

62



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

"COMUNICACIONES. TRANSMISION DIGITAL  
POR FIBRA OPTICA"

TRABAJO DE SEMINARIO  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

VALENTIN / MEDINA SALVADOR

ASESOR: ING. JORGE RAMIREZ RODRIGUEZ

280613



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



VERDAD NACIONAL  
AVANZAMA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

SECRETARÍA DE ESTUDIOS  
CUAUTITLÁN

SECRETARÍA DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN  
PRESENTE.

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES  
Jefe de Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautilán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario: Comunicaciones  
Transmisión Digital por Fibra Óptica

que presenta el pasante: Valentín Medina Salvador,  
con número de cuenta: 9117419-5 para obtener el título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgan.os nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de México, a 19 de Mayo de 2009

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>III</u>	<u>Ing. Jorge Ramírez Rodríguez</u>	<u>[Firma]</u>
<u>II</u>	<u>Ing. Juan González Vega</u>	<u>[Firma]</u>
<u>I</u>	<u>Ing. Vicente Magaña González</u>	<u>[Firma]</u>

A MI PADRE CON RESPETO Y CARÍÑO  
POR HABERME FORMADO COMO UN SER  
RESPONSABLE Y DEDICADO.

**VICTOR MEDINA GALINDO.**

A MI MADRE CON CARÍÑO, AMOR Y RESPETO  
POR QUE SIN SU APOYO INCONDICIONAL  
NO LO HUBIERA LOGRADO.

**CIPRIANA SALVADOR ROSAS.**

POR QUE CON NADA PAGARIA TODA UNA VIDA DE SACRIFICIO, EXPRESO  
UN PROFUNDO AGRADECIMIENTO A MIS PADRES POR DARME LO MAS  
VALIOSO DE ESTE NUNDO: **LA VIDA.**

A MI ESPOSA  
**ELSA SALINAS JIMENEZ**

POR EL APOYO Y AYUDA  
QUE ME BRINDA EN CADA MOMENTO

A MI PEQUEÑO HIJO  
**VICTOR TONATIUH MEDINA SALINAS**

POR QUE CON SU SONRISA  
ME HACE SEGUIR  
SIEMPRE ADELANTE.

A MIS HERMANOS, QUIENES CREYERON EN MI Y QUE CON SU EJEMPLO  
Y APOYO SEGUIRE ADELANTE SIN IMPORTAR LAS CIRCUNSTANCIAS.  
GRACIAS A TODOS:

GREGORIO MEDINA SALVADOR

CIPRIANO MEDINA SALVADOR

AGUSTIN MEDINA SALVADOR

MATILDE MEDINA SALVADOR

MARCELINO MEDINA SALVADOR

MARTHA MEDINA SALVADOR

ESTHER MEDINA SALVADOR

VICTORIA MEDINA SALVADOR

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> -----	1
<b>ANTECEDENTES DE LA FIBRA OPTICA</b> -----	2
<b>CAPITULO I.- PROCESO DE LA SEÑAL DE ENTRADA</b> -----	5
I.1.- Modulación-----	6
I.2.- Tipos de Modulación-----	7
I.2.1.- Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM)-----	9
I.2.2.- Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)-----	10
I.2.3.- Modulación por Posición de Pulso (PPM)-----	10
I.2.4.- Modulación de Pulsos Codificados (PCM)-----	12
I.3.- Modulación Digital-----	13
I.3.1.- Conmutación de Amplitud (A S K)-----	13
I.3.2.- Conmutación de Frecuencia (F S K)-----	13
I.3.3.- Conmutación de Fase (P S K)-----	15
I.4.- Muestreo-----	16
I.4.1.- Circuito de Muestreo y Retención (S / H)-----	18
<b>CAPITULO II.- CUANTIFICACIÓN DE LA SEÑAL</b> -----	23
II.1.- Error de Cuantificación-----	25

II.2.- Cuantificación Uniforme -----	25
II.3.- Cuantificación no Uniforme-----	27
II.4.- Leyes de Compansión-----	27
II.5.- Relación Señal Ruido-----	28
<b>CAPITULO III.- CODIFICACIÓN-----</b>	<b>30</b>
III.1.- Codificación Según la Ley A-----	31
III.2.- Palabra PCM -----	34
III.3.- Códigos de línea -----	36
III.3.1.- Código No Retorno a Cero (N R Z)-----	36
III.3.2.- Código Retorno a Cero (RZ)-----	36
III.3.3.- Código A M I -----	37
III.3.4.- Código Manchester -----	37
<b>CAPITULO IV.- MULTICANALIZACIÓN-----</b>	<b>38</b>
IV.1.- Multicanalización por División de Frecuencias-----	38
IV.2.- Multicanalización por División de Tiempo-----	39
IV.3.- Multicanalización de Longitud	
Por División de longitud de onda-----	42



<b>CAPITULO V.- ESTRUCTURA DE LA TRANSMISIÓN PCM</b> -----	43
V.1.- Estructuración de la Trama-----	43
V.2.- Sistema de 24 Canales-----	45
V.3.- Velocidad de Transmisión-----	45
V.4.- Señalización de Alarmas-----	46
V.5.- Detección y Corrección de Errores de Transmisión-----	47
V.5.1.- Chequeo de Paridad Vertical (VRC)-----	48
V.5.2.- Chequeo de Paridad Longitudinal (LRC)-----	49
 <b>CAPITULO VI.- CONVERTOR ANALOGICO DIGITAL</b> -----	 50
VI.1.- Características del Conversor Analógico Digital-----	51
VI.1.1.- Resolución-----	51
VI.1.2.- No Linealidad-----	52
VI.1.3.- No Linealidad Diferencial-----	53
VI.1.4.- Tiempo de Conversión-----	53
VI.1.4.- Error de Cuantificación Uniforme-----	53
VI.2.- Conversor Paralelo – Serie-----	54
 <b>CAPITULO VII. ENLACE POR FIBRA OPTICA</b> -----	 56
VII.1.- Tipos Básicos de Fibra Optica-----	57

VII.1.1.- Fibra de Índice de Escalón de Modo Sencillo-----	57
VII.1.2.- Fibra de Índice de Escalón Multimodo-----	57
VII.1.3.- Fibra de Índice Graduado Multimodo-----	57
VII.2.- Construcción-----	57
VII.3.- Parámetros Característicos de la Fibra Optica-----	58
VII.3.1.- Atenuación-----	58
VII.3.2.- Ancho de Banda-----	59
VII.3.3.- Apertura Numérica-----	60
VII.3.4.- Distancia Umbral-----	61
VII.3.5.- Pérdidas en los Cables-----	62
VII.3.6.- Cables Opticos-----	62
<b>CAPITULO VIII. CIRCUITOS DE DETECCIÓN-----</b>	<b>64</b>
VIII.1.- Demodulación-----	65
<b>CONCLUSIÓN-----</b>	<b>66</b>
<b>GLOSARIO-----</b>	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFIA-----</b>	<b>71</b>

## INTRODUCCION.

durante los últimos 10 años, la industria de las comunicaciones electrónicas ha experimentado muchos cambios, notables y dramáticos. Un incremento fenomenal en las comunicaciones de voz, datos y video, se ha reflejado en la correspondiente demanda de sistemas de comunicación, siendo más económicos y con mayor capacidad. Esto ha causado una revolución técnica en la industria de las comunicaciones electrónicas. Los sistemas de microondas terrestres han superado, desde hace tiempo, su capacidad y los sistemas de satélite pueden proporcionar a lo mucho, sólo un alivio temporal a la demanda siempre en aumento. Es obvio que son necesarios los sistemas de comunicación económicos que pueden soportar grandes capacidades y proporcionar un servicio de alta calidad.

Los sistemas de comunicación que utilizan la luz como la portadora de información, recientemente recibieron mucha atención. Debido a que propagar ondas de luz por la atmósfera de la Tierra es difícil e impráctico. En consecuencia los sistemas que utilizan cables, de fibra de vidrio o plástico, para "contener" una onda de luz y guiarla de una fuente a un destino están siendo investigados actualmente en varios prominentes laboratorios de investigación y desarrollo. Los sistemas de comunicación que cargan información, por un cable de fibra guiado, son llamados Sistemas ópticos.

La capacidad para llevar información de un sistema de comunicación es directamente proporcional a su ancho de banda, entre más ancha sea la banda, mayor es su capacidad para llevar información. Para fines comparativos es común expresar el ancho de banda en un sistema de radio VHF, funcionando a 100 MHz, podría tener un ancho de banda igual a 10 MHz (es decir, 10 % de la frecuencia de la portadora). Un sistema de radio de microondas funcionando a 6 GHz con un ancho de banda igual a 10 % de la frecuencia de la portadora, tendría un ancho de banda igual a 600 MHz. Por lo tanto, entre más alta la frecuencia de la portadora, es más grande el ancho posible de la banda y en consecuencia mayor la capacidad de información. Las frecuencias de luz usadas en los sistemas de fibra óptica están entre  $10^{14}$  y  $4 \times 10^{14}$  Hz (100,000 a 400,000 GHz). Diez por ciento de 100,000 Hz es 10,000 GHz. Para llenar actualmente las necesidades de comunicaciones o las necesidades del futuro previsible, 10,000 GHz es un ancho de banda excesivo. Sin embargo, si ilustra las capacidades de los sistemas de fibra óptica.

## ANTECEDENTES DE LA FIBRA OPTICA.

En 1880, Alexander Graham Bell, experimentó con un aparato que llamó fotófono. El fotófono era un aparato construido con espejos y detectores de selenio que transmitía ondas de sonido a través de un haz de luz. El fotófono era embarazoso, no confiable y sin ninguna aplicación práctica. En realidad, la luz visual era el medio principal para comunicarse, antes que las comunicaciones electrónicas surgieran. Las señales de humo y espejos fueron usados, hace años para transmitir mensajes cortos y sencillos. Sin embargo, el artefacto de Bell fue el primer intento de usar un haz de luz para llevar información.

La transmisión de las ondas de luz por cualquier distancia útil por la atmósfera de la Tierra es impráctica, porque el vapor de agua, oxígeno y partículas en el aire absorben y atenúan las señales en las frecuencias de luz. En consecuencia, el único tipo práctico de Sistema de Comunicación Óptica es el que utiliza una guía de fibra. En 1930, J. L. Baird, un científico Inglés y, C. W. Hansell un científico de Estados Unidos, fueron concesionados con las patentes para rastrear y transmitir imágenes de televisión, a través de cables de fibra no cubiertos. Unos cuantos años después, un científico alemán llamado H. Lamm, transmitió exitosamente imágenes a través de una fibra de vidrio sencillo. En ese momento, la mayoría de las personas consideraban a las fibras ópticas más como un juguete o hazaña de laboratorio y en consecuencia, hasta principios de los años 50, algún descubrimiento sustancial fue hecho en el campo de la fibra óptica.

En 1951, A. C. S. Van Heel de Holanda; H.H. Hopkins y N. S. Kapany, de Inglaterra, experimentaron con la transmisión de la luz a través de paquetes de fibras. Sus estudios llevaron al desarrollo del fibrascopio flexible, el cual se usa extensamente en el campo médico, fue Kapany quien acuñó el término "fibras ópticas" en 1956.

En 1958 Charles H. Townes, un americano y, Artur L. Schawlow, un Canadiense, escribieron un artículo describiendo cómo era posible usar emisión simulada para amplificar las ondas de luz (láser), así como las microondas (másér). Dos años después, Theodore H. Mainman, un científico con la Hughes Aircraft Company construyó el primer másér óptico.

El *láser* (amplificación de luz estimulada por emisión de radiación) fue inventado en 1960. La potencia relativamente alta de salida de láser, alta frecuencia de operación y capacidad para llevar una señal de ancho de banda extremadamente grande, lo hacen idealmente deseado para sistemas de comunicación de alta capacidad. La invención del láser aumentó bastante los esfuerzos de investigación en las comunicaciones de fibra óptica, aunque fue hasta 1967 que K. C. Kao y G. A. Bockham, del Standard Telecommunications Laboratory en Inglaterra propusieron un medio nuevo de comunicaciones usando cables de fibra cubiertos.

Los cables de fibra disponibles en la década de 1960 eran extremadamente desperdiciados (más de 1000 dB/km), lo cual restringía las transmisiones ópticas a distancias cortas. En 1970, Kapron, Keck y Maurer, de Corning Glass Works, en Corning, Nueva York, desarrollaron una fibra óptica con pérdidas menores a 2 dB/km.

Ese fué el "gran" descubrimiento, necesario para permitir los sistemas prácticos de comunicaciones de fibra óptica. Desde 1970, la tecnología de fibra óptica ha crecido desmesuradamente. Recientemente, los Bell Laboratories transmitieron exitosamente 1 billón de bips a través de un cable de fibra, para 600 millas, sin un regenerador.

A finales de los años 70 y a principios de los 80, el refinamiento de los cables ópticos y el desarrollo de fuentes de luz y detectores contables de alta calidad, abrieron la puerta al desarrollo de sistemas de comunicación de fibra óptica de alta-calidad, alta-capacidad y eficiencia. La rama de la electrónica que trata con la luz se llama electrónica óptica.

## **LAS FIBRAS ÓPTICAS CONTRA LAS FACILIDADES DE CABLES METÁLICOS.**

Las comunicaciones, a través de cable de fibra de vidrio o plástico, tienen varias ventajas abrumadoras sobre las comunicaciones que usan facilidades de cable metálico o coaxial convencional.

### **Ventajas de los Sistemas de Fibra.**

1.- Los Sistemas de Fibra tienen una mayor capacidad debido a los anchos de banda inherentemente más grandes y disponibles con las frecuencias ópticas. Los cables metálicos exhiben en el medio capacitancia e inductancia a lo largo de sus conductores. Estas propiedades causan que actúen como filtros pasa-bajas que limitan sus frecuencias de transmisión y los anchos de banda.

2.- Los Sistemas de Fibra son inmunes a transmisiones cruzadas, entre cables, causadas por una inducción magnética. Las fibras de vidrio o plástico no son conductores de electricidad y, por lo tanto no tienen un campo magnético asociado con ellos. En los cables metálicos, la causa principal de transmisiones cruzadas es la inducción magnética entre los conductores situados cerca uno del otro.

3.- Los cables de fibra son inmunes a la interferencia estática causada por relámpagos, motores eléctricos, luces fluorescentes y otras fuentes de ruido eléctrico. Esta inmunidad, también se atribuye al hecho de que las fibras ópticas no son portadoras de electricidad. Además, los cables de fibra no radian energía de RF y, por lo tanto, no pueden causar interferencia con otros sistemas de comunicación. Esta característica hace que los sistemas de fibra estén idealmente equipados para las aplicaciones militares, en donde los efectos de las armas nucleares (EMP- interferencia de pulso electromagnético) tienen un efecto devastador sobre sistemas de comunicación convencionales.

4.- Los cables de fibra son más resistentes a los extremos ambientales. Funcionan sobre una variación más grande de temperatura que sus contrates metálicos, los cables de fibra son menos afectados por los líquidos corrosivos y gases.

5.- Los cables de fibra son más seguros y fáciles de instalar y mantener. Debido a que las fibras de vidrio y plástico no son conductores, no hay corrientes eléctricas o voltajes asociados con ellas. Las fibras se pueden usar cerca de líquidos y gases volátiles, sin preocuparse que ocasionen explosiones o fuegos. Las fibras son más pequeñas y más ligeras que sus contra partes metálicas. En consecuencia, es más fácil trabajar con ellas. Además, los cables de fibra requieren menos espacio de almacenamiento y son más baratos de transportar.

6.- Los cables de fibra son más seguros que sus contra partes de cobre. Es casi imposible interceptar un cable de fibra, sin que el usuario se entere de esto. Esta es otra cualidad atractiva para las aplicaciones militares.

7.- Aunque aún no ha sido comprobado, se proyecta que los sistemas de fibra durarán más que las facilidades metálicas. Esta presunción se basa en las altas tolerancias que los cables de fibra tienen a los cambios en el ambiente.

8.- El costo a largo plazo de un sistema de fibra óptica se proyecta que será menor que el de su contra parte metálico.

### **Desventajas de los Sistemas de Fibra.**

Actualmente, hay muy pocas desventajas de los Sistemas de Fibra. Una desventaja importante es el alto costo inicial de instalar un Sistema de Fibra, aunque en el futuro se cree que el costo de instalar un sistema de fibra se reducirá dramáticamente. Otra desventaja de los sistemas de fibra es el hecho de que no están probados; no hay sistemas que hayan estado en operación por un largo periodo de tiempo. El mantenimiento y reparación de los sistemas de fibra, también es más difícil y costoso que los sistemas metálicos.

