un nivel mínimo respecto del nivel de potencia medio del ruido. Entonces para evaluar la calidad de una transmisión se utiliza, comúnmente, el parámetro conocido como “relación señal a ruido” (Signal-to-Noise Ratio SNR). Que se calcula como el cociente de la potencia promedio de la señal entre la potencia promedio del ruido que está presente en un punto particular en la transmisión, típicamente medido en el receptor.

$$\frac{S}{N} dB = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right)$$

Mientras más grande es el valor de la SRN, mayor será la capacidad del receptor para detectar una transmisión, valores altos de SNR significa señal de alta calidad, valores bajos requieren repetidores para garantizar la intensidad de diseño del sistema comunicacional.

1.2.3. Modelo simplificado de canal.

El canal es el recurso físico que hay que utilizar entre varios medios de transmisión para establecer la comunicación, es decir, es el vínculo o enlace. El ancho de banda de un canal lo limita la frecuencia máxima de transmisión, por motivos tales como: Limitaciones físicas del canal, existencia de perturbaciones e interferencias externas. Es por ello que el ancho de banda del canal siempre está limitado a la diferencia de las frecuencias máxima y mínima que se puede transmitir por el canal sin atenuación.

1.2.4. Formalización del modelo de canal.

Estos son:

Alámbricos: Dentro de los que se encuentran: las líneas telefónicas de pares trenzados, los cables coaxiales, guías de onda y cables de fibra óptica.

Inalámbricos: Algunos canales inalámbricos típicos son el aire, el vacío y el agua de mar.

Los principios generales de la modulación digital y analógica se aplican a todos los tipos de canales aun cuando las características de cada canal impongan restricciones que favorecen un tipo particular de señalización. En general, el medio del canal atenúa la señal de manera tal que el ruido del canal o el que introduce un receptor imperfecto causa un deterioro en la información enviada en comparación con aquella de la fuente. El canal puede contener dispositivos amplificadores activos, como los repetidores en sistemas telefónicos o transpondedores satelitales en sistemas de comunicación espacial.

1.2.5. Repetidores analógicos.

Un repetidor es un dispositivo electrónico de tipo analógico que recibe una señal débil o de bajo nivel y la retransmite a una potencia o nivel más alto, de modo que esta pueda cubrir distancias más largas sin degradarse, o con una degradación tolerable. Se utilizan a menudo en los cables transcontinentales y transoceánicos ya que la atenuación o pérdida de señal en tales distancias sería completamente inaceptable. Los repetidores se utilizan tanto en cables de cobre portadores de señales eléctricas, como en cables de fibra óptica portadores de luz.

Asimismo, se utilizan en los enlaces de telecomunicación punto a punto mediante radioenlaces que funcionan en el rango de microondas, como los utilizados para distribuir las señales de televisión entre los centros de producción y los distintos emisores o los utilizados en redes de telecomunicación para la transmisión de telefonía.

1.3. Modulación de Onda Continua.

En general, la modulación continua de una portadora de alta frecuencia es el proceso mediante el cual un parámetro (amplitud o ángulo) de la portadora se varía en forma instantánea proporcionalmente a una señal mensaje de baja frecuencia. Usualmente se supone que la portadora es una señal sinusoidal, pero ésta no es una condición necesaria. Dependiendo de la relación entre la señal mensaje y los parámetros de la señal modulada, se tendrá los siguientes dos tipos de modulación de señales continuas:

1. Modulación Lineal. Cuando la amplitud instantánea de la portadora varía linealmente respecto a la señal mensaje.
2. Modulación Angular o Exponencial. Cuando el ángulo de la portadora varía linealmente respecto a la señal mensaje.

1.3.1. Modulación Lineal: AM, DBL, BLU, BLV.

Las señales moduladas linealmente se generan mediante multiplicación del mensaje $m(t)$ que contiene la información por una portadora sinusoidal. Este producto es procesado por filtros pasabanda lineales y la configuración de los moduladores de amplitud se muestra en la figura 1, donde $m(t)$, $m_1(t)$ y $m_2(t)$ son los mensajes a transmitir.

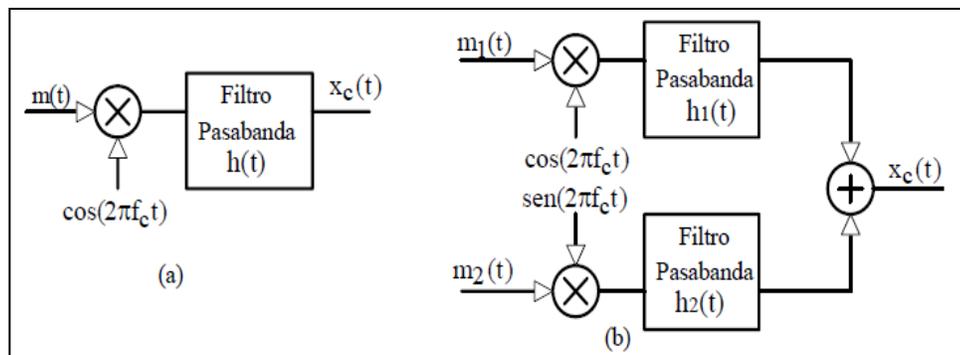


Figura 1. Moduladores de Amplitud. Fuente: Tomado de: Briceño M., José E. (2005). Transmisión de datos. Pág. 38.

Entonces, de la figura 1(a): $x_c(t) = [m(t) \cos(2\pi f_c t)] * h(t)$

y de la figura 1(b):

$$x_c(t) = [m_1(t) \cos(2\pi f_c t)] * h_1(t) + [m_2(t) \sin(2\pi f_c t)] * h_2(t).$$

Dónde: $h(t)$, $h_1(t)$ y $h_2(t)$ son las características de los filtros. El asterisco significa convolución.

Las características de los filtros pasabanda dependen del tipo de modulación requerido. En efecto, la elección del tipo de filtro requerido permite generar los tipos familiares de modulación de amplitud, tales como los de “Doble Banda Lateral con o sin Portadora (AM y DSB/SC), los de “Banda Lateral Única (SSB)”, los de “Banda Lateral Residual (VSB)”, y la “Modulación Ortogonal o en Cuadratura (QAM)”.

1.3.2. Modulación Exponencial

Las señales moduladas en ángulo son señales de envolvente constante y la información está contenida en la fase instantánea de la onda portadora. La señal modulada en ángulo se puede representar en la forma:

$$x_c(t) = A_c \cos[\theta(t)] = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

donde $\theta(t) = [2\pi f_c t + \varphi(t)]$ es el ángulo o fase instantánea de la onda portadora, y $\varphi(t)$ la desviación instantánea de fase.

Por definición, la frecuencia instantánea, $f_i(t)$ de la señal modulada $x_c(t)$ es

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\theta(t)] = f_c + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t)$$

También, $\Delta f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t)$ = desviación instantánea de frecuencia

La desviación instantánea de fase $\varphi(t)$ está relacionada con la señal mensaje y dependiendo de la naturaleza de esa relación, se tiene los siguientes tipos de modulación angular:

1. Modulación de Fase (Phase Modulation, PM), en la cual la desviación instantánea de fase es proporcional a la señal mensaje, es decir, $\varphi(t) = k_p m(t)$, donde k_p es la “constante de desviación de fase” del modulador; la constante k_p se expresa en radianes por unidad de $m(t)$, por ejemplo, en rad/Volt.

2. Modulación de Frecuencia (Frequency Modulation, FM), en la cual la desviación instantánea de frecuencia es proporcional a la señal mensaje $m(t)$, es decir

$\Delta f(t) \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) = f_d m(t)$ o también, mediante su integración:

$$\varphi(t) = 2\pi f_d \int_{t_0}^t m(t) dt + \varphi_0(t_0)$$

En este caso la desviación instantánea de fase es proporcional a la integral de la señal mensaje; la constante f_d es la “constante de desviación de frecuencia” del modulador y se expresa en Hz por unidad de $m(t)$, por ejemplo, Hz/Volt.

Combinando las expresiones, se obtiene [con $\varphi_0(t_0) = 0$] Para la modulación de fase PM

$x_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$ y para la modulación de frecuencia FM,

$$x_{FM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi f_d \int^t m(t) dt]$$

Generalmente no se especifica el límite inferior de la integral. En la transmisión de señales binarias el mensaje $m(t)$ está formado por impulsos de estados binarios “0” ó “1”, que se transmiten a intervalos de duración fija. Si la modulación es en frecuencia, se transmitirá a una frecuencia $f_0 = f_c - f_d$ cuando se quiere transmitir el “0”, o a una frecuencia $f_1 = f_c + f_d$ cuando se quiere transmitir el “1”.

En general, para una señal modulante $m(t)$ dada, el ancho de banda en FM es mayor que en PM, lo cual implica que para un ancho de banda dado disponible, se puede enviar más información en PM que en FM. En efecto, las velocidades de transmisión más altas sobre un canal de un ancho de banda dado, se obtienen mediante modulación de fase.

1.4. Ruido pasabanda en modulación lineal de onda continua y en modulación exponencial de onda continua.

En la modulación lineal el ruido térmico es directamente proporcional a la temperatura, siendo razonable expresar al ruido en grados, igual que en watts o en volts. Pudiéndose expresar mediante:

$$T = \frac{N}{KB}$$

En donde T = temperatura ambiente (grados kelvin)

N = potencia del ruido (watts)

K = constante de Boltzmann (1.38×10^{23} J/K)

B = ancho de banda (Hertz)

La temperatura equivalente de ruido, T_e , es un valor hipotético que no se puede medir en forma directa. T_e es un parámetro que se usa con frecuencia en radiorreceptores complicados con bajo ruido, y no es una cifra de ruido. La T_e es una indicación de la reducción de señal a ruido a medida que una señal se propaga a través de un receptor. Mientras menor sea la temperatura equivalente de ruido, la calidad del receptor es mejor. Los valores normales de T_e van de 20° para los receptores fríos, hasta 1000° para los receptores ruidosos. La ecuación matemática de T_e en la entrada a un receptor se expresa como sigue como:

$$T_e = T (F - 1)$$

Siendo T_e = temperatura equivalente de ruido (grados kelvin)
 T = temperatura ambiente (grados kelvin)
 F = factor de ruido (adimensional)

A los efectos de la modulación exponencial, cuando se agrega ruido térmico con densidad espectral constante a una señal de FM, produce una desviación indeseada de la frecuencia de la onda portadora. La magnitud de esta desviación no deseada depende de la amplitud relativa del ruido con respecto a la portadora. Cuando se demodula esta desviación indeseada de portadora, se transforma en ruido, si sus componentes de frecuencia quedan dentro del espectro de frecuencias de información. La forma espectral del ruido demodulado depende de si se usa demodulador de PM o de FM. El voltaje de ruido en la salida de un demodulador de PM es constante respecto a la frecuencia, mientras que en la salida de un demodulador de FM aumenta en forma lineal con la frecuencia.

1.5. Modulación analógica de pulsos (PAM, PPM, PDM). Muestreo real. Espectro de señal PAM.

En las modulaciones de onda continua se varían los parámetros de una onda portadora senoidal continua de acuerdo a una señal moduladora de información. Mientras que en la modulación de pulsos, lo que se varía es alguno de los parámetros de un tren de pulsos uniformes, bien sea su amplitud, duración o posición. Para el caso de los sistemas analógicos la información se transmite básicamente en forma analógica, pero la transmisión tiene lugar a intervalos discretos de tiempo.

En la modulación analógica de pulsos, la señal no necesariamente es de dos niveles, sino que el nivel de la señal puede tener cualquier valor real, si bien la señal es discreta, en el sentido de que se presenta a intervalos definidos de tiempo, con amplitudes, frecuencias, o anchos de pulso variables. Los esquemas de modulación

de pulsos son varios, los más importantes: Modulación por amplitud de pulsos (PAM). Modulación por duración o anchura de pulsos (PWM o PDM) y Modulación por posición de pulsos (PPM).

Las señales de pulso modulado, como PAM, PWM y PPM, no son transmitidas directamente, pero la mayoría de las veces son usadas para modular frecuencia de una portadora analógica. Aunque las señales del pulso modulado (PULSE MODULATED SIGNAL) son discontinuas, estos pulsos no son señales digitales verdaderas. PAM, PWM y PPM son respectivamente, los pulsos equivalentes de AM, FM y PM de las señales portadoras analógicas.

Dos ventajas de la transmisión de señales PAM por encima de las señales analógicas completas son: • Si la duración del pulso PAM es pequeña, la energía requerida para transmitir los pulsos es mucho menor que la energía requerida para transmitir la señal analógica. • El intervalo de tiempo entre los pulsos PAM debe ser llenado con muestras de otros mensajes, lo cual permite que varios mensajes se puedan transmitir simultáneamente en un canal: esta técnica es llamada multiplexación por división de tiempo (TDM).

El proceso de muestreo es común a todos los sistemas de modulación de pulsos y por lo general, su descripción se hace en el dominio del tiempo. Mediante el muestreo, una señal analógica continua en el tiempo, se convierte en una secuencia de muestras discretas de la señal, a intervalos regulares. El teorema de muestreo establece que: Una señal continua, de energía finita y limitada en banda, sin componentes espectrales por encima de una frecuencia f_{\max} , queda descrita completamente especificando los valores de la señal a intervalos de $1/2f_{\max}$ segundos. La señal así muestreada puede recuperarse mediante un filtro de paso bajo. La frecuencia $2f_{\max}$ se designa como frecuencia de Nyquist.

Respecto al espectro de la señal PAM en la figura 2 se muestra su comportamiento. Si el período de los impulsos es $T = \pi / \omega_{\max} = 1/2 f_{\max}$, los espectros no se traslapan. Cuando la frecuencia de muestreo $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ es menor que la máxima frecuencia de la señal, el intervalo de muestreo T aumenta y los espectros se traslapan. Al recuperar la señal en banda base mediante un filtro de paso bajo, cuya respuesta se indica por la línea de puntos en la figura 2, se produce, con señales analógicas, distorsión en altas frecuencias y, con señales digitales, interferencia entre símbolos. Si por otra parte, la frecuencia de muestreo es mayor que $2f_{\max}$, los espectros quedan separados por una banda de guarda que será mayor

cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo y que garantiza la posibilidad de recuperar el espectro de la señal original sin distorsión apreciable.