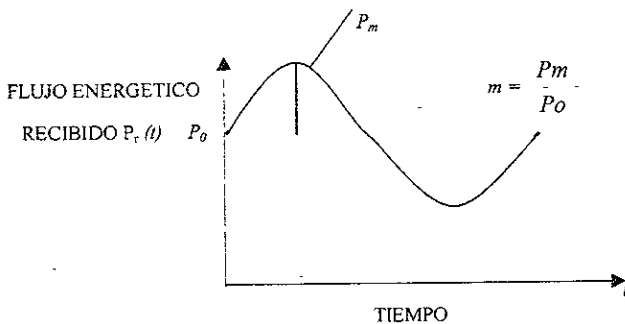
## CAPITULO I

### PROCESO DE LA SEÑAL DE ENTRADA (EMISION)

El hombre por su naturaleza de ser sociable requiere relacionarse con sus semejantes aunque estos se encuentren a gran distancia. Por lo que se hizo necesaria una forma de comunicación a larga distancia llamada telecomunicación

Debido al carácter analógico de la voz, las primeras formas de comunicación fueron también de este género. Sin embargo a principios del siglo XIX el carácter digital se dio por medio de la telegrafía. El código Morse es un ejemplo del código binario y precursor de la actual transmisión digital. La telegrafía transmitía un código que después debía ser descifrado para componer el mensaje recibido; actualmente es la propia voz la que se transmite digitalmente después de haber pasado por una serie de conversiones antes de ser transmitida.

En el emisor, la fuente óptica convierte la señal eléctrica  $e(t)$  en una señal óptica  $p(t)$ ; la amplitud o magnitud del flujo energético varía en el tiempo. Tal sistema recibe el nombre de Sistema de Modulación Banda Base; hay modulación de la amplitud de la luz (portadora) alrededor del valor medio del flujo energético emitido. Por el momento no se han desarrollado sistemas en lo que la frecuencia de la portadora (luz) sea modulada proporcionalmente a la señal eléctrica  $e(t)$ . Figura 1.1. El flujo energético que recibe el detector es:



**Figura. 1.1** Flujo energético que llega al detector y que está modulado en Amplitud.

$$P_r(t) = P_o (1 + m \text{ sen } \omega t)$$

$P_o$  es el flujo energético promedio recibido o el flujo energético recibido en ausencia de modulación;  $m$  es el índice de modulación;  $\omega$  es la frecuencia angular de modulación.

Cuando el flujo energético  $P_r(t)$  llega al detector (fotodiodo de avalancha) se transforma en corriente eléctrica  $i(t)$ :

$$\begin{aligned} i(t) &= M.S.P_r(t) \\ i(t) &= M.S.P_o(1 + m \text{ sen } \omega t) \end{aligned}$$

$S$  y  $M$  son la sensibilidad y el rendimiento del fotodiodo.

La corriente promedio que se recibe en ausencia de la modulación, y antes de la amplificación por efecto de avalancha es:

$$I_s = S P_o$$

El valor promedio del cuadrado de la corriente, en presencia de modulación es:

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{2} m^2 M^2 S^2 P_o^2 \\ I^2 &= \frac{1}{2} m^2 M^2 I_s^2 \end{aligned}$$

Si el detector óptico es un fotodiodo P-I-N, se tiene  $M = 1$ .

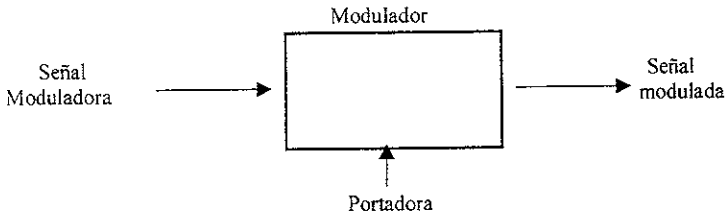
## 1.1 Modulación.

El proceso de modulación es en el cual la transmisión de información se realiza haciendo una conversión de la señal original, modificando algunas de sus características propias.

Así, en modulaciones analógicas, las características modificadas son la amplitud, frecuencia o fase, siendo las dos primeras las más conocidas y la modulación de frecuencia (FM) la más utilizada y con mejores prestaciones. Sin embargo, en este tipo de modulaciones analógicas aparecen interferencias que se superponen a la señal modulada obtenida y que, al ser demodulada, aparece también en el receptor influyendo en la baja calidad de la transmisión y en la aparición de errores.

En la transmisión de señales digitales es posible anular, prácticamente, la influencia de ruido y las interferencias sobre la señal digital. Por ello en la actualidad se impone cada vez más la transmisión de señales digitales, aunque en su origen sean analógicas como voz. Surge, pues la necesidad de encontrar una modulación capaz de transmitir digitalmente esas señales analógicas.





La señal moduladora es la señal original que se desea transmitir y puede ser analógica, como la voz, o digital en el caso de datos.

La portadora es la señal que va a modificarse en función de las características de la moduladora para obtener la señal modulada que será transmitida; y puede ser analógica o digital. De la misma manera podemos definir la modulación como la modificación de la señal portadora en función de las características de la señal moduladora.

## 1.2 Tipos de modulaciones.

En la siguiente Tabla podemos observar las diferentes formas de una señal, con todas las combinaciones posibles en función del carácter analógico o digital de las señales moduladora y portadora.

			SEÑAL MODULADORA		
			Analógica	Digital	
PORTADORA	PARAMETROS	ANALÓGICA	AMPLITUD	AM	ASK
			FRECUENCIA	FM	FSK
			FASE	PM	PSK
	VARIABLES	DIGITAL	AMPLITUD	PAM o MIA	No se usa
			POSICION	PPM o MIP	
			DURACION	PDM o MID	

Tabla I.1. Diferentes modulaciones

Un tren de pulsos puede utilizarse para transportar la información muestreada. Este se caracteriza por su frecuencia, la amplitud y la duración de un pulso; la frecuencia del tren de pulso es la frecuencia del muestreo y el valor de cada muestra se transmite por medio de un pulso al cual se le modula en el parámetro característico deseado.

La Modulación de Pulsos incluye varios métodos para convertir la información de tal manera que pueda ser transmitida de una fuente a un destino. Los cuatro métodos predominantes son: Modulación de Ancho de Pulso (PWM), Modulación de Posición del Pulso (PPM), Modulación de Amplitud de Pulsos (PAM) y Modulación de Pulsos Codificados. Como podemos ver en la Figura. I.2.

1. *PWM*. Este método también es conocido como modulación de duración de pulso (PDM) o modulación de longitud de pulso (PLM). El ancho de pulso es proporcional a la amplitud de la señal analógica.
2. *PPM*. La posición de un pulso de ancho constante, dentro de una ranura de tiempo prescrita, varía de acuerdo a la amplitud de la señal analógica.
3. *PAM*. La amplitud de un pulso de posición constante y de ancho constante varía de acuerdo a la amplitud de la señal analógica.
4. *PCM*. La señal analógica se prueba y se convierte a una longitud fija, número binario serial para transmisión. El número binario varía de acuerdo a la amplitud de la señal analógica. Figura. I.2

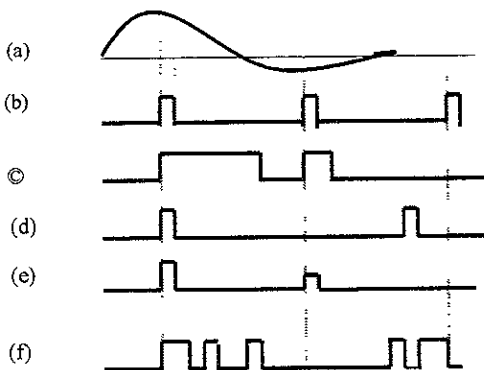


Figura. I.2. Modulación por pulsos:

- (a) Señal analógica
- (b) Pulso de muestreo
- (c) PWM
- (d) PPM
- (e) PAM
- (f) PCM

PAM se usa como una forma intermedia de modulación, con PSK, QAM y PCM, aunque raramente se usa sola, PWM y PPM se usan en los sistemas de comunicación, de propósitos especiales (normalmente para el ejército), pero raramente se usan para los sistemas comerciales. PCM es, por mucho, el método más prevalente de Modulación de Pulsos.

### 1.2.1 Modulación de amplitud de pulsos (PAM).

A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya amplitud es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen un ancho o duración  $W$  y un periodo  $\frac{1}{2} B$  constantes. Es necesario que  $W$  sea menor a  $\frac{1}{2} B$ . Figura. I.3.

Toda la información (magnitudes de las muestras y frecuencias de muestreos) se encuentra en la magnitud y frecuencias de los pulsos.

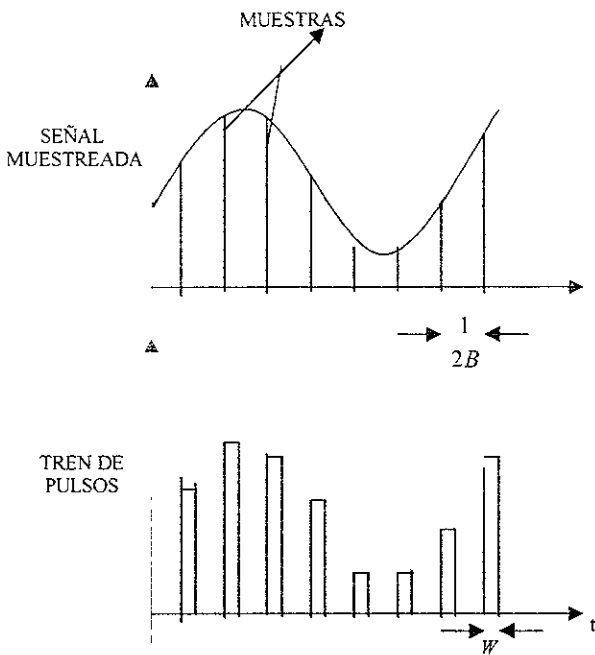


Figura.I.3. Modulación por amplitud de pulsos (PAM). La señal se convierte en un tren de pulsos de duración  $W$ , a la frecuencia  $2 \rho$ , modulada en amplitud.

### 1.2.2 Modulación por ancho de pulsos (PWM).

A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya duración  $W$  es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen amplitud constantes y frentes de subida separados  $\frac{1}{2} B$ . Es necesario que  $W$  sea menor a  $\frac{1}{2} B$ . Figura. I.4.

Toda la información se encuentra en la frecuencia de los pulsos (es decir el tiempo que separa dos frentes de subida) y en su amplitud.

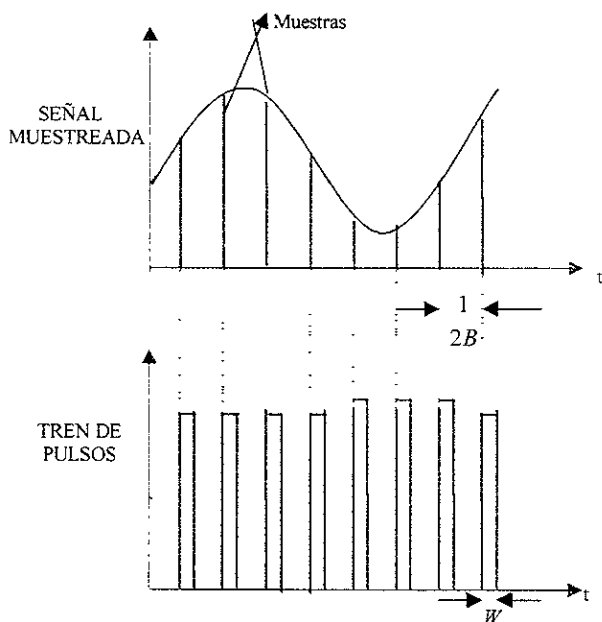
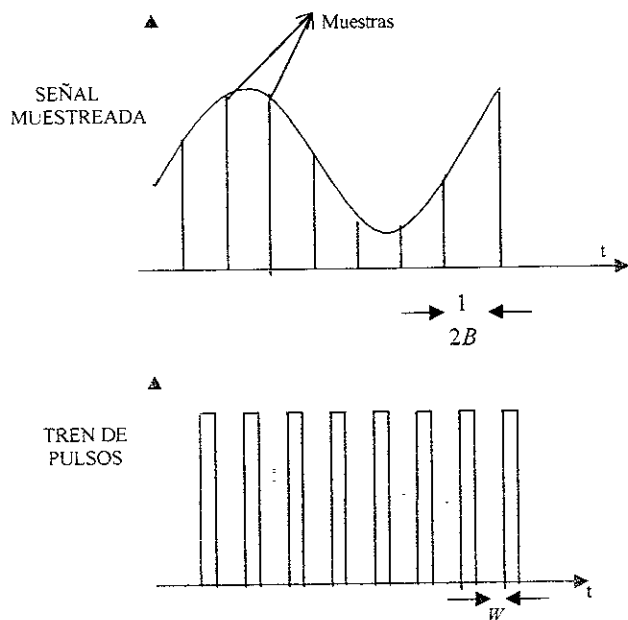


Figura. I.4. Modulación por ancho de pulsos (PWM). La señal se convierte en un tren de pulsos a la frecuencia  $2B$  cuyas duraciones son moduladas.

### I.2.3. Modulación por posición de pulsos (PPM).

A cada muestra se le hace corresponder un pulso desplazando un tiempo  $\Delta t$  con respecto al instante de muestreo  $t$  ( $\Delta t$  es proporcional a la magnitud de la muestra). Los pulsos tienen amplitud y anchos constantes. Es necesario que  $\Delta t$  mientras más grande sea inferior a  $(1/2B - W)$ . Figura. I.5.

La información está contenida en  $\Delta t$ , de modo que es necesario transmitir al mismo tiempo una señal de sincronización que permita determinar  $\Delta t$  y la frecuencia de muestreo. Esta señal suplementaria no es necesaria en la modulación de amplitud o duración.



**Figura.I.5.** Modulación por posición de pulsos (PPM). La señal se convierte en un tren de duración  $W$  en el cual las posiciones se modulan.

En los sistemas de transmisión con modulación de pulsos, las bandas de paso  $B'$  requeridas son:

$$\begin{array}{ll} \text{PAM} & B' = 1/W \\ \text{PDM} & 1/W \leq B' \leq 5/W \\ \text{PPM} & B' = 5/W \end{array}$$

donde  $W$  es la duración del pulso (anchura).

#### **1.2.4. Modulación de pulsos codificados (PCM).**

La modulación de pulsos codificados (PCM), es la única de las técnicas, que se usan en un sistema de transmisión digital. Con PCM, los pulsos son de longitud fija y amplitud fija. PCM es un sistema binario; un pulso o ausencia de pulso, dentro de una ranura de tiempo prescrita representa ya sea una condición de lógica 1 de lógica 0 con PWM, PPM o PAM, un solo pulso representa un dígito binario sencillo (bit).

La Figura. 1.6. muestra un diagrama a bloques simplificado de un solo canal, sistema PCM sencillo (de un solo sentido). El filtro de pasa-bandas limita a la señal analógica de entrada a la proporción de la frecuencia de la banda de voz estándar, de 300 a 3000 Hz. El circuito de muestreo y retención periódicamente prueba la entrada de información analógica y convierte esas muestras en una señal PAM de multinivel. El convertidor analógico a digital (ADC) convierte las muestra PAM a un flujo de datos binarios seriales para transmisión. El medio de transmisión es un cable metálico o fibra óptica.

En el lado de recepción el convertidor digital a analógico (DAC) convierte el flujo de datos binarios seriales una señal PAM de multinivel. El circuito de retención y el filtro pasa-bajas convierten la señal (PAM) nuevamente en su forma analógica original. Un circuito integrado que realiza la codificación y decodificación de PCM, se llama un *codec*, (codificador/decodificador).