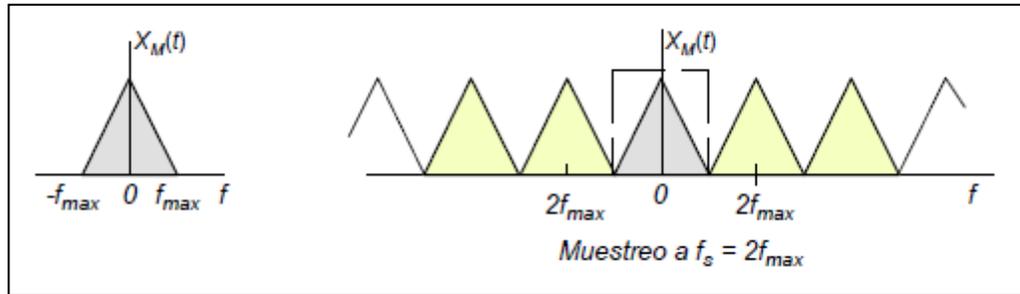


Figura 2. Espectro de la Señal PAM. Fuente: Tomado de: Pérez V. Constantino (2010). Modulación de Pulsos. Disponible en: http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH7ST_Web.pdf.

2. SISTEMAS DIGITALES

2.1. Introducción a sistemas de comunicación digitales.

Pueden ser clasificados en dos grupos según el rango de frecuencias utilizadas para la transmisión de información:

Banda base: envía la señal de información en su forma original en términos de frecuencia (sin traslación en el dominio de la frecuencia) y convierte la señal de información en formas de onda compatibles con las características del canal de comunicaciones; por su parte.

Pasa banda: además de hacer la correspondiente conversión a formas de onda, realiza desplazamiento de la señal de información a una frecuencia mucho más alta que la frecuencia banda base (frecuencia de la portadora (f_c) que resulta ser mucho más grande que la máxima componente de la señal banda base), brindando así mejores condiciones a la señal de información al momento de propagarse por el canal de comunicaciones.

Al proceso completo de conversión a formas de onda y traslación en frecuencia se le conoce como modulación. Correspondiendo al proceso mediante el cual una secuencia de bits, que representa la señal de información, es convertida en formas de onda apropiadas para ser transmitidas sobre un canal de comunicaciones. Este proceso consiste en la variación sistémica de uno o más parámetros (amplitud, frecuencia o fase) de una señal portadora analógica sinusoidal de acuerdo a la señal de información.

Dentro de las ventajas de los sistemas de comunicación digital se tienen:

- a).Simplicidad de diseño de los circuitos digitales y facilidad con que se pueden aplicar las técnicas de circuitos integrados a los sistemas digitales.
- b).Posibilidad de preservar la intimidad con el uso de una codificación criptográfica.
- c).Posibilidad de mezclar y transmitir señales procedentes de diversos servicios.
- d).Posibilidad de regeneración de la señal transmitida.
- e).Facilidad de multiplexación.
- f).Mejor respuesta ante relaciones señal-ruido bajas.
- g).Casi todas las señales analógicas pueden convertirse a señales digitales.
- h).Debido a la alta inmunidad al ruido, es prácticamente independiente la calidad de la transmisión con la longitud del enlace.
- i).Posibilidad de hacer coexistir, en la misma antena, portadoras de microondas para transmisión analógica (múltiplex por división en la frecuencia) y para transmisión digital (PCM).

Códigos de línea, la transmisión de datos en forma digital implica una cierta codificación, según la forma de transmisión donde no se usa una portadora se la conoce como transmisión en banda base. Los códigos de línea son usados para este tipo de transmisión. Existen varios tipos de códigos, entre ellos Unipolar NRZ, Polar NRZ, Unipolar RZ, Bipolar RZ (AMI), Manchester, B8ZS, HDB3 Algunas de las características deseables de estos son: Auto sincronización, Capacidad de detección de errores, Densidad espectral de potencia y Ancho de banda.

2.2. Transmisión digital bandabase. Ruidos y errores. Performance en el caso de ruido blanco gaussiano. (Cálculo del umbral óptimo).

Una forma de onda de banda base tiene una magnitud espectral diferente de cero para las frecuencias en una vecindad alrededor del origen (es decir, $f = 0$) y es despreciable en cualquier otro caso. Para formas de onda de banda base el valor de f_c puede asignarse arbitrariamente como conveniencia matemática en ciertos problemas. En otros casos, principalmente en los problemas de modulación, f_c es la frecuencia de una señal oscilante en el circuito de transmisión y es la frecuencia asignada del transmisor, como por ejemplo 850 kHz para una estación radiodifusora de AM.

En los problemas de comunicaciones, la señal fuente de información es a menudo una señal en banda base, por ejemplo una forma de onda de lógica transistor-transistor (TTL) de un circuito digital o una señal de audio (analógica) de un micrófono. Los diseños en comunicaciones se deben construir considerando un sistema que transfiera la información en la señal fuente $m(t)$ al destino deseado. Mediante la figura 3 se muestra que se requiere con frecuencia del uso de una señal

pasabanda, $s(t)$, la cual posee un espectro pasabanda concentrado alrededor de $\pm f_c$, donde $\pm f_c$ se escoge de tal manera que $s(t)$ se propagará a través del canal de comunicaciones, ya sea alámbrico o inalámbrico.

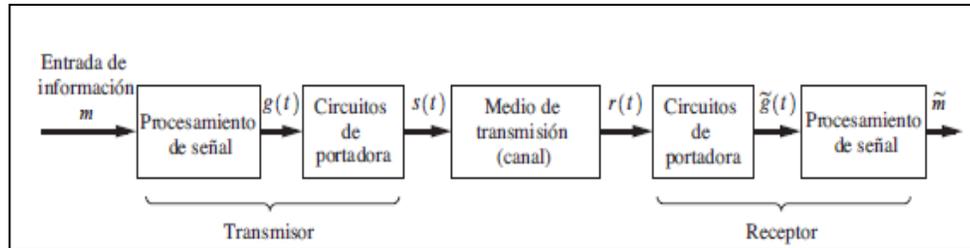


Figura 3. Sistema de comunicación Basebanda. Fuente: Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Pág. 231.

El análisis del ruido en los sistemas de comunicación se basa en una forma idealizada de ruido definida como ruido blanco. Su densidad espectral de potencia es constante y no depende de la frecuencia. Definido por: $R_w(t) = \frac{N_0}{2} \delta(t)$ En caso de dos señales cualesquiera de ruido blanco cuya correlación es cero \forall_t excepto $t=0$. Teniendo además ruido gaussiano \Rightarrow 2 señales cualesquiera son estadísticamente independientes.

Cuando la relación portadora a ruido (CNR) es pequeña en comparación con la unidad, ya que en ese caso el ruido será predominante, en esta situación se va a dar el efecto umbral. Dado que la amplitud del ruido es mayor que la de la señal modulada, se puede definir como:

$$Y(t) \approx r(t) + A_c \cos[\Psi(t)] + A_c a^* m(t) \cos[\Psi(t)]$$

De la expresión se desprende al analizar que cuando CNR (relación portadora a ruido) es baja. A la salida del detector no hay ningún término directamente proporcional a $m(t)$. Aparece $m(t)$ multiplicado por $\cos[\Psi(t)]$, y como el ruido de base banda tiene una fase uniformemente distribuida ente 0 y 2π . Por tanto, hay una pérdida total de información. Esta situación se denomina efecto umbral, entendiéndose por umbral al valor de la CNR, por debajo del cual el funcionamiento del detector frente al ruido se deteriora mucho más rápido que en proporción a la CNR.

2.3. Receptores óptimos para comunicaciones digitales (filtro apareado). Cálculo de la probabilidad de error para distintos tipos de señal. Receptor de Correlación. Señalización M-aria.

La mejora en el rendimiento de un sistema de comunicación digital puede alcanzarse utilizando la codificación, asumiendo que una señal digital con ruido añadido en el canal está presente a la entrada del receptor. Se muestra también el rendimiento de un sistema que utiliza una señalización a través de la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) cuando se utiliza la codificación, así como cuando ésta no existe. Para el caso sin codificación, se emplea el circuito de recepción o detección óptimo (filtro apareado) en el receptor. Para el caso con codificación se usa un código Golay en la que P_e es la probabilidad de error de bit, también conocida como tasa de error de bit (BER), que se mide en la salida del receptor.

Respecto a modulación por corrimiento de fase M-aria (MPSK), si se cuenta con un transmisor PM con una señal digital de modulación de $M = 4$ niveles, entonces se genera una modulación por corrimiento de fase M-aria a la salida del transmisor. La ganancia del código se define como la reducción de la relación de energía por bit/densidad de ruido en la entrada del receptor (en decibeles) que se alcanza cuando se utiliza codificación, en comparación con la relación de energía requerida para el caso sin codificación a algún nivel específico de P_e . La ganancia del código aumenta si la BER es más pequeña, esta mejora es significativa en las aplicaciones de comunicaciones espaciales, en donde cada decibel de mejora es invaluable.

2.4. Repetidores Regenerativos.

Cuando una señal digital de código de línea, como una PCM, es transmitida sobre un canal cableado, por ejemplo una línea telefónica de par trenzado, ésta se ve atenuada, filtrada y contaminada por el ruido. Por consiguiente, para líneas largas, los datos no pueden recuperarse al lado del receptor a menos que se coloquen repetidores en cascada a lo largo de la línea y en el receptor.

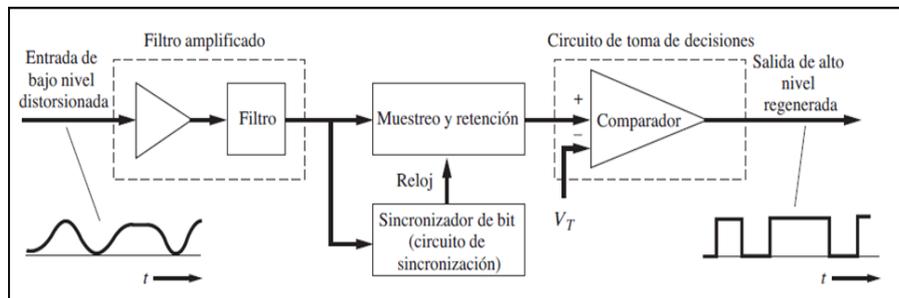


Figura 4. Repetidores Regenerativos. Fuente: Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Pág. 172.

Estos repetidores amplifican y limpian de ruido la señal periódicamente. Si la señal fuera analógica en lugar de digital sólo se podría utilizar amplificadores lineales con filtros adecuados, pues los valores relativos de amplitud tendrían que preservarse. En los sistemas digitales se puede utilizar un procesamiento no lineal para regenerar una señal digital libre de ruido, este tipo de procesamiento no lineal se conoce como repetidor regenerativo. La figura 4 muestra un diagrama de bloques simplificado de un repetidor regenerativo para la señalización unipolar NRZ. El filtro amplificador incrementa la amplitud de la señal de entrada de bajo nivel a un nivel que es compatible con el resto de los circuitos y además filtra la señal de tal manera que se minimizan los efectos de ruido en el canal y de ISI, este es denominado filtro ecualizado.

2.5. Interferencia Intersimbólica: problemas y posibles soluciones. Conformación de pulsos (Pulsos de Nyquist). Teoremas de Nyquist. Ecuación.

Cuando el ancho de banda absoluto de los pulsos multinivel rectangulares es infinito, y además si estos pulsos se filtran inadecuadamente conforme en un sistema de comunicación, se obtendrá una dispersión en el tiempo, y el pulso para cada símbolo puede fugarse a las ranuras de tiempo adyacentes y causar la denominada interferencia intersimbólica (ISI). Mediante restringir el ancho de banda los pulsos tendrán cimas redondeadas (en lugar de planas). Nyquist (1928) fue el primero en estudiar este problema, y descubrió tres métodos para las formas de pulsos que pueden utilizarse para eliminar la ISI.

El primer método de Nyquist para la eliminación de la ISI es usar una función de transferencia equivalente, $H_e(f)$, tal que la respuesta de impulso satisfaga la condición: $h_e(kT_s + \tau) = C$, $k=0$ y 0 , $k \neq 0$. Donde k es un entero, T_s el periodo de sincronización de símbolo (muestra), τ el desplazamiento en los tiempos de reloj de

muestreo en el receptor comparado con los tiempos de reloj de los símbolos de entrada y C una constante diferente de cero. Esto es, para cada uno de los pulsos planos de nivel a presentes en la entrada del filtro transmisor cuando $t = 0$, el pulso recibido será $ah_e(t)$. Éste tendría un valor de aC cuando $t = \tau$ pero no causaría interferencia a otros tiempos de muestreo, ya que $h_e(kT_s + \tau) = 0$ para $k \neq 0$.

El segundo método de Nyquist consiste en permitir que se introduzca cierta ISI en una forma controlada de tal manera que se pueda cancelar en el receptor y los datos recuperarse sin error si no hay ruido presente. Esta técnica permite también la posibilidad de duplicar la velocidad de bit o, alternativamente, dividir al ancho de banda del canal por la mitad.

En el tercer método de Nyquist indica que el efecto de ésta se elimina seleccionando $h_e(t)$ de manera tal que el área por debajo del pulso de $h_e(t)$ dentro del intervalo de símbolo deseado, T_s , sea diferente de cero, pero las áreas debajo de $h_e(t)$ en intervalos de símbolos adyacentes sean iguales a cero. Para la detección de datos, el receptor evalúa el área por debajo de la forma de onda del receptor sobre cada intervalo T_s .

2.6. Modulación por pulsos codificados (PCM).

Es una conversión analógica a digital de un tipo especial en donde la información contenida en las muestras instantáneas de una señal analógica está representada mediante palabras digitales en un flujo serial de bits.