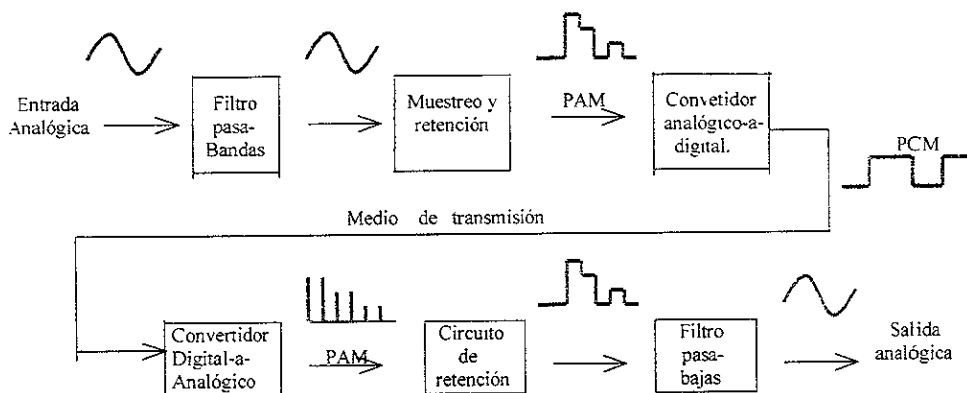


Figura. 1.6. Diagrama a bloques de un sistema PCM simplificado.

### 1.3. MODULACION DIGITAL.

Para sistemas de comunicación digital que emplean canales pasa-banda, es conveniente modular una señal portadora con la corriente de datos digitales antes de la transmisión. Tres formas básicas de modulación digital, que corresponden **AM, FM y PM**, se conoce como Conmutación de amplitud (**ASK**, Amplitude - Shift Keying), Conmutación de frecuencia (**FSK**, Frequency - Shift Keying), Conmutación de Fase (**PSK**, Phase - Shift Keyin), estos métodos presentan la ventaja en la probabilidad de error y la eficiencia del ancho de banda.

### I.3.1. Conmutación de amplitud ASK.

En la conmutación de amplitud, la amplitud de una señal portadora de alta frecuencia se conmuta entre dos o más valores en respuesta al código PCM. Para el caso binario, la elección usual es la conmutación en sentido apagado (que a veces se abrevia OOK, on – off keying). La señal modulada en amplitud resultante consta de pulsos de RF, llamados marcas, que representan unos binarios, y espacios que representan ceros binarios, en la Figura. I.7 se muestra una señal ASK para un código PCM. Como en AM, el ancho de banda en banda base se duplica en ASK.

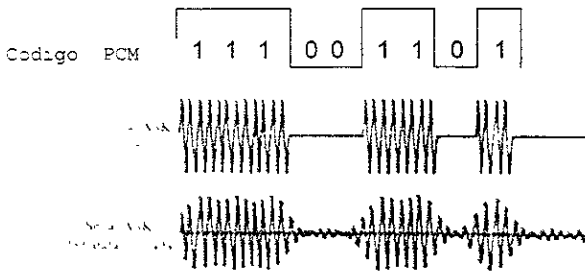


Figura I.7. señales binarias ASK

### I.3.2. Conmutación de frecuencia FSK.

En la conmutación de frecuencia, la frecuencia instantánea de la señal portadora se conmuta entre dos (o más) valores en respuesta al código PCM, la Figura. I.8 (a) muestra una señal FKS ideal correspondiente al código PCM binario. Esto sugiere que se puede considerar una señal FKS como si estuviera compuesta de dos señales ASK con diferentes frecuencias portadoras como se muestra en la Figura. I.8. (b). Por lo tanto, para transmitir cualquiera de los símbolos binarios se elige entre las dos señales.

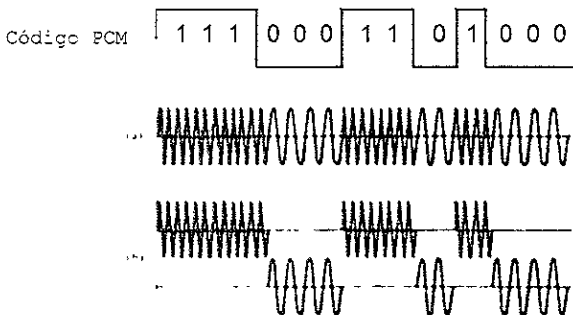


Figura I.8. (a) Señal FSK ideal y (b) su descomposición en dos señales ASK

Las dos señales recibidas ahora son diferentes, por lo que se utilizan dos filtros acoplados, uno para cada señal, como se muestra en la Figura. I.9.

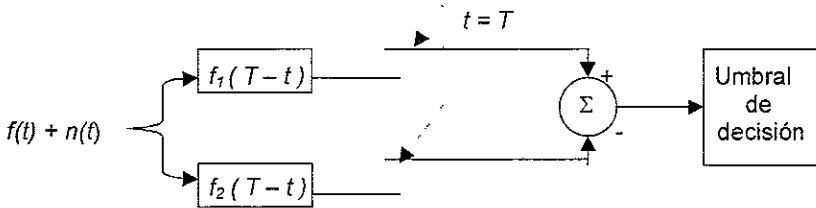


Figura I.9. Detección de señales FSK con filtro acoplado

Si en la ausencia de ruido está presente una frecuencia de señalización, se supone que la salida de un filtro acoplado es cero y la otra salida es  $E$ . Por el contrario, si está presente la segunda frecuencia de señalización, se intercambian las salidas y, como resultado de la resta la salida neta es  $-E$  como se muestra en la Figura. I.10.

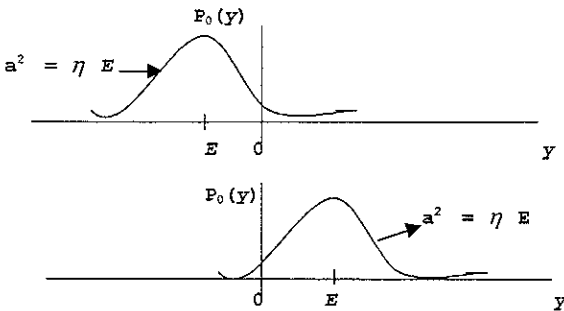


Figura I.10. Funciones de densidad de probabilidad para señales FSK binarias.

Si se supone que las respuestas en frecuencia de los dos filtros acoplados no se traslapan, las tensiones de ruido en la salida son estadísticamente independientes y, por lo tanto, se suman en potencia.

### I.3.3. Conmutación de Fase.

Aunque en la característica de operación de la PKS se obtuvo una distribución simétrica con respecto a cero, no se puede obtener el rendimiento de probabilidad de error superior del sistema polar de banda base.



En la conmutación de fase, la fase de la señal portadora se conmuta entre dos (o más) valores en respuesta al código PCM, para PCM binario un desplazamiento de fase de  $180^\circ$  es una elección conveniente porque simplifica el diseño del conmutador y se usa a menudo, esta elección particular se conoce como Conmutación por inversión de fase (PRK, Phase, Reversal Keying). Figura. I.11.

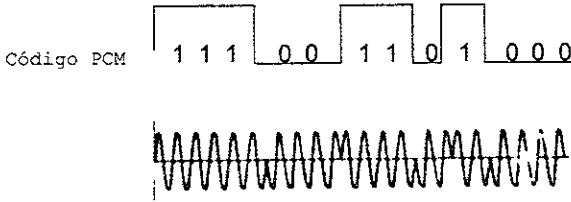


Figura. I.11 Señal PRK.

Como la elección, requiere sólo un a función de transferencia en el detector de correlación como se muestra en la Figura. I.12.

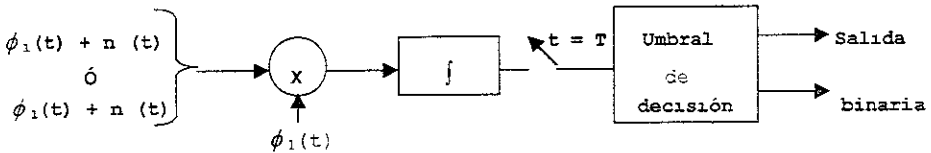


Figura. I.12. Detector de correlación para señales antípodas.

#### I.4. Muestreo.

En el caso una señal analógica, la información está contenida, a cada instante  $t$ , en amplitud de una señal  $e(t)$  continuo en el tiempo. Se puede mostrar que, en algunas condiciones, el hecho de conocer el valor instantáneo de la amplitud de la señal  $e(t)$  sólo para unos instantes sucesivos determinados, en lugar de conocer para todos los instantes no provoca ninguna pérdida de información. Transmitir la información consiste en enviar los valores de la amplitud  $e(t)$  en instantes sucesivos regularmente espaciados. La toma de valores instantáneos se realiza por la operación llamada *muestreo*. Los valores de la muestra pueden transmitirse por medio de señales discretas (pulsos). En la transmisión de pulsos, algún parámetro característico de pulsos (amplitud, ancho o posición) se hace proporcional al valor de la muestra. Estos son los pulsos que después se transmiten. En la transmisión digital, el valor de la muestra se convierte en forma binaria (sucesión de "0" y de "1"). Esta sucesión se transforma en pulsos que se transmiten en una red de fibra óptica. El proceso de muestreo de una señal es de gran utilidad en la transmisión de distintas señales a la vez en un mismo medio, además de ser el primer enlace entre la señal analógica y digital.

Una señal continua  $e(t)$  puede descomponerse en una suma de señales sinusoidales simples que tiene cierta frecuencia, las cuales están contenidas en una banda de 0 a  $B$  ciclo por segundos.  $B$  es la frecuencia más alta en el espectro de la señal  $e(t)$ . Para que el muestreo pueda definir completamente la función  $e(t)$  la condición fundamental es que las muestras, (medidas de valores instantáneos) se tomen en instantes separados a lo más de un  $1/2B$  seg. Por lo menos, es necesaria una frecuencia de muestreo igual a  $2B$ . Si se conocen la frecuencia de muestreo y los valores de la muestra, puede reconstruirse la señal  $e(t)$ . Figura. I.13.

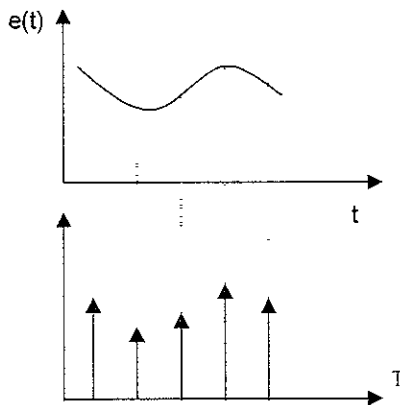
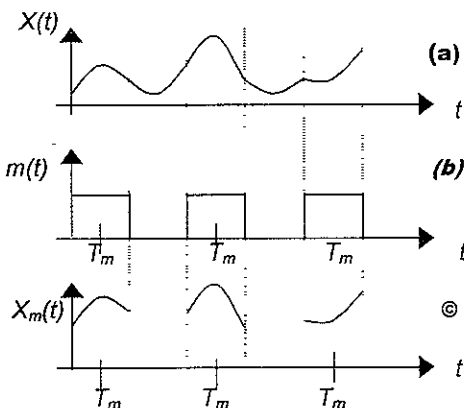


Figura I.13. Impulsos de muestreo

Sin embargo, hablar de muestreo teórico es prácticamente imposible debido a que no se pueden tomar tiempos infinitesimales, o lo que es lo mismo impulsos de duración cero. Por tanto se debe utilizar un tren de pulsos de una corta duración efectuando el muestreo durante el tiempo que dure el impulso como puede apreciarse en la Figura. I.14.



© Figura. I.14.

(a) Señal a muestrear.

(b) Impulsos de muestreo

© Muestras

Existen dos tipos de muestreo práctico, según se tome la muestra de la señal durante la duración del pulso: práctico instantáneo y práctico natural. La Figura. I.14 es un ejemplo de muestreo práctico manual en el que la muestra tomada sigue a la original. Por el contrario, en el muestreo práctico instantáneo las muestras no siguen a la señal original, sino que toman el valor de la señal en el punto medio del pulso de muestreo, como se observa en la Figura. I.15.

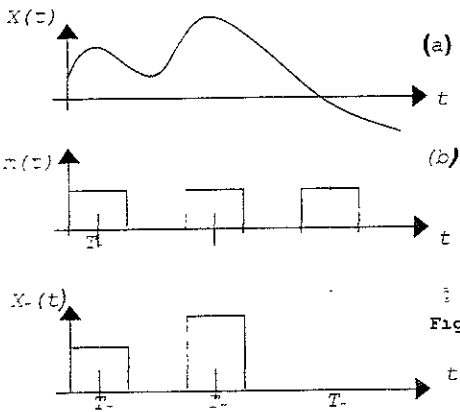


Figura. I.15. Muestreo práctico  
 ( a ) Señal a muestrear  
 ( b ) Impulsos de muestreo  
 ( c ) Muestras

#### I.4.1. Circuito de muestreo y retención.

El propósito del circuito de muestreo y retención es probar periódicamente la señal de entrada analógica, continuamente cambiante y convertir las muestras en una serie de niveles PAM de amplitud constante. Para que el ADC convierta exactamente la señal a un código digital, la señal debe ser relativamente constante. Si no es así, antes de que el ADC pueda terminar la conversión, la entrada de información cambiaría. Por lo tanto, el ADC estaría continuamente intentando seguir los cambios analógicos y nunca se estabilizaría en ningún código PCM.

La Figura. I.16. muestra el diagrama esquemático de un circuito de muestreo y retención. El FET actúa como un conmutador sencillo. Cuando se "enciende", proporciona un camino de baja impedancia para depositar el voltaje de la muestra analógica en el capacitor  $C1$ . El tiempo que esta "encendido" se llama apertura o tiempo de adquisición. Esencialmente,  $C1$  es el circuito de retención. Cuando  $Q_1$  está "apagado" el capacitor no tiene un camino completo por el cual descargarse y, por lo tanto, se llama tiempo de conversión A/D debido a que, durante este tiempo, el ADC convierte el voltaje de la muestra en un código digital. El tiempo de adquisición deberá ser muy corto. Esto asegura que ocurra un cambio mínimo en la señal analógica mientras se deposita a través de  $C1$ .

Si la entrada de información al ADC está cambiando mientras se realiza la conversión, resultará en una distorsión. La distorsión se llama Distorsión de Apertura. Por lo tanto, teniendo un tiempo de apertura corto y manteniendo la entrada de información al ADC relativamente constante, el circuito de muestreo y retención reduce la distorsión de apertura. Si la señal analógica se muestrea por un periodo corto de tiempo y el voltaje de la muestra se mantiene a una amplitud constante, durante el tiempo de conversión de A/D, esto se llama un muestreo superior plano. Si el tiempo de muestreo se alarga y la conversión de analógica a digital se realiza con una señal analógica cambiante, esto se llama muestreo natural. El Muestreo natural introduce más distorsión de apertura que un muestreo superior plano y requiere de un convertidor A/D más rápido.

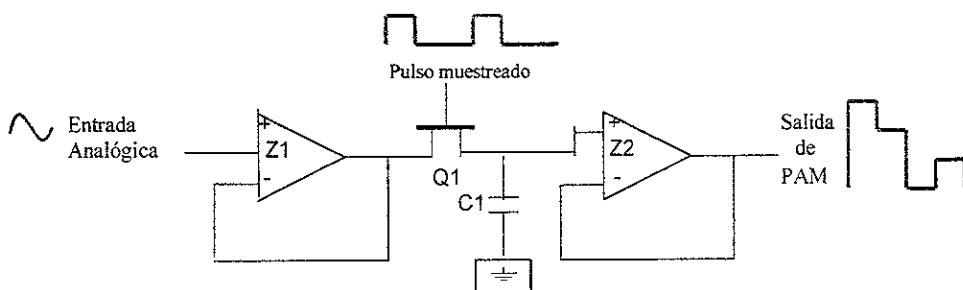


Figura.I.16. Circuitos de muestreo y retención

La Figura. I.17. muestra la señal analógica de entrada de información, el pulso muestreado la forma de onda desarrollada a través de C1. Es importante que la impedancia de salida del seguidor de voltaje Z1 y la resistencia de "encendido" de Q1 sean lo más pequeñas posibles. Esto asegura que la constante de tiempo de carga RC del capacitor se mantenga muy corta, permitiendo al capacitor cargarse o descargarse rápidamente, durante un tiempo de adquisición corto.

La caída rápida en el voltaje del capacitor, inmediatamente después de cada pulso muestreado se debe a la redistribución de la carga a través de C1. La capacitancia del interelectrodo, entre la compuerta y la salida de FET, se coloca en serie con C1, Cuando el FET esta apagado, por lo tanto actúa como una red divisora de voltaje capacitivo. Además observe la descarga gradual a través del capacitor, durante el tiempo de conversión. Esto se llama caída y será causado por la descarga del capacitor a través de su propia resistencia de fuga (dispersión y la impedancia de entrada del seguidor de voltaje Z2). Por lo tanto, es importante que la impedancia de entrada de Z2 y la resistencia de fuga de C1 sean lo más altas posibles. Esencialmente, los seguidores de voltaje Z1 y Z2 aíslan al circuito de muestreo y retención (Q1 y C1) de la circuitería de entrada y salida.

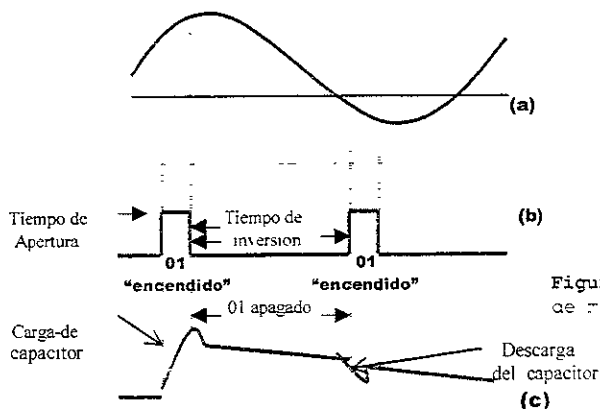


Figura I.17. Formas de ondas de muestreo y retención.

- a) entrada analógica.  
 (b) Pulso de muestreo.  
 (c) voltage del capacitor

En los sistemas PCM se utiliza este último tipo de muestreo parecido al ideal, salvo que en lugar de pulsos sin duración la señal muestreadora permanece un tiempo diferente a cero por lo que son pulsos de corta duración

Un circuito real que hiciese el muestreo práctico natural podría ser un interruptor electrónico controlado por un tren de pulsos Véase la Figura. I.18.

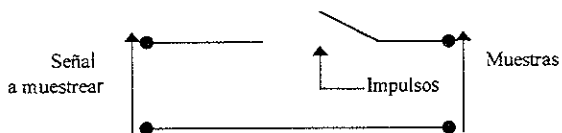


Figura. I.18. Circuito de muestreo práctico natural

Un interruptor electrónico consistiría, básicamente, en un circuito que, dependiendo de una tensión de control (impulsos de muestreo), dejaría, o no, pasar a la salida de tensión que tiene a su entrada (señal a muestrear); y obtendríamos la señal en los momentos en los que el interruptor estuviese cerrado.

Como podemos comprobar, si utilizamos dos interruptores electrónicos con una tensión de control de diferente frecuencia y colocamos a sus entradas dos señales analógicas distintas, obtendríamos en su salida unas muestras en diferentes instantes de tiempo, pero ninguna muestra de la primera señal coincidiría en el tiempo con otra de la segunda señal. De este modo, si sumamos las salidas de ambos interruptores, tendríamos dos señales distintas que podrían transmitirse por un único canal sin el peligro de que se mezclasen. Este sería el fundamento del multiplex por división en el tiempo (MDT).

A continuación se muestran una serie de interruptores electrónicos utilizando diversos componentes, con el fin de explicar en qué consiste el muestreo de una señal analógica a través de un canal digital.

Según el Teorema de Muestreo, la frecuencia con la que muestreamos la señal analógica ha de ser al menos dos veces mayor que el ancho de banda de esa señal.

Los conmutadores electrónicos básicos se realizan mediante la implementación de transistores complementarios, tanto en tecnología bipolar como unipolar.

Recurriendo al primer procedimiento, montaremos un conmutador electrónico con transistores bipolares complementarios, esto es, utilizando un transistor PNP y otro NPN, como muestra la Figura. I.19

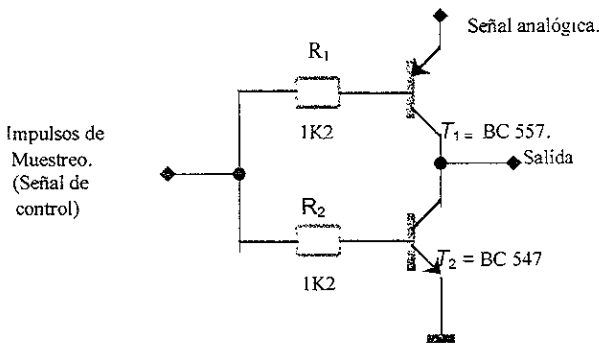


Figura I.19. Conmutador electrónico con transistores bipolares

El funcionamiento de este circuito es bastante simple; se basa en el hecho de que los transistores operan en el punto de saturación o corte, y no en ninguna otra parte de la línea de carga.

Un transistor en saturación se comporta como un interruptor cerrado entre los términos de colector y emisor; en cambio cuando está al corte, el transistor actúa como un interruptor abierto.

En el circuito de la Figura. I.20, cuando el transistor  $T_2$  esté saturado, es decir, cuando actúe como un interruptor cerrado, el transistor  $T_1$ , al ser PNP, estará al corte, por lo cual se comportará como un interruptor abierto, y, en ese caso, la salida será aproximadamente 0 V; esta correspondería a la tensión colector-emisor de saturación de  $T_2$ .

Pero si, por el contrario, el transistor  $T_2$  se encuentra al corte y el transistor  $T_1$ , al ser complementario, se halla en saturación, la señal de salida será aproximadamente la tensión analógica que nosotros deseamos muestrear. De este modo, las muestras se tomarán cuando  $T_1$  esté saturado y  $T_2$  al corte. La posición que ocupe el punto de trabajo en las rectas de carga dependerá del valor de la tensión que apliquemos en base, pues ello hará que la corriente que circule por base sea mayor o menor.

Si la tensión de control es un nivel lógico 1, saturaremos al  $T_2$  y pondremos al corte a  $T_1$ , siendo en este instante la salida 0 V. Y a la inversa, si la tensión de control es un nivel bajo 0, el  $T_2$  estará al corte y  $T_1$  saturado, siendo en este instante cuando habremos de tomar las muestras de la señal analógica.

En todas las explicaciones del funcionamiento del circuito hemos considerado que la señal a muestrear es positiva, es decir, que la señal analógica que apliquemos estará sobre un nivel de continua, de modo que sea siempre positiva. La razón por la que ha de actuar así, tanto en este circuito como en posteriores, se basa en que deben evitarse aquellas conducciones irregulares del transistor  $T_1$ , que pudieran sacarle del corte o de saturación al polarizar la unión base-emisor de forma inadecuada.

El segundo procedimiento nos presenta un conmutador electrónico muy similar al anterior, con la única diferencia de utilizar tecnología unipolar. En la Figura. 1.20. podemos ver el circuito en cuestión.

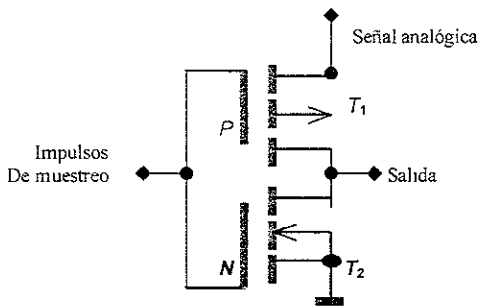


Figura 1.20. Conmutador electrónico con transistores unipolares

## CAPITULO II.

### CUANTIFICACION

Las muestras de amplitud obtenidas de la señal analógica original deben representarse mediante números binarios, es decir, en forma digital. Habrá que limitar el número de aquellos valores que deban tomarse y dentro de los cuales cualquier amplitud tendrá asignado un número binario. Esto se debe a la imposibilidad de obtener unos valores digitales que se correspondan exactamente con la señal analógica de entrada, pues mientras que esta señal tomó durante su variación en el tiempo infinitos valores, la señal digital presenta un número finito de combinaciones. He aquí el proceso de cuantificación, función fundamental en comunicaciones digitales, ya que define en gran medida distorsión que se va a producir en la señal analógica, así como el código binario que se va a transmitir

La cuantificación determina la distorsión que va a ser introducida por el sistema, ya que en este proceso, al existir una aproximación existirá también un error denominado error de cuantificación; pero este parámetro lo estudiaremos más adelante.

Determina el código binario a transmitir, porque dependiendo del número de intervalos que obtengamos durante el proceso, habrá una mayor o menor cantidad de bits que tendrán el número binario asignado a cada uno, cumpliendo la siguiente expresión:

$$N = 2^n - 1$$

Siendo  $N$  el número de intervalos y  $n$  el número de bits que tendrá la palabra transmitir, podemos decir que dicha palabra adoptará tantas combinaciones como intervalos escojamos sumándoles uno.

Tal como comentamos en un principio, se establecen unos intervalos y a todos los niveles de la señal comprendidos en dichos intervalos se les asigna un mismo valor; pues bien, cada intervalo constituye un eslabón de cuantificación o cuanto. Para comprender mejor todo este proceso examinaremos el ejemplo representado en la Figura II.1. Observamos que a un conjunto de 8 cuantos se le puede asignar 8 números binarios de 3 bits ( $2^3 = 8$ .) Cada cuanto tiene un límite denominado valor de decisión y todas las amplitudes que se encuentren entre dos valores de decisión serán consideradas con un mismo valor, correspondió. Si, por ejemplo, tomamos la muestra  $M_3$  cuyo valor está comprendido entre  $V_5$  y  $V_6$ , está aparecerá representada por un determinado número binario, que en este caso será 1101, siendo el bit de mayor peso el del signo por lo que al ser dicho bit, 1, el número será positivo. Además cualquier señal como ésta se tiene en cuenta como un valor cuantificado en el punto medio del cuanto.



Según este criterio las magnitudes de los valores cuantificados  $C_1$  a  $C_8$ , responderán a la siguiente expresión:

$$C_i = \frac{1}{2} (V_i + V_{i-1})$$

La característica de cuantificación es por definición una función en escalera cuyo número de niveles, como hemos indicado, es una potencia de dos.

Resumiendo todo lo anterior, podemos decir que la curva de transferencia del cuantificador se puede definir como una característica la forma escalonada que consta de  $N$  niveles de decisión  $V_0, V_1, \dots, V_{n-1}$  y de una de las señales de salida denominadas niveles de cuantificación  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , de forma que cuando el valor de la muestra está en el intervalo  $i$  de cuantificación, la salida al cuantificador será  $C_i$ , es decir, la salida es  $C_i$ , cuando se cumple  $V_{i-1} < V < V_i$ .

Es evidente que, a mayor número de niveles de cuantificación, mayor será la precisión de la representación cuantificada de la señal analógica a transmitir. También será mayor el número de bits necesarios para representar las muestras, por lo que se necesita un ancho de banda de transmisión más grande. Esto supone que a la hora de diseñar un sistema de transmisión digital habrá que llegar a un compromiso entre precisión y ancho de banda.

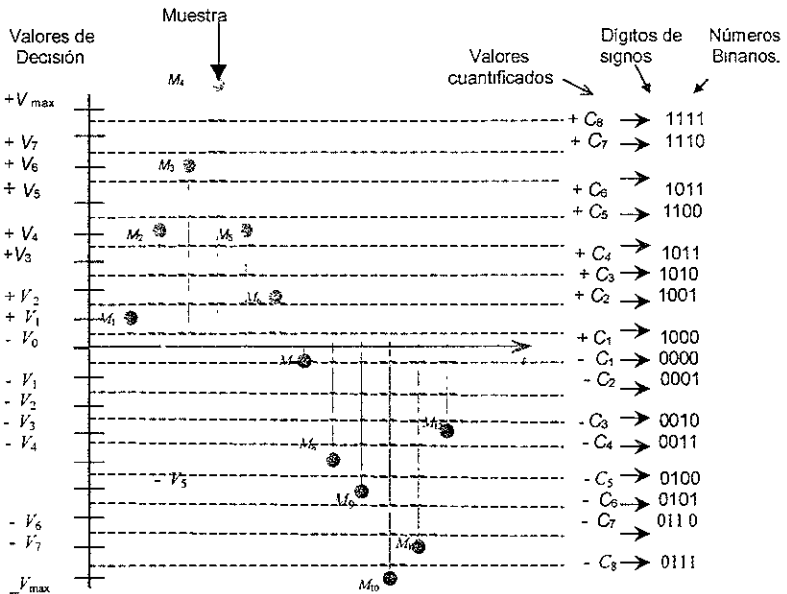


Figura II.1. Ejemplo de cuantificación de muestras de una señal analógica.

### II.1. Error de cuantificación.

Al estar asignado a todos los valores de la señal analógica de entrada un mismo valor, existe una aproximación y, por lo tanto existirá también un error. Como el terminal receptor de un sistema de transmisión digital sólo puede interpretar el número binario recibido y esta señal sólo puede tener un número finito de combinaciones, mientras que la señal analógica de entrada pasará por infinitos valores al variar, entre estas dos señales: la original y reconstruida; por consiguiente, habrá diferencias denominadas errores o ruidos de cuantificación. Este error aparece como una señal de ruido superpuesta a la palabra recibida.

### II.2. Cuantificación uniforme.

En la Figura.II.2 podemos ver una cuantificación de siete niveles con su error característico de cuantificación, que es la diferencia entre la característica en escalera de la función de transferencia y la línea recta de trazos para una transmisión sin distorsión.

Como podemos observar, dicho error es mayor en los niveles de decisión y nulo en el punto medio del escalón de cuantificación. Según esta Figura, si llega a la entrada del cuantificador una señal de amplitud superior a la máxima del cuantificador, se produce un error en la cuantificación superior al cometido para el resto de las muestras. Esta zona se conoce como zona de sobrecarga y genera el ruido de sobrecarga. La zona en la cual el error de cuantificación es constante se denomina zona de ruido granulado, este ruido es tolerable en los sistemas de transmisión; sin embargo, el ruido de sobrecarga debe minimizarse al máximo. El error de cuantificación depende del tamaño del escalón, ya que a escalones más grandes, estaremos asignando un mismo valor a mayor número de niveles de la señal analógica y, por tanto, el error será mayor. De lo anterior se deduce que si aumentamos el número de niveles de cuantificación, se reducirá el tamaño de los escalones y, en consecuencia, al tener menos niveles de señal analógica con el mismo valor, el error de cuantificación también se reducirá.

En la cuantificación estudiada, todos los escalones de cuantificación son del mismo tamaño. Este tipo de cuantificación recibe el nombre de cuantificación uniforme o lineal. En este caso, cuando el número de muestras tomadas sea grande y suponiendo que la amplitud de estas muestras que llegan al cuantificador se distribuya de forma uniforme, se demostrará que el error de cuantificación cumple la siguiente expresión:

$$e_c = \frac{a^2}{12}$$

donde  $e_c$  es el ruido descuantificación y  $a$  es el tamaño del escalón cuántico. Al ser fijo el tamaño del cuanto, el ruido es independiente de la amplitud de la señal de entrada, es decir, siempre será el mismo para cualquier nivel de la señal analógica. Así pues, llegamos a la conclusión de que la cuantificación uniforme sería la adecuada si la distribución de las muestras de entrada al cuantificador lo fuera también; pero en las señales vocales esto no es así.

Una forma de minimizar errores de cuantificación es reducir el tamaño de los escalones, aumentando el número de niveles de cuantificación en los niveles de señal analógica más probables y menos valores de cuantificación en los niveles de señal analógica menos probables, manteniendo, a la vez, el número total de niveles.

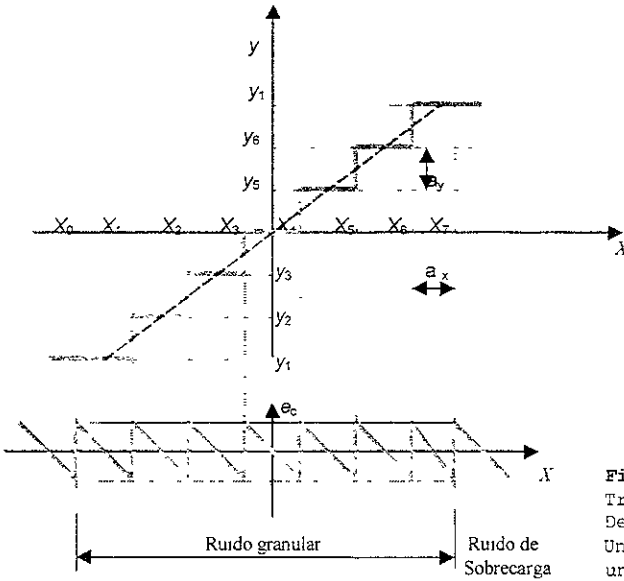


Figura.II.2 Curva de Transferencia y error De cuantificación de Un cuantificador uniforme.