Si suponemos que cada una de las palabras digitales cuenta con n dígitos binarios, entonces existen $M = 2^n$ palabras de codificación únicas y posibles, además de que cada palabra de codificación corresponde a cierto nivel de amplitud. Sin embargo, cada muestra de la señal analógica puede ser cualquier valor en un número infinito de niveles de tal manera que la palabra digital que representa la amplitud más cercana al valor muestreado es la que se utiliza. Esto se conoce como cuantificación. O sea, en lugar de utilizar el valor exacto de la muestra de la forma de onda analógica $w(kT_s)$, la muestra se sustituye por el valor más cercano permitido, donde existen M valores permitidos y cada uno corresponde a una de las palabras de codificación. En la figura 5 se muestra un diagrama de bloque típico. Dentro de las múltiples ventajas que ofrece son las siguientes:

- En el sistema, pueden utilizarse ampliamente circuitos digitales relativamente económicos.

- Las señales PCM derivadas de todos los tipos de fuentes analógicas (audio, video, etc.) pueden combinarse con señales de datos digitales y transmitirlas a través del mismo sistema digital de comunicación de alta velocidad. Esta combinación se conoce como multiplexión.
- En los sistemas telefónicos digitales de larga distancia que necesitan repetidores, una forma de onda PCM limpia puede regenerarse a la salida de cada repetidor.
- El rendimiento de ruido de un sistema digital puede ser superior al de uno analógico. Además, la probabilidad de error para la salida del sistema puede reducirse aún más mediante técnicas de codificación apropiadas.

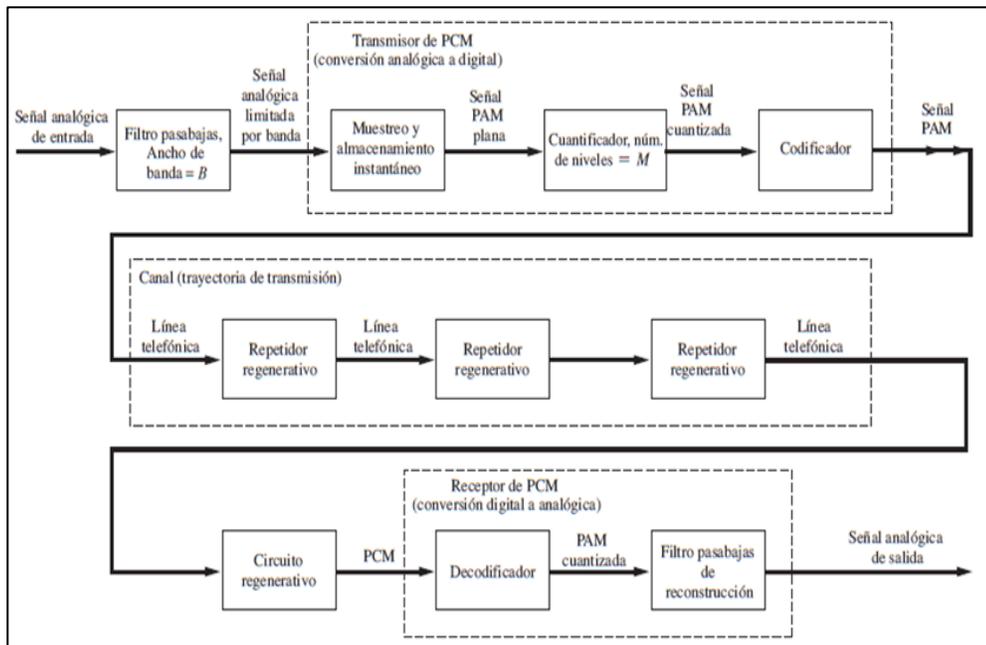


Figura 5. Modulación por pulsos codificados (PCM). Fuente: Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Pág. 139.

2.7. Predictores (diagrama de bloques y cálculo de la SNR). Distintas técnicas de codificación de voz. (DPCM, ADPCM, Codificación en subbandas, etc). Comparación de la performance de los sistemas.

Un predictor es un sistema en el que cuando se introduce una señal en la entrada proporciona a la salida una predicción de cuál será la muestra siguiente de la señal. Es por ello que cuando se muestrean señales de audio o video con frecuencia se encuentran muestras adyacentes cercanas al mismo valor. Esto significa que existe mucha redundancia en las muestras de la señal y, en consecuencia, el ancho de banda y el rango dinámico de un sistema PCM se desperdician cuando se

retransmiten estas muestras redundantes. Una manera de minimizar esta transmisión redundante y reducir el ancho de banda es transmitir las señales PCM correspondientes a la diferencia en las muestras adyacentes. Esto, definiéndolo directamente, es la modulación por codificación de pulsos diferencial (DPCM).

En el receptor, el valor de la muestra en el presente se regenera utilizando el valor en el pasado, además del valor diferencial de actualización que se recibe sobre el sistema diferencial. En este sentido el valor en el presente puede estimarse a partir del valor en el pasado con un filtro de predicción, mismo que puede lograrse usando una línea de retraso con tomas (un dispositivo de transferencia en cadena) para formar un filtro transversal. Cuando las ganancias de cada línea se configuran de tal manera que la salida del filtro predecirá el valor en el presente de los valores en el pasado, entonces tenemos un filtro de predicción lineal. Las óptimas ganancias óptimas de línea son una función de las propiedades de correlación de la señal de audio o de video.

El filtro de predicción lineal puede utilizarse en una configuración diferencial para producir la DPCM. Se examinarán dos posibles configuraciones:

La primera configuración de DPCM, utiliza al predictor para obtener una señal modulada en amplitud por pulso diferencial (DPAM) que está cuantificada y codificada para producir la señal DPCM. La señal analógica recuperada a la salida del receptor será la misma que aquella a la entrada del sistema, pero con la adición del ruido de cuantización acumulado. Ver figura 6.

La segunda configuración de DPCM el predictor opera sobre los valores cuantificados tanto en el transmisor como en el receptor para minimizar el ruido de cuantización en la señal analógica recuperada. La salida analógica en el receptor es la misma que la señal analógica de entrada al transmisor, excepto por el ruido de cuantización; más aún, el ruido de cuantización no se acumula, como era el caso en la primera configuración. Ver figura 7.

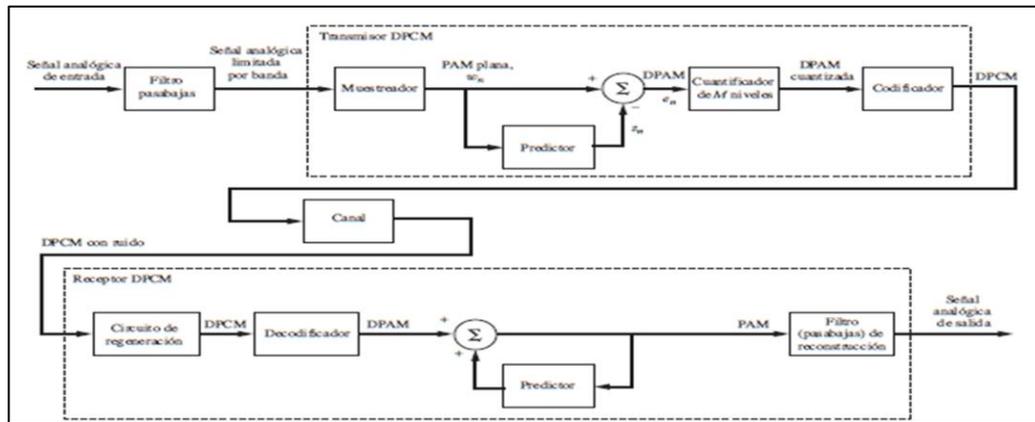


Figura 6. DPCM, utilizando predicción a partir de las muestras de la señal de entrada. Fuente: Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Pág. 191.

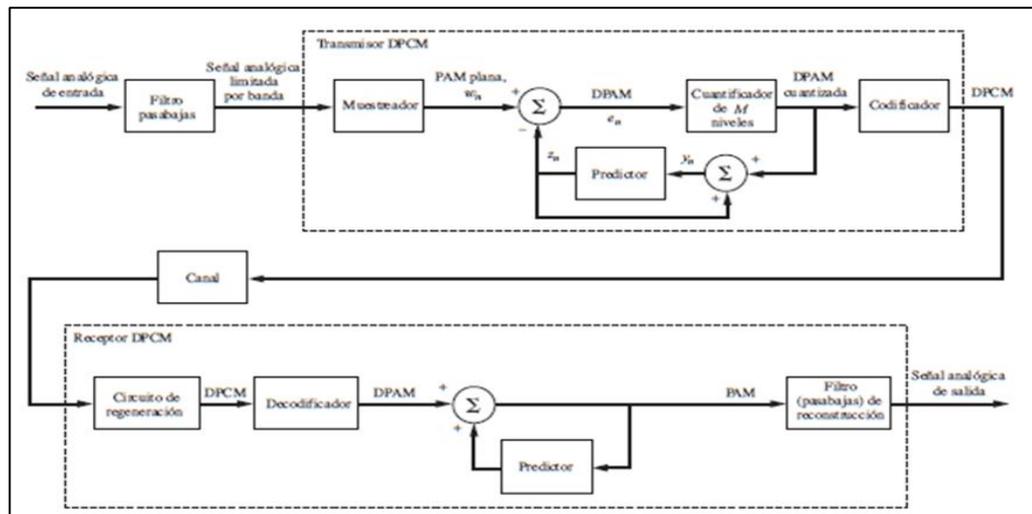


Figura 7. DPCM, utilizando predicción a partir de una señal diferencial cuantificada. Fuente: Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Pág. 192.

Es demostrable que la DPCM, al igual que la PCM, sigue la regla de 6 dB según:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 6.02n + \alpha$$
 donde $\alpha - 3 < \alpha < 15$ para voz a través de DPCM y n es el número de bits de cuantificación ($M = 2^n$). A diferencia de la PCM modulada y expandida, la α para la DPCM varía sobre un amplio rango, dependiendo de las propiedades de la señal analógica de entrada. Existe una mejora en la SNR tan grande como 25 dB cuando se utiliza DPCM en lugar de PCM con $\mu = 255$. Como alternativa, para la misma SNR, la DPCM puede requerir de 3 o 4 bits menos que la modulación y expansión por PCM. Esta es la razón por la cual los sistemas DPCM

telefónicos a menudo operan a una velocidad de bit de $R = 32$ kbits/s o $R = 24$ kbits/s en lugar de los 64 kbits/s estándares requeridos para la modulación y expansión por PCM.

La codificación en subbandas consiste en dividir la señal original en diferentes bandas espectrales (proceso denominado análisis basado en bancos de filtros) y codificar cada una de estas bandas de manera independiente, utilizando una técnica de codificación de forma de onda (por ejemplo, DPCM o APCM).

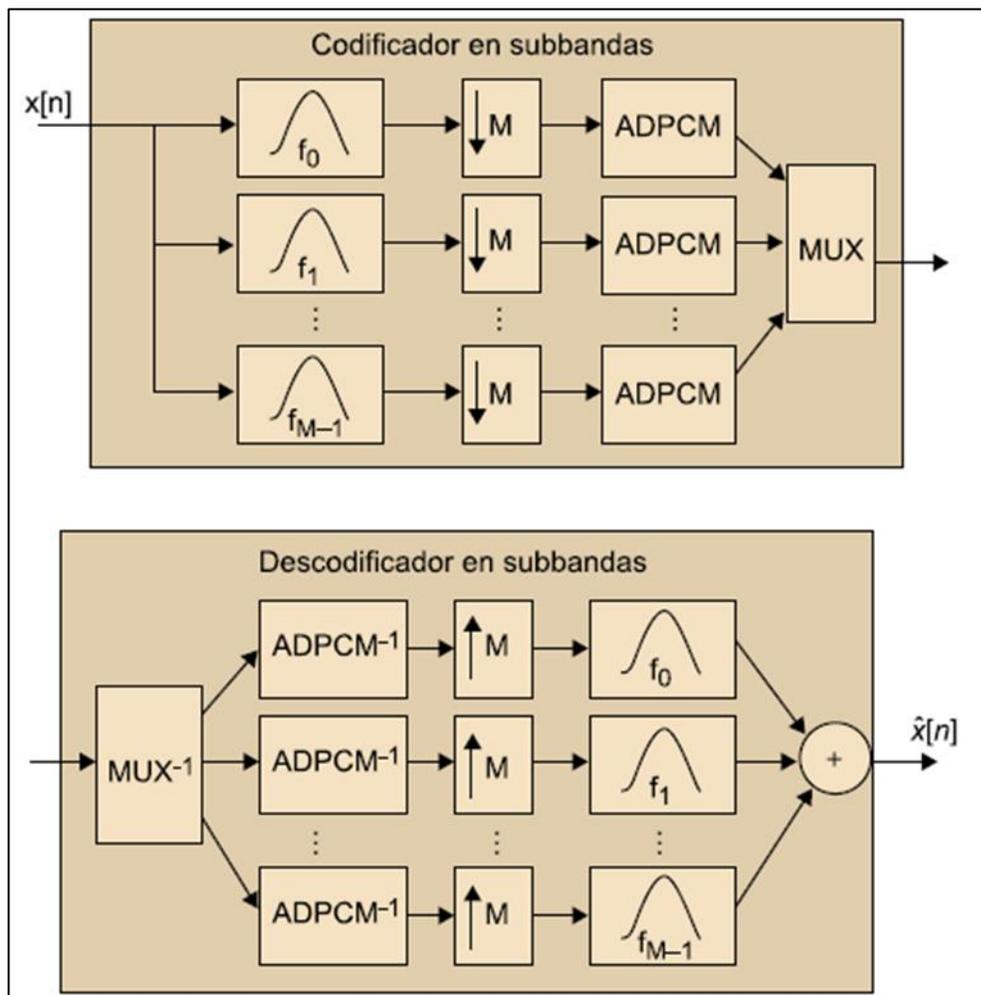


Figura 8. Diagrama de bloques de un codificador y decodificador basado en subbandas.
Fuente: Costa, Marta y Duxans, Helena (2010). Codificación del audio. Universitat Oberta de Catalunya. Pág. 28.