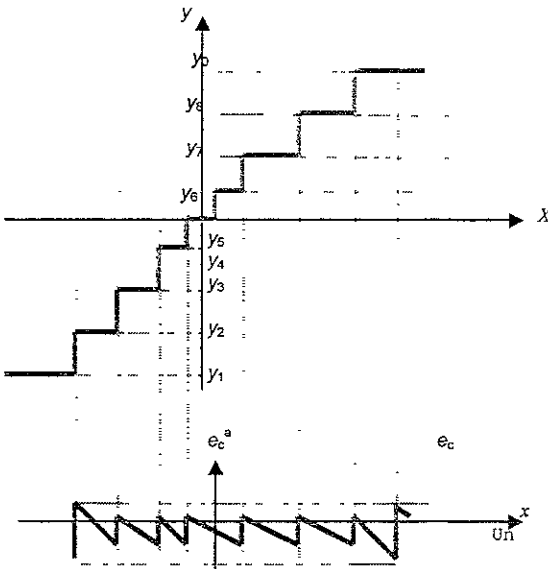


Figura.II.3. Curva transferencia y error de cuantificación. cuantificador no uniforme.

### II.3. Cuantificación no uniforme.

Como en las señales vocales, los valores de amplitud bajos son los más frecuentes. Se utilizarán más niveles de cuantificación en la región de baja señal y menos en la región de alta señal. Esta forma de cuantificar se conoce con el nombre de cuantificación no uniforme y es la más utilizada en la transmisión digital. La función de transferencia aparece en la Figura II.3. En esta Figura podemos observar como se disminuye el error en los niveles más bajos.

### II.4. Leyes de compansión

La cuantificación no uniforme se puede conseguir comprimiendo la señal con una cierta característica de compansión; a continuación se introduce esta señal en un cuantificador uniforme posteriormente, la señal cuantificada uniformemente se expande. Todo este proceso recibe el nombre de compansión.

Dentro de las comunicaciones digitales y, particularmente en el sistema de modulación de impulsos codificados, se utilizan distintos tipos de codificación que vienen determinando precisamente por la ley que siga el proceso de compansión.

Básicamente son dos las leyes utilizadas: Ley  $\mu$ , utilizada en los Estados Unidos y Ley A, utilizada en Europa. Las curvas que siguen las citadas leyes son de tipo logarítmico.

La Ley de Compansión  $\mu$  fue descrita en 1949 por Holzwart y posteriormente por Pander y Dite (1951) y Smith (1957). Su expresión es la siguiente:

$$y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)} \quad 0 < x < 1$$

En el sistema original  $T_1$  Bell se empleaba un compansor y  $\mu$  valía 100. En los últimos diseños se acatan las recomendaciones del Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (CCITT), que es el organismo más importante en el campo de las Telecomunicaciones para un sistema de 24 canales, habiendo abandonado la compansión y empleado una codificación no lineal que se aproxima a un valor de  $\mu = 255$ . La característica de esta ley aparece en la Figura II.4. observándose su linealidad para los valores pequeños de señal.

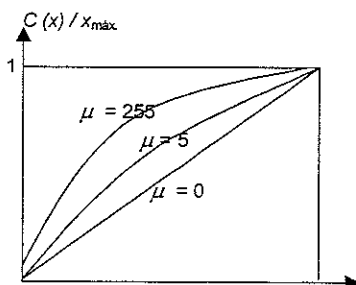


Figura.II.4. Curva de expansión  $\mu$  para distintos valores del parámetro.

La Ley de Compansión A fue propuesta en 1962 por K. W. Cattermole. Se fundamenta en una característica lineal en las proximidades del origen y en otra logarítmica para valores mayores. Se define mediante las siguientes expresiones:

$$y = \frac{A \cdot x}{1 + \ln A} \quad \text{para } 0 < x < 1/A \text{ Característica lineal}$$

$$y = \frac{1 + \ln(A \cdot x)}{1 + n \ln A} \quad \text{para } 1/A < x < 1 \text{ Característica logarítmica}$$

siendo el valor de A de 87,6, que es el utilizado en los sistemas prácticos. En la Figura. II.5 podemos observar la Ley A de Compansión, en la que aparecen las dos zonas: lineal y logarítmica. También en la misma Figura se representan las curvas correspondientes a distintos intervalos de A.

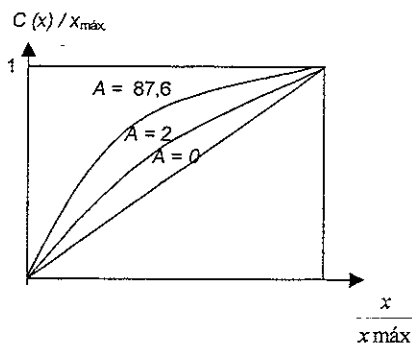


Figura.II.5. Curva de Compansión A para distintos valores del parámetro A.

## II.5. Relación señal-ruido.

Una de las medidas que define la calidad de un sistema de transmisión digital es la relación señal-ruido de cuantificación. Teniendo en cuenta que la señal de entrada puede variar entre  $-V$  y  $+V$ , y normalizando entre  $+1$  y  $-1$ , siendo el número de niveles de cuantificación  $N$ , y para cuantificación uniforme el número de intervalos de separación también será  $N$ , por lo que se cumple que  $2V = N \cdot a$  y, por lo tanto, nos queda que:

$$e_c = \frac{a^2}{12}$$

Según hemos indicado anteriormente, el error de cuantificación viene dado por la expresión.

$$e_c = \frac{a^2}{12}$$

Suponiendo una señal normalizada, podemos sustituir  $a$  por  $2/n$ :

$$e_c = \frac{(2/N)^2}{12} = \frac{4}{12N} = \frac{1}{3N}$$

Para conocer el valor de esta relación se suele dar el valor de la relación entre la potencia de cresta de la señal y la potencia media de ruido. Ya que la señal normalizada varía entre  $+1$  y  $-1$ , la señal de cresta será,  $S_{cresta} = 1$  y por tanto, nos queda:

$$\frac{S}{e_c} = \frac{4}{1/3N} = 12N^2$$

Si expresamos esta relación en decibelios, teniendo en cuenta que  $N = 2^n$ , en función del número  $n$  de bits tenemos

$$\begin{aligned} (S/e_c)_{dB} &= 10 \log (12(2^n)^2) = 10 \log 12 \cdot 2^{2n} = 10 \log 12 + 10 \log 2^{2n} = \\ &= 10 \cdot 8 + 20 n \log 2 = (10,8 + 6_n) \text{ dB} \end{aligned}$$

Esta relación nos indica que al aumentar en 1 bit la codificación, introducimos una mejora de 6 dB. En telefonía se utiliza la relación siguiente, ya que se trabaja con valores muy inferiores a los valores pico a pico, usualmente 12 dB por debajo:

$$(S/e_c) = -1,2 + 6_n$$

En los sistemas prácticos de comunicación digital se utiliza la cuantificación no uniforme. El coste de un sistema de este tipo se puede reducir en gran medida mediante la limitación del número de tamaños posibles del escalón de cuantificación. Con la cuantificación segmentada se pretenden combinar las ventajas de compansión con un costo razonable, aproximando las características de la misma mediante tramos que representan regiones de cuantificación uniforme. La zona definida por cada región se denomina segmento, de ahí el nombre de cuantificación segmentada. En el siguiente capítulo analizaremos la curva de codificación según la Ley A.

## CAPITULO III.

### CODIFICACIÓN

La codificación es convertir cada muestra cuantificada en una secuencia de  $n$  impulsos discretos de longitud fija denominada palabra, carácter o código. El código binario es el más conocido de los códigos de ponderación, que son los más extendidos en la actualidad. Se recordará que el código binario define dos valores o estados lógicos definidos: el 1 y el 0. Eléctricamente podría definirse con 0, o estado bajo; y con 1 o estando alto a un valor de, por ejemplo, 5V.

Una palabra de  $n$  bits define como máximo  $N = 2^n$  niveles cuánticos. A cada nivel cuántico se le puede asignar cualquier combinación de  $n$  bits, pero de forma que no haya dos o más niveles con la misma combinación de bits, es decir, se podría recurrir a cualquier código compuesto de ceros y unos

Ahora bien, este código de ceros y unos puede asignarse a los valores cuantificados de forma ordenada y consecutiva o de forma aleatoria. Para signar de forma ordenada un código a los escalones de cuantificación se utiliza el código binario, ya que por ejemplo podemos asignar al escalón 1 su correspondiente en binario que es el 0001, al escalón 2 el 0010, y así sucesivamente. Por el contrario, si se utiliza cualquier otro código, escalón 1, le podríamos asignar el número 0110, al 2 1111, etc. En la Tabla III.1 tenemos un ejemplo para un codificador de 3 bits.

Escalón de cuantificación	Código binario	Código X
0	000	110
1	001	111
2	010	001
3	011	100
4	100	010
5	101	000
6	110	101
7	111	011

Tabla III.1. Ejemplo de codificación.

De lo expuesto anteriormente se deduce que en el diseño de la etapa de codificación habrá que tener en cuenta la facilidad de generación del código, ya que observando la tabla 2 apreciamos que es más fácil generar el código binario continuo, es decir, que



solamente varia un bit de una combinación a otras; mientras que el código  $x$ , que es totalmente irregular, es por tanto, mucho más difícil de generar.

Como las señales vocales tienen niveles positivos y niveles negativos, se utiliza en la práctica el código binario simétrico. Este código se extiende igual por debajo que por encima del nivel 0. Podemos observar en la Figura. III.1, un ejemplo de codificación de tres bits y cualificación uniforme.

En este tipo de codificación se utiliza el bit que ocupa el lugar de mayor peso con el fin de indicar el signo de la muestra y especificar si ésta es positiva o negativa. Figura III.1.

Los restantes bits expresan la magnitud de la muestra de la siguiente forma:

\_\_\_ 1 n n → muestra positiva.

\_\_\_ 0 n n → muestra negativa

El código, visto desde su parte central, tiene una estructura simétrica, de ahí su nombre de código binario simétrico. Es el sistema de codificación utilizado en PCM.

Existen dos sistemas prácticos de transmisión digital, el que sigue la Ley de Codificación  $A$  y el que sigue la Ley  $\mu$ , siendo el primero utilizado en Europa y el segundo en Norteamérica. Se centrará en la codificación según la Ley  $A$  por ser la utilizada en Europa.

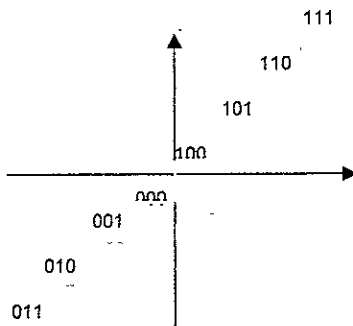


Figura. III.1 Codificación con 3 bits.

### III.1. Codificación según Ley A.

En la Figura. III.2 se muestra la ley tipo A para  $A = 87,6$ , obtenida por aproximación lineal de 13 segmentos y definida según el CCITT. Si observamos, por ejemplo, la parte positiva de la curva, apreciaremos que existen en ella ocho segmentos de pendiente distintos, salvo los dos primeros tramos que en realidad son uno sólo.

Podemos considerar que en cada segmento hay una señal escalonada de 16 niveles por lo que en total tendremos 1228 valores de cuantificación. Asimismo, en la parte negativa tendremos otros 128 valores de cuantificación.

En el eje horizontal, como podemos apreciar en la Figura III.2 se representa la amplitud de la señal de entrada, mientras que en el vertical se representa el número de valores de decisión. El valor máximo de entrada normalizado en 1 se divide entre 2, con lo que la mitad derecha del eje horizontal contiene los valores de la señal de entrada correspondiente al segmento 8.

La mitad izquierda se divide de nuevo en dos partes iguales, quedando en la mitad derecha es decir, en el segundo cuarto de la señal total, los valores correspondientes al segmento 7, y así sucesivamente hasta conformar los segmentos 1 y 2 que en realidad forman uno solo.

Para la parte negativa de la curva se realiza la misma operación, pero en el lado izquierdo del eje horizontal.

Observando de nuevo la Figura. III.2 vemos que, para poder situar el valor de una muestra deberemos conocer:

- A) El signo de la muestra, positivo o negativo
- B) El número del segmento
- C) El nivel cuántico dentro del segmento.

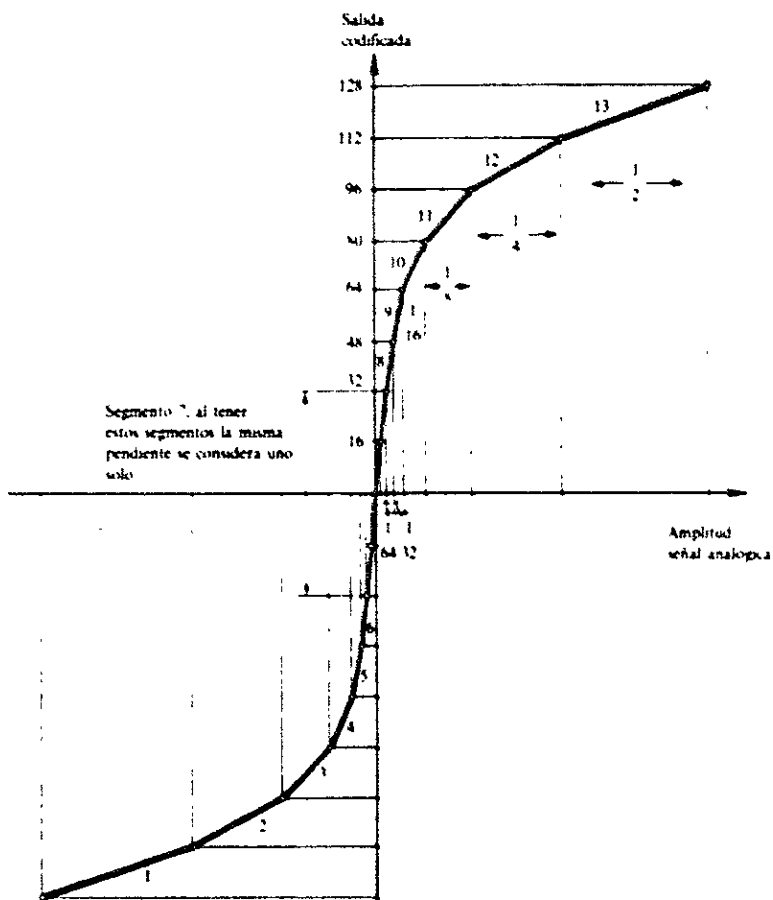


FIGURA. III.2. Característica de transferencia de compansión para la ley A

### III.2. Palabra PCM.

Se ha visto que la curva tiene en total 256 niveles de cuantificación que son los que se utilizan en telefonía. Así pues, para representar todos los intervalos necesitamos 8 bits, ya que  $2^8 = 256$ .

Este grupo de 8 bits forma una palabra **PCM**, cuya estructura se muestra en la Figura. III.3

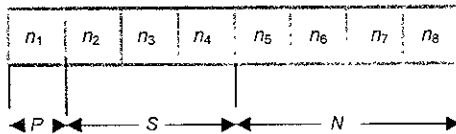


Figura. III.3 Palabra MIC de 8 bits.

Según la figura anterior, una palabra PCM está estructurada en tres partes que se han denominado *P*, *S*, *N*; éstas indican lo siguiente:

- ❖ *P*: Indica la polaridad de la muestra dependiendo del bit que tengamos. Será positiva si dicho bit es 1 y negativa si es 0
- ❖ *S*: Define el segmento de la Ley A en el que se sitúa la muestra. Se codifica con 3 bits aunque haya 16 segmentos, pues se refiere a la mitad de la curva. Mediante el bit de signo indicamos si estamos en la mitad positiva o en la negativa.
- ❖ *N*: Define el nivel de cada segmento. Como ya se sabe, dentro de cada segmento hay 16 niveles, por lo que se codificará con 4 bits.

En la Tabla III.2. se muestra la codificación para los segmentos y para los 16 intervalos dentro de cada segmento. Esta codificación es el resultado de las especificaciones del CCITT a la Ley A. Para comprenderlo mejor, veamos el siguiente ejemplo:

Supongamos la palabra **PCM** : 10111100.

En función de este código sabemos que:

- a) Es una muestra positiva, pues el bit de signo es 1.
- b) Dicha muestra está en el segmento 3 del cuadrante positivo, que coincide con el 9 de la Figura.
- c) Dentro de dicho segmento nos encontramos en el nivel 12.

Debido al código simétrico pueden aparecer muchos ceros que no son deseables en la transmisión digital. Para evitar este inconveniente se invierten los bits que ocupan las posiciones pares. Este código se denomina código binario de signo alternante.

CODIGO DE 8 BITS								
Segmento	Polaridad de la muestra 1 = + 0 = -	Código que define el segmento			Código que define el nivel de amplitud dentro de un segmento			
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	1
3	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	1
5	0	0	1	1	0	1	0	0
6	0	0	1	0	0	1	0	1
7(7)	0	0	0	1	0	1	1	0
7(8)	0	0	0	0	0	1	1	1
7(9)	1	0	0	0	1	0	0	0
7(10)	1	0	0	1	1	0	0	1
8(11)	1	0	1	0	1	0	1	0
9(12)	1	0	1	1	1	0	1	1
10(13)	1	1	0	0	1	1	0	0
11(14)	1	1	0	1	1	1	0	1
12(15)	1	1	1	0	1	1	1	0
13(16)	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla III.2. Codificación de segmentos e intervalos dentro de cada segmento para la ley A.

### III.3. Códigos de línea.

La palabra codificada de 8 bits tiene que adaptarse a las características del medio de transmisión. Para ello, la señal digital debe cumplir las siguientes condiciones:

1. No se deben tener largas secuencias de ceros.
2. No se debe tener componente de corriente continua en la señal.
3. La forma de los impulsos no ha de cambiar durante la transmisión, con el fin de que el receptor interprete correctamente la información. Todas estas condiciones se pueden cumplir llevando a cabo una redecopilación. Precisamente con este objeto, existe una gran cantidad de códigos de línea diferentes.

#### III.3.1. Codificación no retorno a cero (NRZ).

En la codificación NRZ, la señal esta alta para toda duración de un "uno" y baja para toda la duración de un "cero". A cada bit ("1" ó "0") le corresponde un intervalo unitario durante el cual la señal eléctrica es alta o baja. Figura. III.3.

Esta codificación tiene los siguientes inconvenientes: Cuando se tiene una sucesión de "1", la señal-eléctrica es una señal continua no pulsante, lo que obliga a tener circuitos electrónicos adecuados para identificar dos señales continuas; esto representa un inconveniente, además, en la recepción no se puede distinguir si hay una sucesión de "0" o si se tiene una ausencia de señal.

En las anteriores formas de codificación no se puede reconvertir la señal en los casos en que haya largas secuencias de ceros, debido a la falta de cambios de flancos. Otra desventaja es que sólo se transmiten estados 0 + 1, por lo que no es adecuado para transmisiones a largas distancias, debido a la alta componente continua.

Cuando se tiene sucesiones de "1" ó de "0", no se puede sincronizar la recepción, ya que los intervalos unitarios no están definidos en el tiempo, por lo tanto no hay información de la frecuencia de muestreo y no se puede reconstruir e ( $t$ ).

#### III.3.2. Codificación con retorno a cero (RZ).

En la Codificación RZ, la señal es baja a lo largo del tiempo de duración de "cero" y alta en la primera mitad de duración de un "uno". Esta codificación necesita dos intervalos unitarios por bit, puesto que el bit "uno" se representa por un estado alto durante la mitad del tiempo del bit, lo cual impide que la señal quede alta durante la sucesión de "1".

Los circuitos para identificar señales continuas ya no son necesarios. Sin embargo, la sincronización parece imposible durante una sucesión de "0". De esta manera la potencia de la señal se encuentra en su mayor parte en la gama 0 de altas frecuencias, por lo que no es conveniente en transmisiones largas, ya que las frecuencias altas se amortiguan más que las bajas.

### III.3.3. Código AMI (del inglés: Alternatic Marc Inversión).

Elimina totalmente la componente de tensión continua en la señal digital. Se invierte el signo de cada segundo bit. De esta forma, se obtienen tres posibles valores: +1, 0 y -1 para simbolizar dos estados, 0 y 1 teniendo los valores +1 y -1 la misma información binaria 1.

### III.3.4. Codificación Manchester

En la codificación Manchester, el bit "uno" se representa por una transición del estado alto hacia el estado bajo, y el bit "cero" se representa por una transición del estado alto hacia el estado bajo. Las transiciones que representan los bits se realizan en medio de la duración de un bit, por lo que son necesarios dos intervalos unitarios por bit. Como siempre se tiene una transición, sea cual sea el bit, la sincronización es fácil por lo que el acoplamiento continuo no es necesario. En la Figura. III.3 se presentan estos códigos.

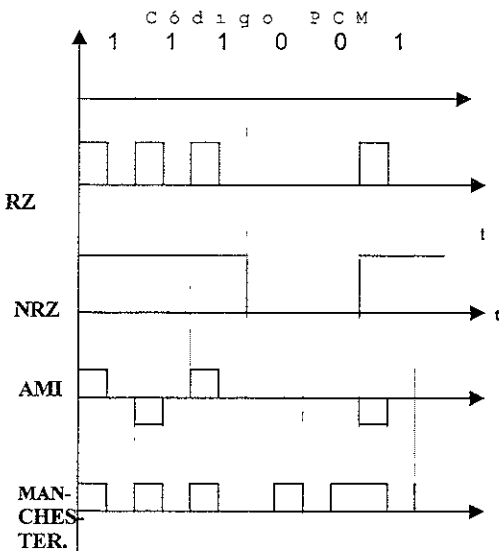


Figura. III.3. Códigos RZ, NRZ, AMI y MANCHESTER.

## CAPITULO IV

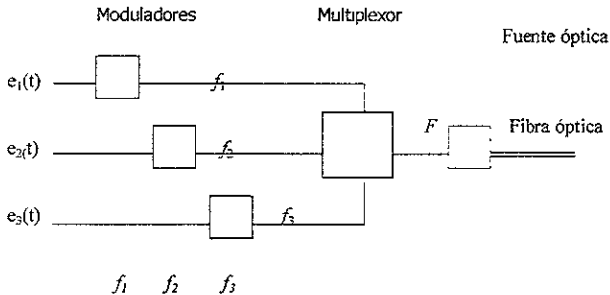
### MULTICANALIZACION

El transmitir al mismo tiempo varias señales  $e(t)$  se le llama múltiplex o multicanalización. Se podría utilizar un sistema de transmisión para cada señal; sin embargo, esta solución no es económica, por lo que es preferible tratar de transmitir los diversos mensajes por el mismo canal de transmisión (en este caso la misma fibra óptica). En la transmisión óptica no es posible por el momento modular la frecuencia de la luz que sirve como portadora, sólo se puede modular su amplitud.

#### IV.1. Multicanalización por división de frecuencias (FDM).

La multicanalización por división de frecuencias es una técnica utilizada para transmitir al mismo tiempo, sobre un mismo canal, varias señales analógicas. Si  $e_n(t)$ , son  $n$  señales analógicas por transmitir con un ancho de banda  $B$ , entonces el índice  $n$  ( $n > 1$ ) permite distinguirlas.

Cada señal  $e_n(t)$  modula (en amplitud o frecuencia) a una señal de frecuencia  $f_n$ . Todas estas señales moduladas, con frecuencias diferentes, modulan a su vez una subportadora maestra a muy alta frecuencia  $F$ . La subportadora maestra, puede modularse en amplitud o frecuencia. Por último, la subportadora maestra modula la amplitud del flujo energético inyectado a la fibra, Figura. IV.1.



**FIGURA. IV.1** Multicanalización por división de frecuencias (FDM).



Supongamos que las señales  $e_n(t)$  sean conversaciones telefónicas ( $B = 4$  KHz). Las frecuencias  $f_n$  son por lo tanto  $4, 8, \dots, n \times 4$  KHz. La frecuencia  $F$  de la subportadora maestra es igual a  $n \times 4$  KHz. Así, una subportadora maestra a 2540 KHz puede transmitir 635 conversaciones telefónicas. La de modulación se efectúa mediante el filtrado, con el fin de separar las 635 conversaciones telefónicas.

#### IV.2. Multicanalización por división de tiempo (TDM).

La técnica de enviar varios canales por una sola vía consiste en introducir muestras de otros canales en los espacios existentes entre dos muestras consecutivas de un mismo canal.

La frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual que el doble de la frecuencia de la señal a transmitir, según el teorema de muestreo. Es decir  $f_m > 2W$ , siendo el periodo de la frecuencia de muestreo,  $T_m = 1 / f_m$ , por tanto, éste será el tiempo que las muestras se encuentren separadas entre sí y en el cual se puedan transmitir otras señales. Para transmitir varias señales por un solo medio de transmisión se toman muestras cada intervalo de tiempo  $T$ , que se repite precisamente, cada  $T_m$  segundos, en la Figura. IV.2 podemos observar el espacio que queda entre muestras y que se aprovecha para enviar otras señales.

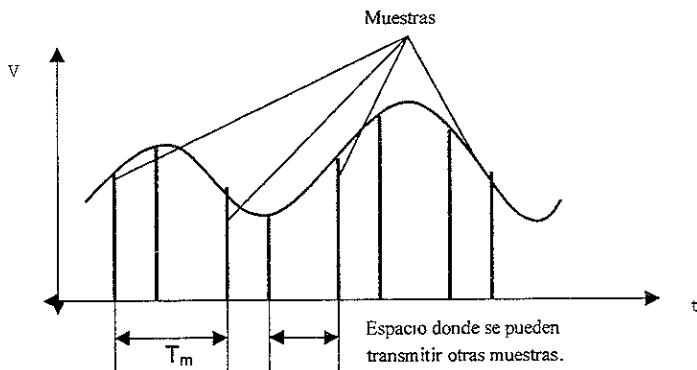


FIGURA. IV.2. Intervalos de tiempo entre muestras.

En la práctica, se lleva a cabo extrayendo una muestra de cada canal por cada  $T_m = 1 / f_m$  segundos mediante un conmutador y transmitiéndose una serie de muestras de distintas señales por un mismo medio de transmisión.

En el receptor, mediante otro conmutador sincronizado con el emisor, se distribuyen las muestras de cada canal a su filtro paso bajo correspondiente, obteniendo, a la salida de cada uno de los mismos, las informaciones originales.

Esta técnica de transmisión se representa en la Figura IV.3, donde se observa la trama, que es el conjunto de muestras de todos los canales durante el ciclo.

El codificador está controlado por una señal de reloj cuya frecuencia es  $F_r = N * n$ , donde  $N$  es el número de canales a transmitir y  $n$  es número de impulsos binarios por muestra. Para hacer corresponder los canales del emisor con los del receptor, se utiliza una señal denominada de alineamiento de la trama, generada en el transmisor. Esta señal sirve como referencia a los impulsos siguientes hasta la nueva señal de alineamiento de trama.

En el receptor, esta señal se produce a intervalos regulares, de manera que se disponga de una referencia fija que ayude a determinar la posición de la señal de información para cada canal. En un sistema PCM práctico existen las denominadas informaciones de señalización entre centrales telefónicas. Con estas señales se establecen la conexión, el marcateje, la medición de la duración de la llamada y la desconexión al término de la llamada.

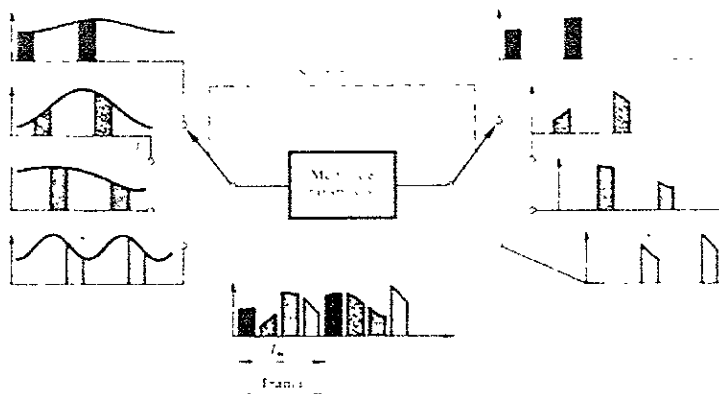
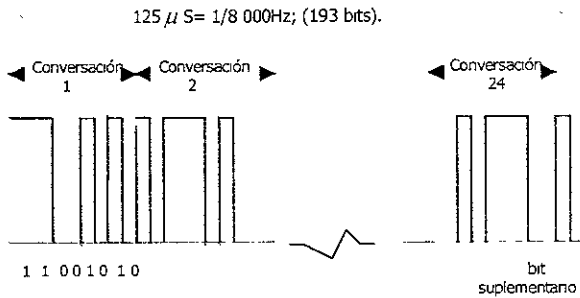


Figura. IV.3. Representación simplificada de un sistema de multiplexación en el tiempo.

La multicanalización por división de tiempo es una técnica que permite transmitir por un mismo canal varias señales digitales. Tomase por ejemplo un sistema PCM de 8 bits.

La señal por transmitir es una señal telefónica ( $B = 4 \text{ KHz}$ ), la frecuencia de muestreo es de  $2B$ , lo que corresponde a un muestreo cada  $125 \mu \text{ s}$ . Si cada bit dura  $1 \mu \text{ s}$ , entonces la transmisión de una muestra toma  $8 \mu \text{ s}$ , por lo que antes de la transmisión de otra muestra de esta señal, hay un tiempo de  $117 \mu \text{ s}$ , durante el cual el canal de transmisión no se utiliza. Este tiempo libre permite transmitir muestras de otras 14 señales telefónicas diferentes. Este es el principio de la multicanalización por división de tiempo

En la telefonía, hay un formato normalizado llamado  $T_1$ , con el cual se transmiten 193 bits durante  $125 \mu \text{ s}$ , esto corresponde a 24 canales PCM codificada con 8 bits, como se puede ver en la Figura. IV.4. Se transmite un bit suplementario después de la 24 muestra. para controlarla la sincronización de transmisión.



**Figura. IV.4.** Multicanalización por división de tiempo (TDM). Formato  $T_1$  que permite multicanalizar 24 conversaciones telefónicas codificadas en PCM con 8 bits. (1 bits X 24 conversaciones) X 8000 Hz.

La multicanalización por división de tiempo puede también utilizarse con modulación de pulsos (TAM, PDM o PPM). Los pulsos modulados de las diversas señales por transmitir se intercala en un espacio temporal libre de dos muestras sucesivas, por lo que es necesario que la de modulación de una sola señal no ocupe todo este espacio.

La multicanalización se realiza con un multiplexor que transmite, en serie, sobre la línea de transmisión los 8 bits del canal 1, después de los 8 bits del canal 2 y así sucesivamente. Después que se transmitió el canal 30, se mide el bits de sincronización y el multiplexor transmite los 8bits de una muestra del canal 1. Al extremo receptor, un multiplexor atraviesa la operación inversa, es decir, que envía los 8 bits de canal hacia una línea diferente donde se decodificarán.

Los sistemas de multicanalización antes descritos no son exclusivos para las comunicaciones por fibras óptica, la única limitación que presenta la fibra óptica, es que la luz sólo puede modularse en amplitud. La señal eléctrica que resulta de las operaciones de modulación o de multicanalización modulada en amplitud al flujo energético emitido por un la fuente óptica.

### **IV.3. Multicanalización de longitud por división de longitudes de onda.**

Esta multicanalización es específica para las telecomunicaciones ópticas. Se utiliza la propiedad que posee la fibra óptica de presentar baja atenuación a varias longitudes de onda en un rango de longitudes de onda. Entonces se puede inyectar luz en una fibra en diversas longitudes de onda  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Se utiliza varias fuentes ópticas cada una de las cuales emite en una longitud de onda particular. La luz emitida por cada fuente se modula mediante una señal eléctrica diferente y los diferentes flujos luminosos emitidos se introducen en una sola fibra. En el otro extremo de la fibra, la luz se filtra en sus diferentes longitudes de onda y cada flujo energético para cada longitud de onda específica se transforma en una señal eléctrica, gracias a un detector.

Se puede transmitir varias señales sobre una misma fibra. Un sistema de emisión multicanal por divisiones de longitudes de ondas comprende.

- Fuentes emisoras de longitudes de ondas diferentes.
- Un multiplexor óptico que permita acoplar luces emitidas en una misma fibra.
- Una fibra de pequeña atenuación a las longitudes de onda por transmitir.
- Un multiplexor óptico para separa la luz que llega en sus diferentes longitudes de onda.
- Detectores ópticos para convertirlos en señales eléctricas.