Para codificar en subbandas inicialmente se filtra la señal de entrada por medio de M filtros paso banda para separar la señal en M subbandas. En este punto del

proceso, en lugar de tener una sola señal que se ha de codificar ($x[n]$), tenemos M señales que se deben codificar (el resultado de filtrar $x[n]$ por cada uno de los M filtros); por lo tanto, hemos aumentado por un factor M el número de muestras por segundo que se han de codificar.

Para mantener constante el número de muestras que se deben codificar por segundo, la salida de los filtros se diezma por un factor M . A continuación, se codifica la señal de cada subbanda por medio de un codificador de forma de onda de dominio temporal (por ejemplo, un ADPCM) y se combina la salida de los M codificadores con un multiplexor para formar la codificación de la señal de entrada completa. Una de las ventajas de la codificación en subbandas respecto a las otras técnicas en el dominio temporal es que el ruido de cuantificación introducido por cada ADPCM está localizado solo en una banda frecuencial.

2.8. Modulación pasabanda (BPSK, ASK, FSK). Señalización Multinivel (MPSK). Modulación Pasabanda QASK, QAM. Diagrama de un Modem. Desempeño de modulación pasabanda.

Las comunicaciones digitales generalmente requieren de al menos tres tipos de señales de sincronización: bit de sincronización, para distinguir un intervalo de bit de otro. Sincronización de trama, para distinguir grupos de datos en relación a la multiplexión por división de tiempo y Sincronización de portadora, para una señalización pasabanda con detección coherente.

Una forma de onda pasabanda tiene una magnitud espectral diferente de cero para las frecuencias en cierta banda concentrada alrededor de una frecuencia $f = \pm f_c$, donde $f_c \gg 0$. La magnitud espectral es despreciable en cualquier otro caso. A la frecuencia f_c se le llama frecuencia portadora.

La modulación por corrimiento de fase binaria (BPSK) se representa mediante $s(t) = A_c \cos[\omega_c t + D_p m(t)]$, donde $m(t)$ es una señal de datos de banda base polar. Conviene que $m(t)$ tenga valores pico de ± 1 y una forma de pulso rectangular.

La modulación por corrimiento de frecuencia (FSK) puede caracterizarse en dos tipos, dependiendo del método empleado para generarla. Uno de ellos se presenta al conmutar la línea de salida del transmisor entre dos osciladores diferentes, este tipo produce una forma de onda de salida que es discontinua durante los tiempos de conmutación. A esto se le llama FSK de fase discontinua, ya que $\theta(t)$ es discontinua durante los tiempos de conmutación. La señal FSK de fase

discontinua se representa mediante $s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] = A_c \cos(\omega_c t + \theta_1)$ (para t en el intervalo de tiempo en que se envía un 1 binario) o $A_c \cos(\omega_c t + \theta_2)$ (para t en el intervalo de tiempo en que se envía un 0 binario).

La señal FSK de fase continua se genera alimentando la señal de datos a un modulador de frecuencia, se representa a través de:

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + D_f \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda]$$

A pesar de que $m(t)$ es discontinua en los tiempos de conmutación, la función de fase es continua, ya que es proporcional a la integral de $m(t)$. Si la forma de onda de entrada de datos seriales es binaria, como una señal de banda base polar, entonces la señal FSK resultante se llama señal FSK binaria. Por supuesto que una señal multinivel de entrada producirá una señal FSK multinivel.

La señalización pasabanda multinivel modulada con la señalización multinivel se permiten entradas digitales con más de dos niveles en la entrada del transmisor pueden generar señales multinivel a partir de un flujo binario serial de entrada mediante un convertidor digital a analógico (DAC). Si el transmisor es de PM con una señal digital de modulación de $M = 4$ niveles, entonces se genera una modulación por corrimiento de fase M-aria 1MPSK2 a la salida del transmisor.

Asumiendo pulsos de datos en forma rectangular, un gráfico de los valores permitidos de la envolvente compleja, $g(t) = A_c e^{j\theta(t)}$, contendría cuatro puntos y un valor de g (un número complejo en general) para cada uno de los cuatro valores multinivel, correspondientes a las cuatro fases permitidas para θ . La MPSK puede también generarse utilizando dos portadoras moduladas en cuadratura por los componentes x y y de la envolvente compleja, en lugar de utilizar un modulador de fase. La modulación en amplitud en cuadratura (QAM), la señalización de portadora en cuadratura, las constelaciones para las señales QAM no se restringen a tener puntos de señalización permitidos sólo en un círculo (de radio A_c , como era el caso para MPSK). La señal QAM general es $s(t) = x(t) \cos\omega_c t - y(t) \sin\omega_c t$.

2.9. Técnicas de acceso al medio (TDMA, FDMA, CDMA).

TDMA (Time Division Multiplex Access) se define como la multiplexación por tiempo, se utiliza cuando se requiere enviar 3 canales por un mismo medio físico haciendo, para ello se asigna una duración temporal a cada canal, y se cede el medio

físico a cada canal durante ese espacio de tiempo determinado. Esta técnica es muy usado en transmisiones digitales por cable (redes de computadores). Requiere métodos de sincronismo eficaces. Otros usuarios pueden compartir el mismo canal durante los periodos en que éste no se utiliza. Los usuarios comparten un canal físico en un sistema TDMA, donde están asignado unos slots de tiempo. A todos los usuarios que comparten la misma frecuencia se les asigna un slot de tiempo, que se repite dentro de un grupo de slots que se llama trama. Un slot GSM es de 577 μ s, y cada usuario tiene uso del canal (mediante su slot) cada 4.615 ms ($577 \mu s \cdot 8 = 4.615$ ms), ya que en GSM se tiene 8 slots de tiempo.

El principio de TDMA es crear los canales múltiples del discurso dentro del mismo portador de radio dividiéndolo en el dominio de tiempo. La tecnología de radio de TDMA es también la base de los principales estándares celulares digitales del mundo - el GSM (y DCS1800), DAMPS y PDC. En el estándar de DECT, de 20MHz de espectro de radio hay 10 carriers o portadores (canales de radio), cada uno de 1.728MHz. que cada portador se divide en 12 timeslots a dos caras (24 en total), para permitir 12 llamadas simultáneas. Solamente un solo transmisor-receptor es necesario para cada portador. Con 10 portadores, la capacidad es 120 canales de radio. -Una característica importante de esta tecnología de división de tiempo, es que un teléfono individual solamente envía o recibe para dos de los timeslots disponibles. El tiempo restante, puede hacer otras cosas. Por ejemplo puede ser utilizada para llevar una señal de llamada en espera, y permite que el usuario cambie entre dos llamadas.

FDMA (Frequency Division Multiplex Access) es la definición de multiplexación por división en frecuencia. Haciendo uso de modulaciones enviamos cada canal en una banda de frecuencias distinta. Luego en cada receptor se debe demodular para devolver la transmisión a banda base, o a su banda natural. Ampliamente usada en radiocomunicaciones. Los canales de frecuencia son muy preciados, y son asignados a los sistemas por la ATT. Cuantas más frecuencias se disponen, hay más usuarios, y esto significa que tiene que pasar más señalización a través del canal de control. Los sistemas muy grandes FDMA frecuentemente tienen más de un canal de control para manejar todas las tareas de control de acceso. Una característica importante de los sistemas FDMA es que una vez que se asigna una frecuencia a un usuario, ésta es usada exclusivamente por ese usuario hasta que éste no necesite el recurso.

Se utiliza exclusivamente en todos los sistemas celulares analógicos. En estos cada canal es de 30 kHz. Cuando un teléfono de la célula de FDMA establece una

llamada, reserva el canal de frecuencia para la duración entera de la llamada. Los datos de la voz se modulan en esta banda de frecuencia de los canales (que usa la modulación de la frecuencia) En el receptor, se recupera la información usando un filtro band-pass. El teléfono utiliza un canal común del control numérico para adquirir los canales. Los sistemas de FDMA no son eficientes puesto que cada canal analógico se puede utilizar solamente por un usuario al mismo tiempo.

Está no sólo la compresión de voz digital moderna que necesitaría para estos canales, sino que también se pierden siempre que haya silencio durante la conversación de teléfono de la célula. Las señales analógicas son también especialmente susceptibles al ruido y no hay manera de filtrarla hacia fuera. Dado la naturaleza de la señal, los teléfonos analógicos de la célula deben utilizar una potencia más alta (entre 1 y 3 vatios) de conseguir calidad aceptable de la llamada. Dado estos defectos, es fácil ver porqué FDMA está siendo substituido por más nuevas técnicas digitales.

CDMA (Code Division Multiplex Access) se define como multiplexación por división en Código. Un tipo de multiplexación bastante compleja, basada en el uso de distintas codificaciones para cada canal, que pueden ser transmitidos compartiendo tiempo y frecuencia simultáneamente. Hacen uso de complejos algoritmos de codificación. Utilizado en medios digitales complejos. En los sistemas CDMA todos los usuarios transmiten en el mismo ancho de banda simultáneamente, a los sistemas que utilizan este concepto se les denomina "sistemas de espectro disperso".

En esta técnica de transmisión, el espectro de frecuencias de una señal de datos es esparcido usando un código no relacionado con dicha señal. Como resultado el ancho de banda es mucho mayor. En vez de utilizar las ranuras de tiempo o frecuencias, como lo hacen las tecnologías tradicionales, usa códigos matemáticos para transmitir y distinguir entre conversaciones inalámbricas múltiples. Los códigos usados para el esparcimiento tienen valores pequeños de correlación y son únicos para cada usuario.

Esta es la razón por la que el receptor de un determinado transmisor, es capaz de seleccionar la señal deseada. Uno de los problemas más importantes en el diseño de un sistema de comunicaciones inalámbricas consiste en proveer facilidades de comunicación a diferentes usuarios, de tal forma que el espectro de radiofrecuencias sea aprovechado de una forma óptima y a un costo razonable. Teniendo en cuenta que el espectro de frecuencias es un recurso limitado es necesario diseñar estrategias

de acceso múltiple, de tal forma que se puedan asignar, dentro de las debidas restricciones económicas de un ancho de banda previamente asignado.

Los códigos usados para el esparcimiento tienen valores pequeños de correlación y son únicos para cada usuario. Esta es la razón por la que el receptor que tiene conocimiento del código de un determinado transmisor, es capaz de seleccionar la señal deseada. CDMA de sistemas proveen operadores y suscriptores con ventajas importantes sobre TDMA analógico y convencional. Las ventajas principales de CDMA son como se indica a continuación:

Resiste la interferencia intencional y no intencional, una cualidad muy importante cuando se transmite en áreas congestionadas.

Tiene la habilidad de eliminar o atenuar el efecto de la propagación multicamino, la cual es un gran obstáculo en las comunicaciones urbanas.

Puede compartir la misma banda de frecuencia (como un traslapamiento) con otros usuarios, debido a su similitud con una señal de ruido.

Operación limitada de interferencia, en cualquier situación todo el ancho de banda es usado.

Privacidad debido a los códigos aleatorios desconocidos, los códigos aplicados con - en principio - desconocidos para un usuario no deseado.

Posibilidad de acceso aleatorio, los usuarios pueden iniciar su transmisión a cualquier instante de tiempo.

Los sistemas basados en CDMA presentan una reducción de la potencia de transmisión incrementando la vida de las baterías y reduciendo el tamaño de los transmisores y receptores. El funcionamiento del CDMA se basa en la separación del espectro, que en los medios de la transmisión digital es cuando la señal ocupa una banda de frecuencia que sea considerablemente más amplia que el mínimo requerido para la transmisión de datos por otras técnicas.

Los usuarios comparten la misma banda de frecuencia y cada señal es identificada por un código especial, que actúa como una clave reconocida por el transmisor y el receptor. La señal recibida es la suma de todas las señales "combinadas", y cada receptor debe clasificar e identificar las señales que le corresponden de las demás señales. Para hacer esto utiliza un código que corresponde con el código transmitido.

La primera operación implica encontrar del código correcto, y así sincronizar el código local con el código entrante. Una vez ha ocurrido la sincronización, la

correlación del código local y del código entrante permite a la información apropiada ser extraída y las otras señales ser rechazadas.

También permite que dos señales idénticas que vienen de diversas fuentes, sean demoduladas y combinadas, de modo tal que se mejore la calidad de la conexión, por lo que es también una ventaja el uso simultáneo de varios satélites (diversidad). Igualmente, una de las principales características de la tecnología CDMA es que hace prácticamente imposible que sea objeto de interferencias e interceptaciones, ofreciendo gran seguridad en las comunicaciones.

CAPÍTULO II

INFORMACIÓN y TELECOMUNICACIONES

3. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

En 1948 el investigador Claude E. Shannon publicó en la revista de los laboratorios Bell (EEUU) el artículo “A Mathematical Theory of Communication” que traducido se denominó teoría matemática de la comunicación y conocido como teoría de la información. En él se desarrolló un complejo análisis matemático de los aspectos que intervienen en cualquier comunicación y de la cantidad de información que se puede transmitir en función del canal empleado para ello y de las interferencias o ruido presentes en dicho canal. Considerando un sistema de comunicación en general, sin particularizar en ningún medio de transmisión en concreto, por lo que a lo largo de todo el artículo no aparece ninguna mención a componentes o circuitos eléctricos, electrónicos, ópticos o cualquier otro sistema susceptible de emplearse en comunicaciones digitales.

3.1. Conceptos básicos.

Esta teoría está relacionada con las leyes matemáticas que rigen la transmisión y el procesamiento de la información y se ocupa de la medición de la información y de la representación de la misma, así como también de la capacidad de los sistemas de comunicación para transmitir y procesar información. El modelo propuesto por Shannon es un sistema general de la comunicación que parte de una *fente* de información desde la cual, a través de un *transmisor*, se emite una señal, la cual viaja por un *canal*, pero a lo largo de su viaje puede ser interferida por algún *ruido*. La señal sale del canal, llega a un *receptor* que decodifica la información convirtiéndola posteriormente en mensaje que pasa a un *destinatario*. Con el modelo de la teoría de la información se trata de llegar a determinar la forma más económica, rápida y segura de codificar un mensaje, sin que la presencia de algún ruido complique su transmisión.

Un concepto relevante en la teoría de la información es que la cantidad de información contenida en un mensaje puede ser establecida por un valor matemático bien definido y medible. Cuando se utiliza el término cantidad no se hace mención a la cuantía de datos, sino a la probabilidad de que un mensaje, dentro de un conjunto de mensajes posibles, sea recibido claramente. En lo que se refiere a la cantidad de información, el valor más alto se le asigna al mensaje que menos probabilidades

tiene de ser recibido. Si se sabe con certeza que un mensaje va a ser recibido, su cantidad de información es cero.

Otro aspecto que considera la teoría es la resistencia a la distorsión que provoca el ruido, la facilidad de codificación y decodificación, así como la velocidad de transmisión. Es por ello que el mensaje tiene muchos sentidos, y el destinatario extrae el sentido que debe atribuirle al mensaje, siempre y cuando haya un mismo código en común. La teoría de la información tiene ciertas limitaciones, como lo es la acepción del concepto del código.

3.2. 1er. teorema de Shannon.

Teorema fundamental para un canal sin ruido. Sea una fuente con entropía H (bits por símbolo) y un canal con capacidad C (bits por segundo). Entonces es posible codificar la salida de la fuente de tal modo que se pueda transmitir a un régimen de $C/H - \epsilon$ símbolos por segundo sobre el canal, donde ϵ es tan pequeño como se quiera. No es posible transmitir a un régimen promedio mayor que C/H . Con este teorema Shannon prueba la existencia de un límite a la eficiencia de lo que se ha denominado codificación de fuente (codificador). Si puede determinarse la entropía de una fuente caracterizada por la emisión de un número finito de símbolos, entonces sabemos que H (en bits/símbolo) equivale al mínimo número de dígitos binarios que podrían emplearse para su codificación, traduciéndose todo acercamiento a dicho límite en un aumento de la complejidad (en costo operativo y circuital).

En la práctica, la codificación de fuente no se ciñe solo al plano estadístico al que se refiere Shannon. Las técnicas más sofisticadas de codificación de fuente consisten en una combinación de

1) codificación predictiva, solo se transmite aquello que no puede predecirse a partir de las emisiones previas, logrando óptimos resultados cuando se analiza en profundidad las peculiaridades de la fuente y su contexto pragmático (por ejemplo, para la reproducción de una interpretación de piano solo se registran las pulsaciones sobre el teclado).

2) codificación transformacional (especialmente aplicable a señales destinadas a órganos sensoriales), a las señales a transmitir se les aplica una transformación lineal (reversible) por medio de la cual se pueden distinguir rangos de diferente sensibilidad, permitiendo así el prescindir de datos imperceptibles o que quedan por

debajo de ciertos umbrales de calidad (operación que entraña una pérdida irreversible de datos –no necesariamente información, si es que tales datos de ningún modo fueran a informar al destino). En esta codificación la eficiencia se logra mediante un análisis en profundidad de la percepción sensorial.

3) Codificación estadística, en el sentido apuntado por la TMC que considera las emisiones de la fuente como procesos ergódicos y estacionarios.

3.3. 2do. teorema de Shannon.

Teorema fundamental para un canal discreto con ruido

El teorema de Shannon de capacidad máxima de un canal se estudió como el ruido afecta a la transmisión de datos. La capacidad de un canal de comunicación es la cantidad máxima de información que puede transportar dicho canal de forma fiable, es decir, con una probabilidad de error tan pequeña como se quiera. Normalmente se expresa en bits/s (bps). La limitación en el número máximo de niveles de información de la señal que puede soportar una canal, está en función de su potencia S , y del ruido R , y siendo S/R la relación señal a ruido (expresada en decibelios) la fórmula para ello sería:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{R} \right) \text{ bit/s}$$

Donde C es la capacidad del canal en bps, B es el ancho de banda en Hz y S/R es la relación señal a ruido en dB como ejemplo de aplicación si se considera un típico canal telefónico de voz con una razón de señal a ruido de 30 dB y un ancho de banda de 3000 Hz. Al reemplazar en la formula se obtiene como resultado 30 000 bps, lo que la capacidad máxima del canal.

Debido a que los canales de comunicación no son perfectos, ya que están delimitados por el ruido y el ancho de banda. Este teorema de Shannon indica que es posible transmitir información libre de ruido siempre y cuando la tasa de información no exceda la capacidad del canal. Así si el nivel de S/N es menor, ósea la calidad de la señal es más cercana al ruido, la capacidad del canal disminuirá. Esta capacidad máxima es inalcanzable, ya que la fórmula de Shannon supone unas condiciones que en la práctica no se dan. No tiene en cuenta el ruido impulsivo, ni la atenuación ni la distorsión. Representa el límite teórico máximo alcanzable y a dicha capacidad se la denomina capacidad libre. En forma práctica la capacidad de un canal es siempre menor que la capacidad libre.

4. TELECOMUNICACIONES

Telecomunicaciones significa comunicar a distancia, informática (que proviene de información, auto y mática) supone el procesamiento automático de la información; telemática es la conjunción de telecomunicaciones e informática, e implica la transmisión y el procesamiento automático de la información. Por comunicación se entiende el intercambio de información (mensajes) entre dos o más usuarios, el mensaje puede ser voz, texto, datos o imágenes fijas o en movimiento. Quienes se comunican: a) Persona a Persona (voz – mensajes) b) Persona a máquina (equipos electrónicos) y c) Máquina a máquina (redes).

Según Valencia (2010) telecomunicación se refiere a:

“Todo procedimiento que permite a un usuario hacer llegar a uno o varios usuarios determinados (ej. telefonía) o eventuales (ej. radio, televisión), información de cualquier naturaleza (documento escrito, impreso, imagen fija o en movimiento, videos, voz, música, señales visibles, señales audibles, señales de mandos mecánicos, etc.), empleando para dicho procedimiento, cualquier sistema electromagnético para su transmisión y/o recepción (transmisión eléctrica por hilos, radioeléctrica, óptica, o una combinación de estos diversos sistemas)” Pág. 16.

4.1. Elementos básicos de telecomunicaciones

Entendiendo que a través de las telecomunicaciones se logran las comunicaciones mediante los siguientes elementos básicos:

Emisor: Es todo dispositivo por medio del cual se emiten mensajes como pueden ser los generados desde una computadora o teléfono. Incluyendo la emisión de todo tipo de formato como pueden ser datos, voz, videos, entre otros. También se le conoce como Transductor de entrada se pueden clasificar como analógicos o digitales. Casi invariablemente, el mensaje que se produce en la fuente debe convertirse, por medio de un transductor, a una forma apropiada al tipo particular de sistema de comunicación que se emplee. Por ejemplo, en las comunicaciones eléctricas, las ondas de voz se convierten, por medio de un micrófono, en variaciones de voltaje. Este mensaje se conocerá como la señal mensaje.

Receptor: Es todo dispositivo que por medio del cual se reciben los mensajes de datos, voz, videos o cualquier otro formato enviado por el emisor. Pueden ser un satélite, una antena, la tarjeta de red de un computador, entre otros. La función del

receptor es extraer la señal deseada del conjunto de señales recibidas a la salida del canal y convertirlas a una forma apropiada para el transductor de salida. Aunque la amplificación puede ser una de las primeras operaciones realizadas por el receptor, especialmente en las comunicaciones radiales, donde la señal puede ser exactamente débil, la función principal del receptor es de modular la señal recibida.

Medio: también conocido como canal que puede ser el aire, los cables de cobre, fibra óptica, estaciones terrestres, entre otros.

Protocolos: Son los estándares o normas que permiten y regulan el envío de la información entre dos entidades, que definen la velocidad, tamaño, codificación y los tipos de emisor, medio y receptor.

4.2. Modulación y codificación.

Se denomina modulación al proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia. Debido a este proceso la señal de alta frecuencia denominada portadora, sufrirá la modificación de alguno de sus parámetros, siendo dicha modificación proporcional a la amplitud de la señal de baja frecuencia denominada moduladora. A la señal resultante de este proceso se la denomina señal modulada y la misma es la señal que se transmite. En la modulación intervienen los siguientes elementos:

Señal portadora: Señal periódica encargada de "transportar" la información a transmitir, y cuya frecuencia es la frecuencia de transmisión deseada.

Señal moduladora: Señal que representa el mensaje que deseamos transmitir, y cuya frecuencia en general no será la frecuencia de transmisión deseada. Esta señal modificará algún parámetro de la portadora.

Modulación: Modificación de algún parámetro de una señal por otra.

Señal modulada: Señal resultante de la modulación de una señal portadora por una señal moduladora.

La clasificación de los tipos de modulación existente se basa en dos criterios:

Tipo de señal: tanto la portadora como la moduladora pueden ser analógica o digital, resultando en 4 posibilidades AA, AD, DD, DA.

Parámetro de la portadora que se modifica: Los parámetros de la señal portadora que puede modificar la moduladora son tres: amplitud, frecuencia y fase.

Por tanto, estos dos criterios determinan la clasificación de los tipos de modulación existente:

Amplitud (AM, ASK: Amplitude Shift Keyne). La moduladora modifica la amplitud de la moduladora.

Frecuencia (FM, FSK: FrequencyShift Keyne). La moduladora modifica la frecuencia de la modulada.

Fase (PM, PSK: Phase Shift Keyne). La moduladora modifica la fase de la modulada.

Existen varias razones para modular, entre ellas:

Facilita la *propagación* de la señal de información por cable o por el aire.

Ordena el *radioespectro*, distribuyendo canales a cada información distinta.

Disminuye *dimensiones* de antenas.

Optimiza el ancho de banda de cada canal

Evita *interferencia* entre canales.

Protege a la Información de las degradaciones por *ruido*.

Define la *calidad* de la información transmitida.

4.2.1. Moduladora analógica y portadora analógica

4.2.1.1. Modulación de Amplitud – AM

Las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas. Un modulador AM es un dispositivo con dos señales de entrada, una señal portadora de amplitud y frecuencia constante, y la señal de información o moduladora. El parámetro de la señal portadora que es modificado por la señal moduladora es la amplitud.

4.2.1.2. Modulación de Frecuencia - FM

Las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas y es un tipo de modulación exponencial. En este caso la señal modulada mantendrá fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que variará es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a como varíe la amplitud de la señal moduladora.

4.2.1.3. Modulación de fase – PM

Las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas y es un tipo de modulación exponencial al igual que la modulación de frecuencia. En este caso el parámetro de la señal portadora que variará de acuerdo a señal moduladora es la fase. La modulación de fase (PM) no es muy utilizada principalmente por que se requiere de equipos de recepción más complejos que en FM y puede presentar problemas de ambigüedad para determinar por ejemplo si una señal tiene una fase de 0° o 180°.

4.2.2. Moduladora analógica y portadora digital

4.2.2.1. Modulación por amplitud de pulso (PAM)

En el caso de la modulación por amplitud de pulso, la anchura y la separación de los pulsos permanece constante, siendo la amplitud de los mismos lo que varía de acuerdo con la amplitud de la moduladora.

4.2.2.2. Modulación por posición de pulso (PPM)

La anchura y la amplitud de los pulsos permanece constante, siendo la posición de los mismos lo que varía de acuerdo con la amplitud de la moduladora.

4.2.2.3. Modulación por duración de pulso (PDM)

La amplitud y la separación de los pulsos permanece constante, siendo la anchura de los mismos lo que varía de acuerdo con la amplitud de la moduladora.

4.2.2.4. Modulación por pulsos codificados (PCM) o MIC.

Un sistema de modulación que ha alcanzado un gran auge es PCM, también llamado MIC, este sistema convierte una señal analógica en digital siguiendo los siguientes pasos: 1. Muestreo con PAM, PPM o PDM. 2. Cuantización y 3. Codificación.

La señal analógica que se transmite es primero muestreada y las muestras resultantes forman un tren de impulsos modulados en amplitud (PAM). A continuación, a dichos impulsos se les asigna un valor cuantizado, siendo realizada esta operación por un cuantizador. Los impulsos cuantizados son codificados normalmente en grupos, de acuerdo con el código binario. Cada grupo de impulsos representa su nivel cuantizado como un número binario y el número máximo de impulsos en un grupo depende del número total de niveles cuantizados elegidos para el sistema.

4.2.3. Moduladora digital y portadora analógica (modulación digital)

4.2.3.1. Modulación por desplazamiento en amplitud (ASK)

Este tipo de modulación se corresponde con una portadora analógica y una moduladora digital. Los valores binarios se representan mediante dos amplitudes

distintas de la portadora. Lo más usual es que una de las amplitudes sea cero, de modo que uno de los dígitos binario se represente como la portadora con su amplitud original y el otro mediante ausencia de portadora. Velocidad de hasta 1200 bps en líneas de voz. Usado en fibra óptica, en este caso se emite una señal de baja intensidad en lugar de “ausencia de señal”, y esta señal de baja intensidad sirve de señalización.

4.2.3.2. Modulación por desplazamiento en frecuencia (FSK)

Para el caso de una FSK se tiene que los dos valores binarios se representan mediante 2 frecuencias distintas, próximas a la frecuencia de la portadora.

4.2.3.3. Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

En la PSK la señal portadora se desplaza (cambia su fase) para representar los datos digitales. Si representamos señales binarias, la modulación PSK coherente representará un 0 con una fase y un 1 con la fase anterior desplazada 180 grados. En el caso de la PSK diferencial, en la que un 0 se representa con una señal con la misma fase que el elemento anterior y un 1 cambiando la fase con respecto al elemento anterior la portadora usará dos fases diferentes para representar los dos valores distintos. Tiene varias modalidades en función de la velocidad de símbolo:

Desplazamiento de fase en cuadratura o QPSK. Uso más eficaz del ancho de banda si cada elemento de señal transmite más de un bit.