No hay ninguna limitación particular para cada una de las señales transmitidas; algunas pueden ser analógicas y otras digitales o pulsantes. Además de permitir enlaces bidireccionales. Por lo que nada impide utilizar una longitud de onda para la comunicación en un sentido y otra para la comunicación en el otro sentido.

## CAPITULO V

### ESTRUCTURA DE LA TRANSMISIÓN PCM.

En un sistema PCM, una vez transmitidas las muestras, se codifican en grupos de impulsos, los cuales forman una palabra o trama. Obviamente, en este sistema la trama será el conjunto de impulsos binarios de un ciclo de muestras para los canales que se transmitan, incluyendo la información de sincronismo.

Se conocen dos tipos de transmisión de datos digitales **Síncrona** y **Asíncrona**. En la Transmisión Síncrona la tasa de bits en la entrada de cada multiplexor es fija y está sincronizada con un reloj central. Por tanto dentro de cualquier periodo de tiempo habrá siempre un número específico discreto de bits, que siguen una progresión predeterminada muy regular. El multiplexor opera a una tasa múltiplo de la del reloj central para formar de manera secuencial todos los datos y después transmitir el bloque de estos. La eficiencia es alta, porque la palabra binaria sigue a la anterior sin la necesidad de designadores especiales para separar palabras.

En la Transmisión **Asíncrona**, las palabras se envían una por una sin tener la necesidad de una relación temporal fija entre una palabra y la siguiente. Muchas terminales de datos (como los teletipos y otras terminales de teclado) transmiten símbolo alfa-numéricos en forma asíncrona, y las palabras de datos resultantes se denominan caracteres. En la Transmisión Asíncrona, el receptor tiene que restablecer la sincronización de cada carácter. Esto se consigue empezando cada carácter con un pulso inicial. Entonces, el reloj del receptor se resincroniza al principio de cada carácter y pueden permitirse pequeñas variaciones en la tasa entre los relojes del transmisor y receptor. Al final de cada carácter se transmite un pulso de detención.

#### **V.1. Estructura de la Trama.**

El CCITT recomienda dos sistemas de transmisión: el sistema de 30 canales, que es el adoptado en Europa, y el sistema de 24 canales, utilizado en los Estados Unidos. El sistema Europeo emplea la Ley de Compasión A (recomendación G732). Cada trama esta formada por 30 canales de información en 32 intervalos de tiempo, que están numerados de 0 a 31. Esta estructura de trama se presenta en la Figura V. 1, donde se observa que la información de 16 tramas constituye lo que se denomina multitrama. Cada sistema se puede considerar como un multiplexor de 32 intervalos de tiempo que permiten transmitir 30 canales de información. Los dos intervalos se destinan uno al alineado de trama o señalización y el otro al sincronismo.

Este multiplexor MDT combina 30 canales que transportan señales de fonía y que están muestreados a 8 KHz, codificados, según la Ley A. El intervalo de tiempo comprendido entre dos muestras de un mismo canal es lo que se denomina tiempo de trama.

Así mismo, el periodo de tiempo ocupado por las muestras de un canal se llama intervalo de tiempo de canal y el periodo que ocupa un dígito, intervalo de tiempo de dígito. Visto esto se puede decir que cada trama está constituida por 32 intervalos de tiempo de canal y, a su vez, cada intervalo de tiempo de canal tiene 8 intervalos de dígito. Al muestrearse a 8,000 muestras por segundo en cada canal, quiere decir que una trama completa se repite cada  $125 \mu \text{ seg}$  ( $1/8,000$ ) como se observa en la Figura V.1.

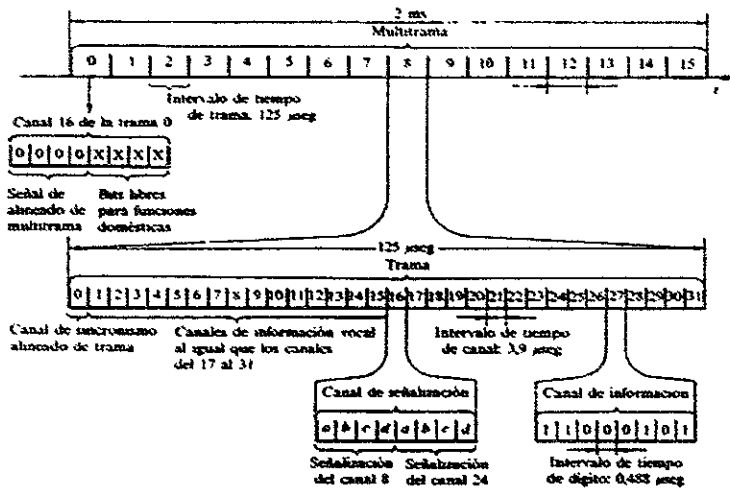


Figura. V.1. Estructura de multitrama para un sistema PCM de 30 + 2 canales.

Además como cada trama tiene 32 intervalos de tiempo de canal, la duración de cada uno de los mismos será de  $125 \mu \text{ seg}/32 = 3,9 \mu \text{ seg}$  y como los intervalos de tiempo de cada dígito son 8, su duración será  $3,9 \mu \text{ seg}/8 = 0,488 \mu \text{ seg}$ .

La trama está compuesta siguiendo este orden:

- ♦ Canal 0: Canal de sincronismo.
- ♦ Canales del 1 al 15, ambos inclusive: señales vocales.
- ♦ Canal 16: Canal de señalización.
- ♦ Canal 17 al 31, ambos inclusive: Señales vocales.

El canal 0 contiene la señal de alineado de la trama junto con la información de las alarmas del sistema y las ordenes necesarias para el personal de mantenimiento.

Este intervalo 0 es el de sincronización del emisor con el receptor para indicar, el primero al segundo, cuando llega el inicio y el final de una trama.

Este intervalo tiene una palabra fija para las tramas pares y otra para las impares, y contiene 7 bits que forman la señal de alineado de trama reconocida por el receptor para que, de esta forma, cada canal PCM pueda ser correctamente identificado.

El bit restante se utiliza para las comunicaciones internacionales. Los canales del 1 al 15 y del 17 al 31 son los que transportan la información correspondiente a los 30 canales de fonía. El canal 16 se dedica a la señalización de central.

Dentro de la multitrama, en la primera trama, es decir en la trama 0, el canal 16 transmite la señal de alineado de multitrama que, al igual que ocurriría con la trama, indica al receptor el comienzo de una nueva multitrama. Esta señal de alineado está ubicada en los 4 primeros dígitos de dicho canal 16 de la trama 0 y los otros 4, o bien, se utilizan para funciones domésticas, o se dejan disponibles. La siguiente trama, es decir, la trama 1, transporta en el canal 16 la señalización del canal 1 en los 4 primeros bits y la señalización del canal 17 en los 4 últimos bits. En la trama 2, el canal 16 transmite la señalización correspondiente a los canales 2 y 18, y así sucesivamente hasta la trama 15, que es la última de la multitrama y que lleva la señalización de los canales 15 y 31. De esta forma como cada trama contiene la señalización de 2 canales, el conjunto de la multitrama transmite la señalización de los 30 canales de fonía.

## **V.2. Sistema de 24 canales.**

La CCITT da el sistema de 24 canales de Ley  $\mu$  (recomendación G 753) está muestreado a 8 KHz, comprimido mediante la Ley  $\mu$  y codificado en palabras de 8 bits. La multitrama consta de 12 tramas. Tanto la palabra de alineación de trama como la alineación de multitrama están distribuidas a lo largo de esta última dentro de las posiciones de un único bit  $X$  insertado al comienzo de cada trama. Este sistema se utiliza en América del Norte y Japón.

## **V.3. Velocidad de transmisión.**

La tasa binaria de una transmisión es igual al número de elementos binarios o bits transmitidos por segundo. La unidad es el bit por segundo (bit/s). La rapidez de modulación de una transmisión es el número de intervalos unitarios transmitidos cada segundo. La unidad es el baud. Los códigos RZ y Manchester necesitan dos intervalos unitarios por bit.

Si la tasa binaria es 64 k bit/s ( PCM con  $B= 4$  kHz y cuantización de 7 bits, más un bit de control), el canal de transmisión deberá tener una rapidez de modulación de 64 kilobaud en codificación NRZ, y de 128 kilobaud en codificación con RZ o Manchester. Cada intervalo unitario tiene una duración máxima de  $7.8 \mu\text{m}$  (1 s/128000 intervalos) en dosificación con RZ o Manchester y de  $15.6\mu\text{s}$  en codificación con NRZ, en el ejemplo escogido. La banda pasante requerida para el sistema es superior o igual a  $1/2T$ , donde  $t$  es la duración de un intervalo unitario.

En la mutitrama PCM se debe tener en cuenta el concepto de velocidad y transmisión o régimen binario, que es el número de bita transmitidos en un segundo. Como un sistema PCM tiene 32 intervalos de canal y como cada canal es muestreado a una velocidad de 8 mil muestras por segundo y tiene 8 bits, el régimen binario o velocidad de transmisión será:

$$R_b = V_t = f_m * N * n = 8000 * 32 * 8 = 2048 000 \text{ bits/seg} = 2.048 \text{ Mbit/seg.}$$

donde  $R_b$  es el régimen binario,  $V_t$  la velocidad de transmisión,  $f_m$  la frecuencia de muestreo,  $N$  el número de canales y  $n$  el número de dígitos por canal.

#### V.4. Señalización y alarmas.

El sistema descrito de 30 más 2 canales es utilizado en Europa, Africa y América del Sur. A lo largo del trabajo se ha expuesto que en el canal 16 de las tramas 1 a la 15 de una mutitrama se transmite información de señalización de central y a su vez es encargada de establecer las condiciones por las que transcurre una llamada entre centrales telefónicas con terminales del sistema PCM. Para comprender estas condiciones supongamos que la comunicación se establece entre centrales A y B. Cuando un usuario descuelga su teléfono se cierra el circuito correspondiente a su línea y la central A lo detecta mediante un selector, que al encontrar la línea activada da acceso al usuario mediante la generación de un tono de 400 Hz. Cuando el abonado recibe este tono maraca el código del usuario con el que desea contactar. Al marcar el número deseado se producen en la línea tantos cierres y aperturas de circuitos de corriente continua como indica en la cifra marcada. Por ejemplo al momento de marcar el 7 se producen 7 cierres y aperturas, correspondiendo 10 al número 0. Este código a través de un circuito de enlace habilitado por la central A llega a la central B, de donde depende el destinatario. Si este tiene el teléfono colgado, la central B envía a dicho teléfono una señal de 17 Hz, la cual activa el zumbador del teléfono destino y a su vez genera un tono de 400 Hz hacia el abonado de origen lo indica que la llamada se está realizando si el destinatario está ocupado, el tono que se genera hacia el origen es también de 400 Hz pero con una carencia distinta. En el momento de descolgar el teléfono destino cesa la señal de 17 Hz, que hace sonar el teléfono del destinatario seleccionado y da comienzo la comunicación. Esta finaliza en el momento en el que uno de los 2 abonados abre el circuito correspondiente a su línea colgando el teléfono y generándose en la central opuesta un tono de comunicación de 400 Hz al otro abonado.

En las unidades de señalización las informaciones de corriente continua se convierten en secuencia de bita, los cuales se multiplexan en el resto de la información PCM. Este



sistema de proporcionar la información de señalización ha sido adoptado para el sistema CCITT de 30 canales. Como ya se sabe, los dígitos de señalización se disponen en un sistema de 30 canales en palabras de 4 bits. Es imprescindible que un sistema de transmisión cuenten con un procedimiento de supervisión de posibles averías y activación de la consiguiente alarma. Generalmente se aceptan como condiciones que deben activar una alarma: La pérdida de alineado de una trama y una sucesiva tasa de errores.

El desalineado de una trama sólo ocurre cuando existe una avería en el sistema o cuando se produce una tasa de errores muy elevada. Se ha convertido que para considerar la pérdida de alineado de trama se deben recibir 3 señales erróneas de alineado sucesivas. Esto se detecta mediante una memoria que se incrementa en 1 bit cada vez que se recibe la señal de alineado incorrecta, poniéndose a 0 en caso de ser correcta.

El objetivo es garantizar que se reciban 3 señales consecutivas de alineado de trama erróneas. Cuando esta memoria llega a la cuenta de 3 se produce la alarma y, consecuentemente la búsqueda de la señal de alineado de trama. Se ha demostrado que una tasa de error de  $10^{-3}$  no se puede considerar satisfactoria a la hora de decidir la aptitud para el servicio de una palabra recibida, por lo que cuando esto se produzca debe de saltar la alarma.

## V.5. DETECCION Y CORRECCION DE ERRORES DE TRANSMISION.

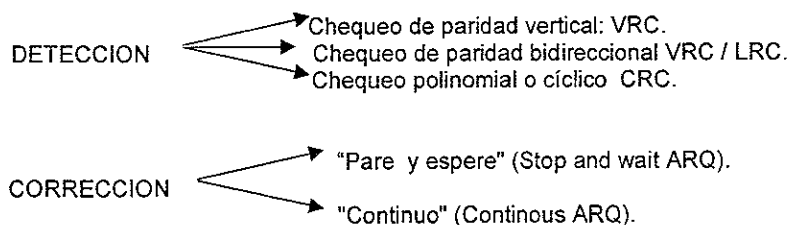
Muchas pueden ser las causas que alteran las señales transmitidas a través de cualquier medio de transmisión.

### Clasificación.

Se distinguen dos formas principales:

- \* Requerimiento automático de repetición: ARQ ( Automatic Request for Repeat)
- \* Corrección de errores hacia delante: FEC ( Forward Error Correction)

En el método ARQ encontramos la:



La mayoría de las técnicas de detección de error en las secuencias de bits transmitidas hacen uso del agregado de bits de control.

### V.5.1. Chequeo de paridad vertical (VRC).

Es un método simple aplicable a nivel de byte. Su uso está directamente relacionado con el código ASCII. El método de codificación de símbolos ASCII utiliza los valores binarios con 7 bits para representar los datos.

El máximo valor binario representable es  $7F$  (hex) =  $127$  (dec), por lo tanto se tienen 128 posibilidades distintas (de 0 a 127). Si definimos un carácter igual a un byte podemos disponer de un bit para su control. Se define la "paridad" de un carácter de dos formas:

Paridad "par", cuando el número total de bits "1" en el byte es par.

Paridad "impar", cuando el número total de bits "1" es impar.

En el momento de la transmisión, el extremo emisor calcula el bit de paridad y lo adosa a los datos; el receptor, recalcula la paridad y la compara con el criterio utilizado. Es evidente que el método no asegura que no hayan ocurrido errores. Basta que cambien su valor dos bits de datos simultáneamente para que la paridad sea correcta pero el dato no. VRC disminuye la probabilidad de que el dato final sea erróneo. Podemos mencionar que una línea telefónica discada transmite a velocidades entre  $10^3$  y  $10^4$  bps, con una tasa de error de  $10^{-5}$  (1 en  $10^5$ ). Este valor puede ser mejorado a  $10^{-7}$  con el uso de VRC.

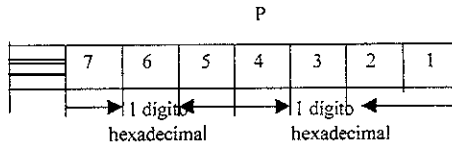


Figura V.2. Código ASCII y bit de paridad

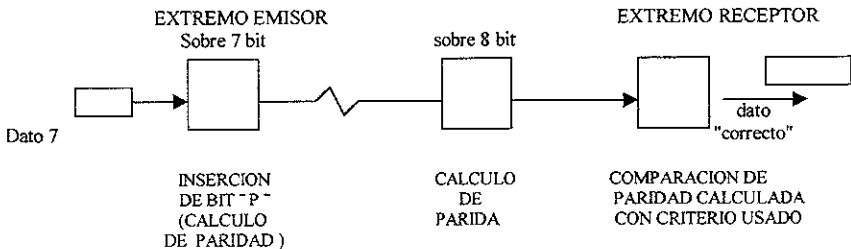
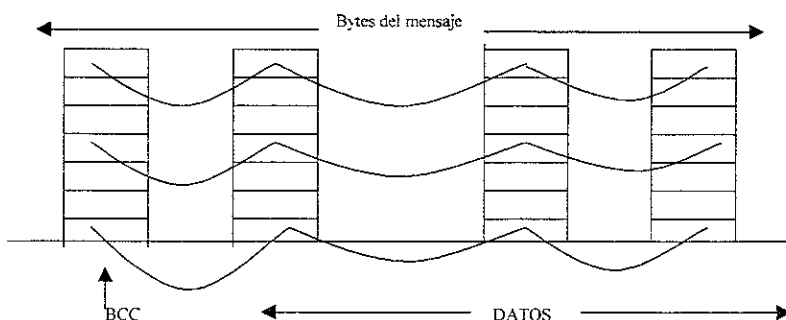


Figura. V.3. Método de chequeo de paridad vertical (VRC).