Con desplazamiento de 90° se pueden transmitir 2 bits por elemento de señal. Con desplazamientos de 45° 3 bits etc.

Los módems de 9600 baudios usan 12 ángulos, cuatro de los cuales tienen dos amplitudes. El análisis en el receptor de la transmisión es estadístico.

4.3. Multiplexación.

La compartición de un medio y de su camino de transmisión se conoce por multiplexado, transmisión múltiplex o multiplexación, se puede definir como un conjunto de reglas (protocolos) que permiten a N estaciones utilizar un medio de transmisión compartido. Esta se puede realizar tanto en tiempo como en frecuencia. Existen dos técnicas fundamentales para llevar a cabo la multiplexación:

- División de Frecuencia (FDM) empleada en radio, televisión.
- División en el Tiempo (TDM) que puede ser síncrona utilizada para multiplexar flujos de voz digitalizada y de datos. Mientras la asíncrona: también denominada TDM estadística, es mucho más compleja que la anterior.

Lo más frecuente en el mundo analógico es emplear la técnica de multiplexación por división de frecuencia. FDM. En el mundo digital no se puede usar esa técnica y se utiliza una diferente que se llama de multiplexación por división de tiempo, TDM (Time División Multiplexig). TDM síncrona y asíncrona parten de unos principios básicos comunes, pero se diferencian por la rigidez a la hora de hacer cumplirlos.

El multiplexor facilita la transmisión entre dos equipos terminales de datos que se comunican por cables coaxiales, enlaces por microondas, o satélite, que frecuentemente no utilizan la capacidad total del canal, desperdiciando parte de la anchura de banda disponible. Para ello estos equipos se encargan de recibir N entradas (procedentes de distintos usuarios) y reparten el uso del medio de transmisión en varios canales independientes que permiten accesos simultáneos a los usuarios, siendo totalmente transparente a los datos transmitidos.

En un extremo, los multiplexores son equipos que reciben varias secuencias de datos de baja velocidad y las transforman en una única secuencia de datos de alta velocidad, que se transmiten hacia un lugar remoto. En dicho lugar, otro multiplexor realiza la operación inversa obteniendo de nuevo los flujos de datos de baja velocidad originales. A esta función se la denomina demultiplexar.

4.3.1. Multiplexado por división de frecuencia (FDM)

Técnica que consiste en dividir mediante filtros el espectro de frecuencias del canal de transmisión y desplazar la señal a transmitir dentro del margen del espectro correspondiente mediante modulaciones, de tal forma que cada usuario tiene posesión exclusiva de su banda de frecuencias (llamadas subcanales). Es decir en FDM el ancho de banda disponible se divide en un número determinado de slots o segmentos independientes (sin solapamientos). Cada segmento lleva una señal de información, como por ejemplo un canal de voz.

Esta técnica es muy popular en la transmisión analógica como la radiodifusión, TV, suponiendo que los mensajes a transmitir son de ancho de banda limitado, lo que se hace es modular cada uno de ellos a una frecuencia portadora distinta con lo que se consigue trasladar el mensaje a otra banda del espectro de frecuencias que se encuentre libre. Por tanto en un sistema FDM a cada canal de información se le asigna un slot (o segmento, o canal) distinto dentro de una banda de frecuencias. Por ejemplo, en telefonía, cada canal de voz se modula a una frecuencia de portadora diferente, lo que permite la translación de la señal de voz a su propio slot (o

segmento) de un ancho de banda determinado y que es diferente del resto de los canales modulados que comparten el mismo espectro.

FDM es posible sólo cuando el ancho de banda disponible del medio de transmisión es superior que el ancho requerido por las señales a transmitir. Para prevenir problemas de interferencias los canales están separados por bandas de guarda, que son porciones de espectro que no se usan. Los dos principales problemas a los que FDM tiene que hacer frente son:

Crosstalk: ocurre cuando los espectros de dos señales adyacentes se solapan significativamente. Por ejemplo en caso de señales de voz, cuyo ancho de banda significativo está en torno a los 3100Hz, un ancho de canal de 4KHz es suficiente.

Ruido de intermodulación: en un enlace largo, los efectos no lineales de los amplificadores sobre la señal pueden producir componentes frecuenciales en otros canales.

La técnica de FDM presenta cierto grado de normalización. Una norma de gran uso es la correspondiente a 12 canales de voz, cada uno de 4.000 Hz. (3.100 para el usuario y el resto para la banda de guarda) multiplexado en la banda de 60-108 KHz. A esta unidad se le llama grupo, se pueden multiplexar cinco grupos (60 canales de voz) para formar un supergrupo. La siguiente unidad es el grupo maestro, que está constituido por cinco supergrupos (de acuerdo con las normas del UIT) o por diez grupos (de acuerdo a Bell System).

Las técnicas de desplazamiento de frecuencia pueden seguir usándose para combinar supergrupos en anchos de banda superiores y así llegar a formar los llamados grupos maestros (master group), los grupos "jumbo", etc. Como resultado de todas estas composiciones, disponemos de miles de canales telefónicos combinados secuencialmente en márgenes ascendentes de frecuencia, en los que, no obstante, cada canal vocal sigue ocupando un ancho de banda absoluto de 4000 Hz.

4.3.2. Multiplexado por división temporal síncrona (TDM síncrona)

Consiste en asignar a cada usuario, durante unas determinadas "ranuras de tiempo", la totalidad del ancho de banda disponible. Esto se logra organizando el mensaje de salida en unidades de información llamadas tramas, y asignando intervalos de tiempo fijos dentro de la trama a cada canal de entrada. De esta forma, el primer canal de la trama corresponde a la primera comunicación, el segundo a la

segunda, y así sucesivamente, hasta que el n-esimo más uno vuelva a corresponder a la primera.

El uso de esta técnica es posible cuando la tasa de los datos del medio de transmisión excede de la tasa de las señales digitales a transmitir. El multiplexor por división en el tiempo muestrea, o explora, cíclicamente las señales de entrada (datos de entrada) de los diferentes usuarios, y transmite las tramas a través de una única línea de comunicación de alta velocidad. Los TDM son dispositivos de señal discreta y no pueden aceptar datos analógicos directamente, sino demodulados mediante un módem. El multiplexado por división temporal se rige por un concepto completamente diferente al multiplexado por división frecuencial.

En efecto, en el multiplexado por división temporal o por tiempo compartido, las diferentes señales se transmiten por un único canal, permitiéndose el uso del ancho de banda total del sistema, pero solo por pequeños períodos de tiempo llamados time slot. Las regiones de tiempo entre time slots no usadas se denominan tiempos de guarda y tienen la finalidad de disminuir la interferencia entre señales adyacentes.

4.3.3. Multiplexado por división temporal asíncrona (TDM asíncrona o TDM estadístico)

En situaciones reales, ningún canal de comunicaciones permanece continuamente transmitiendo, de forma que, si se reserva automáticamente una porción del tiempo de transmisión para cada canal, existirán momentos en los que, a falta de datos del canal correspondiente, no se transmita nada y, en cambio, otros canales esperen innecesariamente. En el caso de TDM síncrono, existen ranuras de tiempo que no contienen información, repercutiendo en un desperdicio de la capacidad de transmisión del medio. TDM estadístico es una alternativa para reducir ese desperdicio.

La TDM estadística distribuye las ranuras de manera dinámica, basándose en la demanda. El multiplexor sondea las memorias de almacenamiento de entrada, aceptando datos hasta que se complete una trama. La idea de la multiplexación estadística consiste en transmitir los datos de aquellos canales que, en cada instante, tengan información para transmitir.

Los multiplexores TDM estadísticos, asignan dinámicamente los intervalos de tiempo entre los terminales activos y, por tanto, no se desaprovecha la capacidad de

la línea durante los tiempos de inactividad de los terminales. El funcionamiento de estos multiplexores permite que la suma de las velocidades de los canales de entrada supere la velocidad del canal de salida. Si en un momento todos los canales de entrada tienen información, el tráfico global no podrá ser transmitido y el multiplexor necesitará almacenar parte de esta información.

Los multiplexores estadísticos han evolucionado en un corto período de tiempo convirtiéndose en máquinas muy potentes y flexibles. Han acaparado prácticamente el mercado de la TDM y constituyen actualmente una seria competencia a los FDM. Estos proporcionan técnicas de control de errores y control del flujo de datos, algunos proporcionan la circuitería de modulación para realizar la interfaz con redes analógicas. De otra forma, sería necesario usar módem separados. El control de flujo se emplea para prevenir el hecho de que los dispositivos puedan enviar datos a un ritmo excesivo a las memorias tampón buffer de los multiplexores.

4.4. Redes de telecomunicaciones.

Los equipos informáticos y los que son específicos de transmisión de datos, necesitan de procedimientos muy determinados para enviar y recibir datos, de forma de saber exactamente donde comienza y donde finaliza cada conjunto de bits que componen los caracteres (Byte). Estos procedimientos específicos denominados de sincronización, deben estar perfectamente determinados en las dos situaciones técnicamente posibles.

Una cuando los datos serán transmitidos entre dos equipos en forma digital (vínculos o redes digitales). Otra cuando deben ser transmitidos por medios analógicos. En este último caso, será necesario transformar las señales digitales generadas en los equipos informáticos, usando módems, en señales capaces de poder ser transmitidas por este tipo de vínculos o redes analógicas.

Existen dos formas de transmitir las señales, el modo paralelo y el modo serie, a su vez el modo serie, tiene dos procedimientos diferentes, el denominado asíncrono y el sincrónico. En la figura 9 se muestran características.

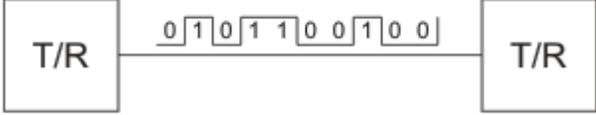
<p>Se denomina transmisión en modo paralelo cuando los n bits que componen cada Byte o carácter se transmiten en un solo ciclo de n bits.</p>	
<p>Se denomina transmisión en modo serie cuando los bits que componen cada carácter se transmiten en n ciclos de 1 bit cada uno.</p>	

Figura 9. Transmisión Paralela y Serial. Fuente: Valencia M. Ángel (2010). Introducción a la ingeniería de telecomunicaciones. Pág. 139 y 140.

4.4.1. Transmisión en modo paralelo

La transmisión en modo paralelo posee las siguientes características: Este modo es el que se usa en las computadoras para realizar la transferencia interna de los datos, en casos en que se usen códigos internos de 8 bits por Byte, en cada ciclo se transfieren los 8 bits de cada carácter simultáneamente.

En estos casos se transmite cada conjunto de n bits, seguido por un espacio de tiempo y luego nuevamente otro conjunto de n bits y así sucesivamente. En la transmisión en paralelo se pueden usar dos formas de transmisión distintas, una es disponer de n líneas diferentes a razón de una por bit a transmitir, la otra es usar una única línea, pero enviando cada bit mediante un procedimiento técnico que se denomina multiplexado. Cuando se usa la transmisión en paralelo, se emplean generalmente altas velocidades, dado que esa es precisamente, una de sus características más importantes; enviar más bits en el menor tiempo posible, en estos casos las velocidades se miden en Bytes o caracteres por segundo. En general no se usa este tipo de transmisión, cuando las distancias superan las decenas de metros debido a que el tiempo de arribo de los bits difiere de una línea a otra, situación que se agrava con el aumento de la distancia.

4.4.2. Transmisión en modo serie

La transmisión en modo serie posee las siguientes características:

- Se envía un bit después del otro, hasta completar cada carácter.
- Este modo de transmisión es el típico de los sistemas teleinformáticos.

- En muchas oportunidades, las señales que son transmitidas por los vínculos de telecomunicaciones, al llegar a los equipos informáticos deben pasar al modo paralelo, este proceso de transformación se denomina “deserialización”, análogamente cuando desde un equipo informático las señales deben ser transformadas del modo paralelo al modo serie, se debe verificar el proceso inverso, es decir el de “serialización” .

- La transmisión serial es más lenta que la paralela puesto que se envía un bit a la vez. Una ventaja significativa de la transmisión serial en relación a la paralela es un menor costo del cableado, puesto que se necesita un solo cable se tiene un octavo del costo que se ocuparía para transmisión paralela. Este ahorro en costo se vuelve más significativo conforme sean mayores las distancias requeridas para la comunicación.

- Otra ventaja importante de la transmisión serial es la habilidad de transmitir a través de líneas telefónicas convencionales a mucha distancia, mientras que la transmisión en paralelo está limitada en distancia en un rango de metros.

- Un aspecto fundamental de la transmisión serie es el sincronismo, entendiéndose como tal al procedimiento mediante el cual transmisor y receptor reconocen los ceros y unos de los bits de igual forma.

4.4.3. Canal de comunicación

Se denomina así al recurso físico que hay que establecer entre varios medios de transmisión para establecer la comunicación. Al canal de comunicación también se lo denomina vínculo o enlace. El Ancho de banda de un canal tiene limitada la frecuencia máxima de transmisión, por motivos tales como:

- Limitaciones físicas del canal.
- Existencia de perturbaciones e interferencias externas.

Es por ello que el ancho de banda del canal siempre está limitado. Se denominará ancho de banda de un canal a la diferencia de las frecuencias máxima y mínima que se pueden transmitir por el canal ‘sin atenuación’.

Por ejemplo, se dispone de un canal telefónico con frecuencias de corte 300 y 3000 Hz, el ancho de banda del canal será: $f_i = 300 \text{ Hz}$, $f_s = 3000 \text{ Hz}$, $W = f_s - f_i = 3000 - 300 = 2700 \text{ Hz}$. Es decir, el ancho de banda será la diferencia entre las frecuencias de corte.

4.4.4. Comunicación Simplex

En este caso el transmisor y el receptor están perfectamente definidos y la comunicación es unidireccional. Este tipo de comunicaciones se emplean usualmente en redes de La radiodifusión (broadcast) de TV y radio, el paging unidireccional, etc., donde los receptores no necesitan enviar ningún tipo de dato al transmisor. Normalmente la transmisión simplex no se utiliza donde se requiere interacción humano-máquina.

4.4.5. Comunicación Half-duplex

La transmisión half-duplex (hdx) permite transmitir en ambas direcciones; sin embargo, la transmisión puede ocurrir solamente en una dirección a la vez. Tanto transmisor y receptor comparten una sola frecuencia.

Un ejemplo típico de half-duplex es el radio de banda civil (CB) donde el operador puede transmitir o recibir, no pero puede realizar ambas funciones simultáneamente por el mismo canal. Cuando el operador ha completado la transmisión, la otra parte debe ser avisada que puede empezar a transmitir (e.g. diciendo "cambio"). Este tipo de comunicación se utiliza habitualmente en la interacción entre terminales y un computador central.

4.4.6. Comunicación Full Duplex

La transmisión full-duplex (fdx) permite transmitir en ambas direcciones, pero simultáneamente por el mismo canal. Existen dos frecuencias una para transmitir y otra para recibir. Ejemplos de este tipo abundan en el terreno de las telecomunicaciones, el caso más típico es la telefonía, donde el transmisor y el receptor se comunican simultáneamente utilizando el mismo canal, pero usando dos frecuencias. Para el intercambio de datos entre computadores este tipo de comunicaciones son más eficientes que las transmisiones half-duplex.

4.4.7. Tipos de conexión

La distribución geográfica de dispositivos terminales y la distancia entre cada dispositivo y el dispositivo al que se transmite son parámetros importantes que deben ser considerados cuando se desarrolla la configuración de una red. Los dos tipos de conexiones utilizados en redes son punto a punto y multipunto.

Las líneas de conexión que solo conectan dos puntos son punto a punto. Cuando dos o más localidades terminales comparten porciones de una línea común, la línea es multipunto. Aunque no es posible que dos dispositivos en una de estas líneas transmita al mismo tiempo, dos o más dispositivos pueden recibir un mensaje al mismo tiempo. En algunos sistemas una dirección de difusión (broadcast) permite a todos los dispositivos conectados a la misma línea multipunto recibir un mensaje al mismo tiempo.

Cuando se emplean líneas multipunto, se pueden reducir los costos globales puesto que porciones comunes de la línea son compartidos para uso de todos los dispositivos conectados a la línea. Para prevenir que los datos transmitidos de un dispositivo interfieran con los datos transmitidos por otro, se debe establecer una disciplina o control sobre el enlace. Cuando se diseña un red local de datos se pueden mezclar tanto líneas punto a punto como multipunto, y la transmisión se puede efectuar en modo simplex, half-duplex o full-duplex.

4.4.8. Definición de medio de transmisión

Medio de transmisión es el sistema (físico o no) por el que viaja la información transmitida (datos, voz, audio...) entre dos o más puntos distantes entre sí. Por el medio de transmisión viajan ondas electromagnéticas, que son las que realmente llevan la información. El protagonista principal de cualquier comunicación es el medio de transmisión sobre el que ésta tiene lugar: el coste de una comunicación de larga distancia puede atribuirse en su mayor parte a los medios de transmisión, mientras que en el caso de las comunicaciones a corta distancia, el costo fundamental recae sobre los equipos. Se pueden distinguir básicamente dos tipos de medios:

Medios guiados: cuando las ondas están ligadas a algún tipo de medio físico: pares trenzados (UTP,STP,FTP), cables coaxiales, fibras ópticas.

Medios no guiados: cuando las ondas no están encauzadas (aire, mar, vacío): microondas terrestres, microondas satélite, infrarrojos, radio.

4.4.8.1. Medios guiados

A este grupo pertenecen todos aquellos medios en los que se produce un confinamiento de la señal. En estos casos la capacidad de transmisión (velocidad de transmisión V_t , o ancho de banda) depende de dos factores:

Distancia.

Tipo de enlace:

- Punto-a-Punto
- Difusión.

Principalmente existen 3 tipos:

Pares trenzados: Se trata de dos hilos conductores de cobre envueltos cada uno de ellos en un aislante y trenzado el uno alrededor del otro para evitar que se separen físicamente, y sobre todo, para conseguir una impedancia característica bien definida.

Al trenzar los cables, se incrementa la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas (interferencias y diafonía), dado que el acoplamiento entre ambos cables es mayor, de forma que las interferencias afectan a ambos cables de forma más parecida.

Al cruzar los pares de hilos se consigue reducir el crosstalk existente entre ellos, así como el campo creado alrededor de los mismos, dado que la corriente inducida sobre cada uno de los cables se ve prácticamente cancelada por la corriente que circula por el otro hilo (de retorno) del par.

Es necesario que los cables tengan una impedancia característica bien definida para asegurar una propagación uniforme de las señales de alta velocidad a lo largo del cable, y para garantizar que la impedancia de los equipos que se conectan a la línea es la adecuada, de modo que pueda transferirse la máxima potencia de ésta.

El aislante tiene dos finalidades: proteger de la humedad al cable y aislar los cables eléctricamente unos de otros. Comúnmente se emplea polietileno, PVC.

Los hilos empleados son de cobre sólido de 0.2 - 0.4 mm de diámetro. El paso de torsión de cada cable puede variar entre una torsión por cada 7 cm en los de peor calidad y 2 vueltas por cm. en los de mejor calidad.

Cable coaxial: Las señales eléctricas de alta frecuencia circulan por la superficie exterior de los conductores, por lo que los pares trenzados y los cables de pares resultan ineficientes. El efecto de las corrientes de superficie se traduce en que la atenuación se incrementa con la raíz cuadrada de la frecuencia. El cable coaxial consiste en dos conductores cilíndricos concéntricos, entre los cuales se coloca generalmente algún tipo de material dieléctrico (polietileno, PVC). Lleva una cubierta protectora que lo aísla eléctricamente y de la humedad.

Los dos conductores del coaxial se mantienen concéntricos mediante unos pequeños discos. La funcionalidad del conductor externo es hacer de pantalla para que el coaxial sea muy poco sensible a interferencias y a la diafonía. Estos se

utilizan para transmisión de datos a alta velocidad a distancias de varios kilómetros, es decir, se cubren grandes distancias, con mayores velocidades de transmisión y ancho de banda, así como la conexión de un mayor número de terminales.

Fibra óptica: Es una fibra flexible, extremadamente fina, capaz de conducir energía óptica (luz). Para su construcción se pueden usar diversos tipos de cristal; las de mayor calidad son de sílice, con una disposición de capas concéntricas, donde se pueden distinguir tres partes básicas: núcleo, cubierta y revestimiento. El diámetro de la cubierta suele ser de centenas de μm (valor típico: $125 \mu\text{m}$), el núcleo suele medir entre 2 y $10 \mu\text{m}$, mientras que el revestimiento es algo mayor: decenas de mm. Para darle mayor protección a la fibra se emplean fibras de kevlar.

La transmisión por fibra óptica se basa en la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y la cubierta que tiene un índice de refracción menor. El núcleo transmite la luz y el cambio que experimenta el índice de refracción en la superficie de separación provoca la reflexión total de la luz, de forma que sólo abandona la fibra una mínima parte de la luz transmitida.

En función de cómo sea el cambio del valor del índice de refracción las fibras se dividen en:

Fibras ópticas de índice a escala (stepped-index): donde el cambio es muy abrupto.

Fibras ópticas de modo gradual (graded-index o gradex): que experimentan un cambio gradual parabólico.

4.4.8.2. Medios no guiados - transmisión inalámbrica

La radiocomunicación puede definirse como telecomunicación realizada por medio de las ondas eléctricas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), define las ondas radioeléctricas como las ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial y cuyo límite superior de frecuencia se fija, convencionalmente, en 3.000 GHz. La radiocomunicación que hace uso de elementos situados en el espacio, se denomina radiocomunicación espacial. Toda radiocomunicación distinta de la espacial y de la radioastronomía, se llama radiocomunicación terrenal.

La técnica de la radiocomunicación consiste en la superposición de la información que se desea transmitir en una onda electromagnética soporte, llamada portadora. La inserción de esa información constituye el proceso denominado modulación. La onda modulada se envía al medio de propagación a través de un dispositivo de acoplamiento con el medio denominado antena. El conjunto de

equipos para el tratamiento de la información: moduladores, filtros, antenas .constituye la estación transmisora (o abreviadamente, el transmisor).

Cuando la onda transmitida alcanza el punto o puntos de destino, accede al sistema receptor por medio de una antena de recepción, que capta una fracción de la energía. El alcance útil o cobertura de una emisión radioeléctrica depende del tipo e intensidad de las perturbaciones. Existen dos tipos fundamentales de transmisión inalámbrica:

Omnidireccionales: La antena transmisora emite en todas las direcciones espaciales y la receptora recibe igualmente en toda dirección.

Direccionales: La energía emitida se concentra en un haz, para lo cual se requiere que la antena receptora y transmisora estén alineadas. Cuanto mayor sea la frecuencia de transmisión, es más factible confinar la energía en una dirección.

El espectro de frecuencias está dividido en bandas de la siguiente manera: VLF Very Low Frequency 3-30KHz, LF Low Frequency 30-300KHz, MF Mid Frequency 300-3000KHz, HF High Frequency 3-30MHz, VHF Very High Frequency 30-300MHz, UHF Ultra High Frequency 300-3000MHz, SHF Super High Frequency 3-30GHz y EHF Extra High Frequency 30-300GHz 300-3000GHz

Básicamente se emplean tres tipos de ondas del espectro electromagnético para comunicaciones:

Microondas: 2 GHz - 40 GHz. Muy direccionales. Pueden ser terrestres o por satélite.

Ondas radio: 30 MHz - 1 GHz. Omnidireccionales.

Infrarrojos: $3 \cdot 10^{11}$ - 200THz.

Entre los tipos de enlaces para los medios no guiados basado en micro ondas se tienen:

Microondas terrestres: La antena típica de este tipo de microondas es parabólica y tiene unos tres metros de diámetro; el haz es muy estrecho por lo que las antenas receptoras y emisora deben estar muy bien alineadas. A cuanto mayor altura se sitúen las antenas con mayor la facilidad podrán esquivar obstáculos. La distancia que cubre un único radioenlace de microondas viene dada por la expresión. $d = 7.14 \cdot (k \cdot h)^{1/2}$. h = altura de la antena (m) k = 1 si no consideramos los efectos de la gravedad. Generalmente se toma k = 3/4.

Microondas por satélite: El satélite se comporta como una estación repetidora que recoge la señal de algún transmisor en tierra y la retransmite difundiéndola entre una o varias estaciones terrestres receptoras, pudiendo regenerar dicha señal o limitarse a repetirla. Las frecuencias ascendente y descendente son distintas: $f_{asc} <$

fdesc. Para evitar interferencias entre satélites está normalizada una separación entre ellos de un mínimo de 3°(en la banda de la 12/14Ghz) o 4° (4/6GHz).

- El rango de frecuencias óptimo para la transmisión comprende 1-10 GHz.
- Por debajo de 1 GHz aparecen problemas debidos al ruido solar, galáctico y atmosférico.
- Por encima de 10 GHz, predominan la absorción atmosférica así como la atenuación debida a la lluvia. Cada satélite opera en una banda de frecuencia determinada conocida como Transpondedor.

Entre las aplicaciones figuran tanto enlaces punto-punto entre estaciones terrestres distantes como la difusión:

Difusión de TV: el carácter multidesdino de los satélites los hace especialmente adecuados para la difusión, en particular de TV, aplicación para la que están siendo ampliamente utilizados.

Telefonía: los satélites proporcionan enlaces punto-a-punto entre centrales telefónicas en las redes públicas de telefonía. Es el medio óptimo para enlaces internacionales con un alto grado de utilización, y tecnológica y económicamente es competitivo con otros tipos de enlaces internacionales.

Redes privadas: la capacidad del canal de comunicaciones es dividido en diferentes canales de menor capacidad que se alquilan a empresas privadas que establecen su propia red sin necesidad de poner un satélite en órbita.

4.5. Conmutación telefónica y señalización.

La conmutación de circuitos telefónicos está basada en los mismos principios empleados en los sistemas telefónicos y de telex. En la conmutación de circuitos una persona o terminal coloca en la red una llamada indicando el número o dirección del destinatario; el sistema de conmutación establece entonces una conexión física entre los nodos de red apropiados por todo el tiempo de duración de la llamada; la duración del establecimiento de la conexión dependerá del número de nodos y del tiempo de espera en cada nodo antes de que el nodo siguiente esté disponible. En la figura 10 se muestra un ejemplo de conmutación de este tipo.

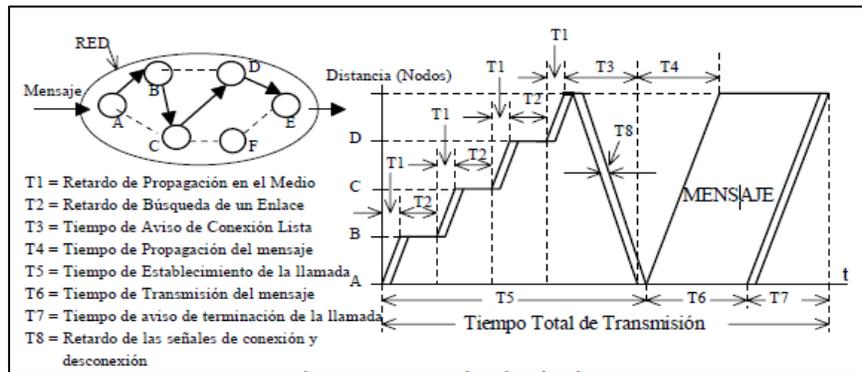


Figura 10. Conmutación de Circuitos de Telefónicos. Fuente: Briceño M., José E. (2005). Transmisión de datos. Pág. 17.

Una vez establecido el circuito o canal, éste es utilizado únicamente por las partes que se están comunicando, y aunque en el sistema pudiera ocurrir alguna modulación o algún multiplexamiento en el tiempo o en frecuencia, las partes en cuestión no se darán cuenta de ello. Las características más resaltantes de la conmutación de circuitos son su independencia de los protocolos de la red y el retardo constante en la propagación de la información en el circuito. La conexión y desconexión de los circuitos se controlan mediante sistemas de señalización establecidos por el UIT-T.

En la transmisión de un mensaje se pueden distinguir tres fases: (a) la fase de establecimiento de la llamada (T5), en la cual se establece un circuito físico entre el origen y el destino, (b) la fase de transmisión del mensaje propiamente (T6), y (c) la fase de desconexión o terminación de la llamada (T7). Estas fases, con todos sus tiempos asociados, se muestra en la Fig. 1.12 en una comunicación entre un nodo A y un nodo E a través de una red mediante cuatro enlaces $AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DE$.

El mecanismo de transmisión en la conmutación de circuitos, presentado en la figura 10 el usuario llamante solicita una conexión, por ejemplo, mediante discado de un número. El equipo de conmutación transmite la petición desde el nodo A al nodo B completándose el primer enlace AB. En el nodo B hay un retardo de búsqueda del siguiente enlace apropiado, que en este caso es el enlace BC. La petición sigue en la misma forma por los diferentes enlaces hasta llegar al nodo E completándose el circuito físico $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$. En el nodo de destino E se tiene que confirmar la disposición para recibir el mensaje; esta confirmación regresa por el mismo circuito físico directamente sin retardos (excepto el de propagación) hasta el nodo A, indicando que se puede iniciar la fase de transmisión del mensaje.

Una vez transmitido el mensaje, viene la fase de desconexión o terminación de la llamada. Como se muestra en la figura 10, el tiempo total de utilización del sistema es $T5 + T6 + T7$.

El tiempo de establecimiento de la conexión $T5$ puede ser muy alto. Por ejemplo, en la transmisión telefónica ordinaria puede ir de 5 a 25 segundos, según la distancia que recorra y condiciones de la red. El tiempo útil $T6$ de transmisión del mensaje puede ser menor que el tiempo de establecimiento $T5$ y de terminación de la llamada $T7$, condición que es onerosa para la red. Es por ello que en transmisión por conmutación de circuitos se cobra un tiempo mínimo de utilización del sistema, por ejemplo, tres minutos. Además de las redes telefónicas y de telex, la conmutación de circuitos es utilizada en la Red Pública de Datos por Conmutación de Circuitos (Circuit-Switched Public Data Network). Esta red se utiliza para la transmisión de información que no tolera retardos en la transmisión como es el caso de la voz digitalizada y facsímil, y en general para la transmisión en tiempo real de grandes volúmenes de información entre computadoras remotas.

4.5.1. Conmutación de Mensajes

En la conmutación de mensajes, cada mensaje es enviado al primer centro o nodo de conmutación de la red donde es almacenado, generalmente en una memoria de disco. Si un enlace está disponible, se reenvía el mensaje a otro nodo de conmutación más cercano al destinatario en donde es de nuevo almacenado y luego retransmitido (“store and forward”); y así sucesivamente, de nodo a nodo, hasta que llega al destino. En este sistema no se establece una conexión física permanente entre llamante y llamado, y el retardo entre los instantes de envío y recibo puede ser considerable. La conmutación de mensajes requiere entonces una red más “inteligente” con nodos capaces de leer las direcciones de los mensajes y con facilidades de almacenamiento de la información recibida hasta disponer de un enlace para la retransmisión hacia el siguiente nodo. En la figura 11 se muestra el mecanismo de transmisión de un mensaje a través de cuatro enlaces (AB, BC, CD y DE) de una red de conmutación de mensajes.

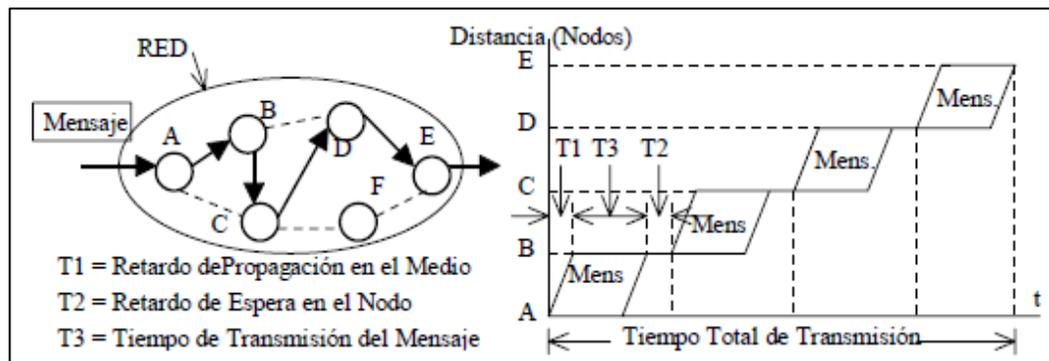


Figura 11. Conmutación de Mensajes. Fuente: Briceño M., José E. (2005). Transmisión de datos. Pág. 19.

La conmutación de circuitos, sin embargo, tiene varias ventajas sobre la conmutación de mensajes. En primer lugar, es interactiva: si una persona hace una pregunta, la respuesta es inmediata y tendrá solamente un retardo que dependerá de la velocidad de propagación de la señal en el canal de transmisión. En segundo lugar, en transmisión de datos de baja velocidad se puede transmitir en full dúplex. Por último, la velocidad del servicio es casi inmediata y la conexión con el destinatario se confirma y establece simplemente al responderse a la llamada.

La conmutación de mensajes es, sin embargo, mucho más eficiente que la conmutación de circuitos, pues los enlaces entre nodos son más eficaces y el usuario no es penalizado al tasársele los “silencios” o pausas producidos por una utilización intermitente del canal. En efecto, un canal o enlace se ocupa para transportar un mensaje; al término de ese mensaje se envía otro mensaje (de los ya almacenados) sin ningún tiempo muerto entre mensaje y mensaje. La habilidad del sistema de conmutación de mensajes para almacenar mensajes durante las horas pico y transmitirlos después, aumenta considerablemente el rendimiento del canal: éste puede trabajar al máximo de su capacidad, lo que no sucede en los sistemas de conmutación de circuitos.

4.5.2. Conmutación de Paquetes

La conmutación de paquetes es, en esencia, similar a la conmutación de mensajes, pero ahora los mensajes se subdividen en “paquetes” más pequeños que se almacenan y retransmiten en cada nodo de red. En la transmisión de mensajes el retardo nodal (tiempo de espera en el nodo más el tiempo de propagación de nodo a nodo) es relativamente grande. Si los mensajes se dividen en paquetes de menor duración, ya no se necesita memorias de disco sino memorias electrónicas (“buffers”) y el tiempo de propagación es menor también; por lo tanto, el retardo

nodal se reduce apreciablemente, aunque a cada paquete haya que agregársele el número del paquete y las direcciones de fuente y destino.

Dependiendo de la red, todos los paquetes de un mismo mensaje pueden seguir la misma ruta o ellos pueden ser enrutados independientemente, es decir, dos paquetes diferentes de un mismo mensaje pueden tomar rutas diferentes hasta llegar al destino.

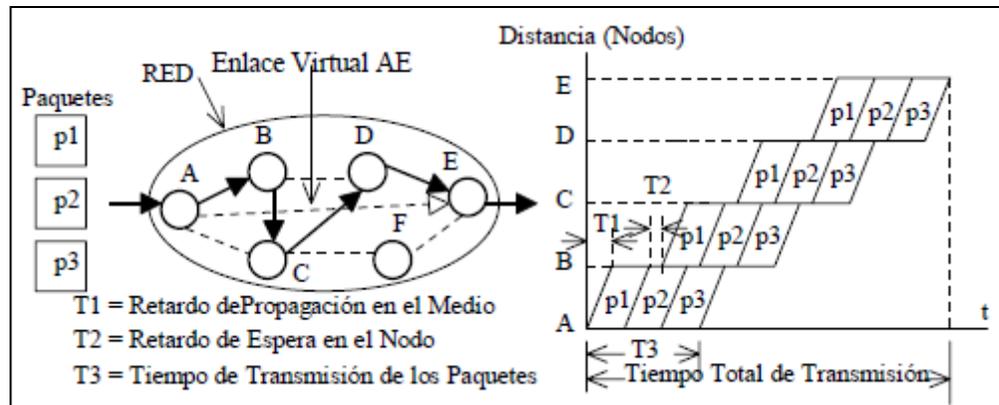


Figura 12. Conmutación de paquetes. Fuente: Briceño M., José E. (2005). Transmisión de datos. Pág. 20.

En la transmisión por paquetes se produce lo que comúnmente se denomina como “efecto tubería (pipeline effect)”, pues el mensaje completo nunca se almacena en los nodos, solamente los paquetes que se reciben y se retransmiten uno tras otro de inmediato. Sin embargo, el usuario llamante o entrante cree que dispone del canal para él solo cuando en realidad lo está compartiendo con otros usuarios; de aquí las denominaciones de “circuito virtual” o “llamada virtual” con que se conoce esta forma de conexión.

En la transmisión por paquetes, para el enrutamiento de los paquetes a lo largo de los diferentes nodos de la red, se le agrega a cada paquete las direcciones de origen y destino, y en cada nodo se determina cuál es la mejor trayectoria a seguir para alcanzar el destino. En general, cada paquete va numerado en forma secuencial; pero existe otro tipo de paquete individual que no va numerado. En este caso se dice que el paquete que va numerado es un “paquete con conexión” que requiere aviso de recepción, mientras que el paquete que no va numerado es un “paquete sin conexión” que no requiere aviso de recepción. Este último paquete se denomina “datograma (datagram)”.

Debido a que los paquetes de un mismo mensaje pueden transitar por diferentes rutas, es posible que en el lugar de destino los paquetes no lleguen en el

mismo orden en que fueron enviados. En este caso, en el nodo de destino los paquetes se reensamblan en el orden correcto para ser entregados al destinatario. En la figura 11 el mensaje se ha dividido en tres paquetes p1, p2 y p3 como ejemplificación. Como los paquetes son más pequeños, el retardo de espera es menor aunque el tiempo de transmisión de los tres paquetes es casi igual al de un mensaje. Nótese que la misma cantidad de información transmitida se transfiere en menor tiempo en el sistema de conmutación de paquetes. El sistema de conmutación de paquetes es entonces mucho más eficiente y es el utilizado en casi todas las redes de transmisión de datos, que en este caso se denominan Redes Públicas de Datos por Conmutación de Paquetes.

CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo del informe se cumplió con las expectativas del objetivo general y los específicos. Al lograr la comprensión de los fundamentos teóricos referentes a los conocimientos técnicos sobre los sistemas de comunicación analógicos y digitales dentro del universo de las telecomunicaciones, considerando sus técnicas, protocolos y teoremas que brinden al lector un marco conceptual de gran amplitud teórica.

Dentro del objetivo referido a los sistemas analógicos, se presentaron sus conceptos básicos en referencia a los sistemas de comunicación identificando los elementos que forman parte de este esquema tan utilizado mundialmente, se estudió los efectos del ruido como un elemento de distorsión, se caracterizaron los tipos de señales, así como los canales de comunicación como el medio que transporta estas señales. En este marco de ideas, se estudió la modulación lineal y exponencial, el ruido pasabandas, además de lo referente a la modulación PAM, PPM, PDM.

Dentro del marco del objetivo de los sistemas digitales, se profundizó sobre las características de modulación digital, se identificaron los aspectos técnicos que tanta aplicación tiene actualmente, en las comunicaciones telefónicas y de red de datos. Lo que permite comprender el tratamiento de transmisión de estas señales. Adicionalmente sobre el tema de los predictores que mejoran el procesamiento de audio y video. Así mismo tener información sobre la sincronización de datos permite conocer cómo se garantiza la transmisión eficiente y seguro de datos para lograr una comunicación de calidad entre dispositivos para satisfacer las necesidades de usuarios.

Finalmente para el objetivo asociado a información y telecomunicaciones, se describieron los fundamentos de la teoría de la información con sus elementos los cuales permitieron obtener información sobre los postulados de Shannon en sus

teoremas respecto a la capacidad máxima de transmisión de un canal con o sin ruido. Lo que permite determinarla basado en el modelo matemático desarrollado por este investigador.

Se caracterizó también los principios de las telecomunicaciones, determinando elementos como la fuente, emisor, canal o medio, receptor y protocolos los cuales conforman el conjunto de componentes que deben ser seleccionados para cumplir con necesidades de comunicación. Se abordó los tipos de transmisión, modulación, codificación y multiplexión con lo cual es posible determinar las aplicaciones para lograr comunicar equipos en el cambiante y vanguardista entorno actual de las comunicaciones.

Como último punto, se introdujo criterios sobre la conmutación como técnica para el envío y recepción de voz, video y datos mediante sistemas telefónicos y redes de computadoras, que incluyen además señales de televisión así como redes privadas. Considerando además los diferentes canales y el uso de conexiones alámbricas, inalámbricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Briceño M., José E. (2005). Transmisión de datos. Tercera Edición Digital. Universidad de los Andes. Mérida – Venezuela.

Costa, Marta y Duxans, Helenca (2010). Codificación del audio. Universitat Oberta de Catalunya.

Couch, W. León II. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos. Séptima Edición. Editorial Pearson Educación. México.

Nyquist, H., (1928) Temas en la teoría de la transmisión telegráfica, Transactions of the AIEE, vol. 47, febrero de 1928, pp. 617-644.

Pérez V. Constantino (2010). Modulación de Pulsos. Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Disponible en: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH7ST_Web.pdf.

Repetidores Regenerativos. electronica123456. Disponible en: <https://sites.google.com/site/sitioelectronica7/repetidores-regenerativos>.

Tomasi, Wayne (2003). Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Cuarta Edición. Editorial Pearson Educación, México.

Valencia M. Ángel (2010). Introducción a la ingeniería de telecomunicaciones. Universidad Tecnológica del Perú. Vicerrectorado de Investigación. TINS Básicos. Ingeniería de Telecomunicaciones. Lima. Perú.