### V.5.2. Chequeo de paridad longitudinal (LRC).

Si en lugar de considerar 7 bit como el dato a transmitir en el momento de calcular la paridad, consideramos un conjunto de caracteres (bloque) con sus bits de VCR y sobre eso calculamos la paridad, estaremos usando LRC.



Tomando el  $i$ -ésimo de cada byte y calculando a partir de ellos el bit de paridad resultante, obtendremos el  $i$ -ésimo bit "BCC", para  $i$  variando entre 1 y 8. Cuando se usa LRC se usa un carácter al final del mensaje que contiene todos los bits de paridad calculados. Este byte adicional, se llama BCC (Block Check Character).

## CAPITULO VI

CONVERSOR ANALÓGICO - DIGITAL

Los procesos de muestreo, retención y codificación, son los pasos fundamentales para transformar una señal variante en el tiempo por una sucesión de ceros y unos. Debido a esto la señal se convierte de su forma analógica original a señal digital. Como se sabe, no se puede obtener unos valores digitales que se correspondan exactamente con la señal analógica de entrada, ya que la señal digital sólo puede presentar un número finito de combinaciones, mientras que la entrada analógica en su variación pasada por infinitos valores. Por lo que se necesita determinar los márgenes entre los que cualquier magnitud de entrada se interprete como un solo valor. Este proceso se conoce con el nombre de cuantificación y requiere de cierto tiempo, por lo que antes de esto, se lleva a cabo el muestreo de la señal analógica y se mantienen las muestras un intervalo de tiempo predeterminado.

Así, obtendremos una señal cuyos valores variarán a incrementos fijos durante un cierto tiempo. Una vez que se han establecido los intervalos comprendidos entre dos niveles con un valor asignado a cada uno, o lo que es lo mismo una vez que se ha cuantificado la señal, se le hace corresponder a cada valor un número binario. Estos números binarios obtenidos pueden tener un número determinado de bits. Pues bien, el conjunto de estos procesos es la conversión analógico - digital (**ADC**).

La precisión del proceso de conversión dependen del número ( $n$ ) de bits del convertidor. Si hacemos  $n = 3$  podemos generar 8 combinaciones binarias es decir, los números binarios comprendidos entre el 000 y el 111. Si  $n$  es igual a 4 tendremos 16 combinaciones, y así sucesivamente.

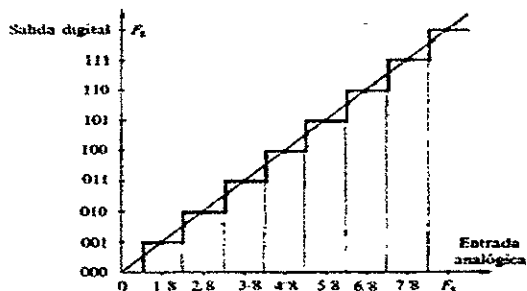


Figura. VI.1. Curva de transferencia para una conexión A/D de 3 bits.

Considerando como ejemplo un ADC de 3 bits cuya correspondencia con los valores digitales obtenidos y las variaciones de la señal analógica de salida se presentan en la curva de la Figura. VI.1.

En el eje  $x$  se representan las variaciones de la señal analógica, mientras que en el eje  $y$  tendremos los valores digitales obtenidos en la conversión. Observando esta curva se deduce que existe relación entre el número de bits del convertidor y la precisión de este. Cuando mayor sea el número de bits, mayor será su resolución, ya que se elevará el número de pequeños intervalos de la escala de valores de entrada.

## VI.1. Características de los conversores A/D.

### VI.1.1. Resolución.

Expresa el incremento o decremento de tensión necesaria para poder modificar el valor del bit de menor peso (LSB). Por lo tanto:

$$\text{Resolución} = V_{FS} / 2^n = \text{tensión analógica para variar el LSB.}$$

Donde,  $V_{FS}$  es el valor fondo de escala del convertidor y  $n$  el número de bits.

Por ejemplo, considerando la siguiente Tabla. VI.1. la codificación de un ADC de 4 bits la resolución será:

$$\text{Resolución} = V_{FS} / 2^n = 0.25$$

Por lo que comprobamos que por cada cambio de 0.25 V la salida binaria varía en 1, por lo que el LSB también varía.

Escala	$V$ analógica $4 V_{FS}$	Salida digital Binario natural	Escala	$V$ analógica	Salida digital Binario natural
FS - 1 LSB	3,75	1 1 1 1		1,75	0 1 1 1
	3,5	1 1 1 0		1,5	0 1 1 0
	3,25	1 1 0 1		1,25	0 1 0 1
12/16 FS	3	1 1 0 0	4/16 FS	1	0 1 0 0
	2,75	1 0 1 1	3/16 FS	0,75	0 0 1 1
	2,5	1 0 1 0	2/16 FS	0,5	0 0 1 0
8/16 FS	2,25	1 0 0 1	1/16 FS	0,25	0 0 0 1
	2	1 0 0 0	0	0	0 0 0 0

Tabla VI.1. Tabla de codificación con conversores A/D de 4 bits.

Lo que la Tabla VI.1 refleja es la conversión de un ADC cuyo código de salida es binario natural, pero hay conversores que entregan otros códigos.

### VI.1.2. No linealidad.

Es el error producido por la desviación de la característica de la transferencia real respecto a la ideal. En la Figura. VI.2. se presenta un ejemplo para un convertidor de 4 bits, la no linealidad se expresa con la siguiente relación:

$$NL = V_{NL} / V_{FS}$$

Siendo,  $NL$  la no linealidad,  $V_{NL}$  la desviación en el peor caso, y  $V_{FS}$  el valor de fondo de escala.

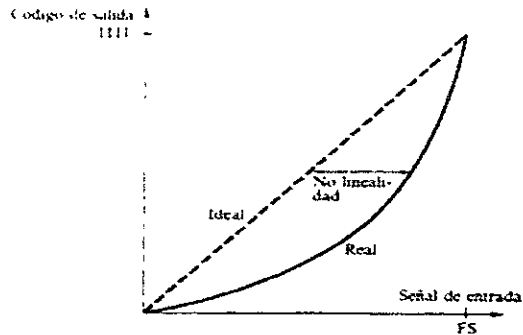


Figura. VI.2. No linealidad para una conversión de 4 bits.

### VI.1.3. No linealidad diferencial.

Diferencia entre el código generado por un cierto nivel de entrada y el que le correspondería idealmente para este mismo nivel. Como se muestra en la Figura. VI.3.

Si la linealidad diferencial es mayor de  $\pm \frac{1}{2}$  LSB, se corre el riesgo de que se produzca pérdidas de códigos.

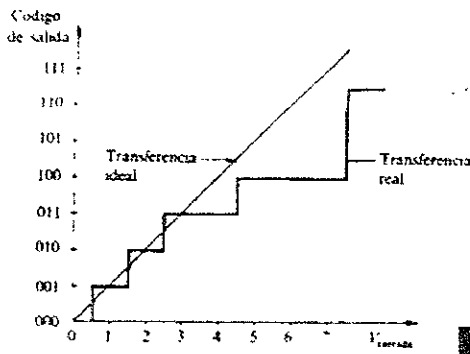


Figura. VI.3. No linealidad diferencial.

### VI.1.4 Tiempo de conversión.

Es el tiempo necesario para asociar un valor digital con el valor de la tensión analógica de entrada del convertidor.

### VI.1.5 Error de cuantificación uniforme.

Como el número de intervalos es acortado y, en consecuencia su ancho es finito, a la señal de entrada le corresponde, para niveles distintos muy próximos, un mismo código, por lo que se presentan diferencias entre la señal original y la de salida. Estas diferencias se denominan errores o ruido de cuantificación. Por lo expuesto, se deduce que un ADC será cuando más perfecto sean los escalones tenga su cuantificador. Figura. VI. 4. El error de cuantificación viene dado por la siguiente expresión:

$$X + e_c(x) = y \rightarrow e_c = y - x$$

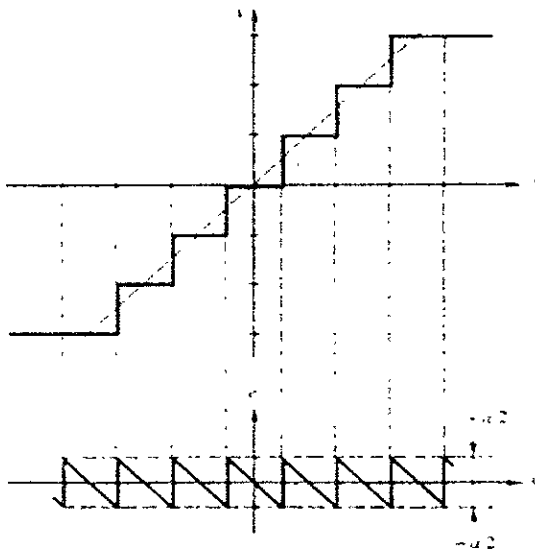


Figura.VI.4. Error de cuantificación uniforme.

Como se observa al tratarse error uniforme se tiene que el error de cuantificación será 0 en el punto medio del escalón, punto donde se cumple que  $x$  es igual a  $y$ .

## VI.2. CONVERSOR PARALELO – SERIE.

Resumiendo lo anterior; sabemos que un sistema PCM consta de los siguientes circuitos: de muestreo y retención, que conforma una señal escalonada a partir de la señal a transmitir. El inicio de cada escalón debe coincidir con el de los impulsos de muestreo y su amplitud de la señal en el momento del impulso de muestreo. El cuantificador que transforma una señal continua analógica en un conjunto de estados discretos de salida.



A continuación cada muestra cuantificada se convierte en una señal de impulsos discretos denominados palabra, carácter o código. Este proceso se denomina Codificación. Estos dos pasos en su conjunto constituyen la conversión analógico digital que tiene por objeto convertir el valor de la amplitud de la muestra obtenida en una palabra digital de  $n$  bits.

El valor binario de esta palabra indicará el valor de la amplitud de la muestra a partir de la cual se ha obtenido. Esta palabra digital se presenta en paralelo: todos sus bits aparecen al mismo tiempo. Para su conversión en señal luminosa y posterior envío a través de fibra óptica es necesario convertir esta palabra en serie. Esta necesidad viene motivada por el hecho de que al estar presentada la palabra en paralelo suponiendo que dicha palabra fuese de 8 bits, sería necesarios 8 circuitos conversores de señal eléctrica luminosa. Además, harían falta 8 canales de fibra óptica para realizar la transmisión. Sin embargo, esta información binaria se convierte en serie, los bits se transmiten uno detrás de otro por un solo canal de fibra óptica como se ve en la Figura: VI.5.

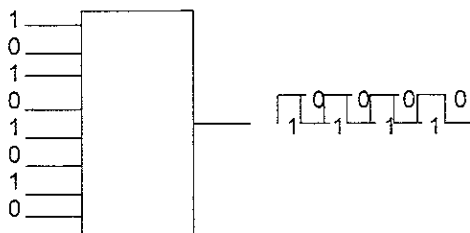


Figura. VI.5. Conversor paralelo - serie

Los circuitos que se utilizan para realizar esta conversión son los registros de desplazamientos. Un registro está constituido por varios biestables conectados en serie, de modo que cada biestable memoriza un bit. Los biestables actúan de manera síncrona por medio de una señal de reloj.

## CAPITULO VII.

### ENLACE POR FIBRA OPTICA.

Las fibras ópticas se utilizan para transportar información por ejemplo un usuario puede emplear un sistema de telecomunicación por fibra óptica en una distancia de 10 m, para transmitir una señal analógica de 5 KHz proporcionada por un traductor. Las propiedades dieléctricas de la fibra justifican la selección en un medio inflamable. Otro usuario se vale de una fibra óptica para transmitir 4032 conversaciones telefónicas en PCM (8 bits por muestra, 64 Kbits / por canal y 281 Mbits / s en total) a gran distancia. A pesar de que los usuarios emplean fibras ópticas los sistemas serán realizados por medio de elementos diferentes ya sean los emisores ópticos y sus circuitos de modulación, acopladores, fibras, detectores ópticos y preamplificadores.

Un sistema de telecomunicación sirve para transmitir información a distancia esta información puede ser analógica o digital por lo que se debe de conocer el tipo de señal a transmitir así como la cantidad de información que hay que transmitir por unidad de tiempo: el ancho de banda máximo para un sistema analógico o la velocidad de transmisión binaria para un sistema digital.

La calidad de la señal recuperada se especifica por el conocimiento de la relación señal / ruido (S/N) por una transmisión analógica y la tasa de errores de los bits (TEB) para una transmisión digital.

Uno de los datos importantes a considerarse a demás de los anteriores es la longitud de enlace, ya que este puede efectuarse directamente, o por medio de repetidores de línea. Sólo el estudio completo del sistema permite saber si se requiere y el número necesario de repetidores.

En un sistema de transmisión por fibra óptica, la fuente óptica, la fibra y el detector óptico están limitados en frecuencia. Por lo que se pueden considerar como filtros de paso bajo en serie que limitan las más altas frecuencias transmisibles.

La fibra óptica consiste en un núcleo de vidrio o plástico, que tiene un alto índice de refracción. El núcleo es rodeado por otro medio que tiene un índice algo más bajo, cuya función es aislarlo del ambiente.

Cada fibra provee de un camino de transmisión único de extremo a extremo sin modulación, unidireccional y si el equipo lo permite, también puede ser bidireccional. Pulsos de luz se introducen en un extremo, usando un láser o LED. La reflexión de los pulsos es la forma de transmisión de datos. El ancho de banda es mucho más alto que cualquier otro medio de transmisión, actualmente 50 Mbps a 10 Km. Experimentalmente 1 Gbps. En ella es posible transmitir datos, voz y video.

## VII.1 Tipos básicos de fibras ópticas:

### VII.1.1. Fibra de índice de escalón de modo sencillo.

Esencialmente existe solo una trayectoria para la luz a través del cable por medio de reflexión; los rayos que entran se propagan directamente por el núcleo siguiendo la misma trayectoria y requiriendo la misma cantidad de tiempo para viajar la distancia del cable.

### VII.1.2. Fibra de índice de escalón multimodo.

El núcleo central es más grande que el anterior. Los rayos que le pegan a la interface núcleo-cubierta en un ángulo mayor que el crítico son propagados por el núcleo en una forma zigzagueante, los que pegan en un ángulo menor entran a la cubierta y se pierden .

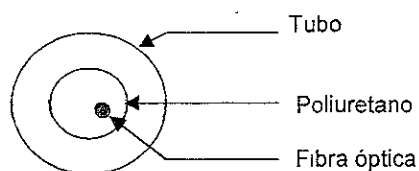
### VII.1.3. Fibra de índice graduado multimodo.

Con núcleo central que tiene un índice refractivo no uniforme, es máximo en el centro y disminuye hacia los extremos; la luz se propaga diagonalmente por medio de la refracción interceptando a una interface de menos a más denso. Como el índice refractivo disminuye con la distancia, desde el centro y la velocidad es inversamente proporcional a él, los rayos que viajan más lejos del centro se propagan a una velocidad mayor.

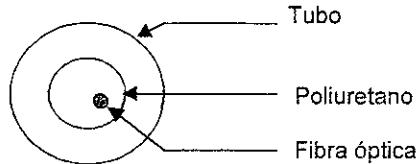
## VII.2. Construcción.

Núcleo, cubierta, tubo protector, buferes, miembros de fuerza, y una o más capas protectoras.

1.- Tubo suelto: Cada fibra está envuelta en un tubo protector



2.- Fibra óptica restringida: Rodeando al cable hay un bufer primario y otro secundario que proporcionan protección de las influencias mecánicas externas que ocasionarían rompimiento o atenuación excesiva.



3.- Hilos múltiples: Para aumentar la tensión, hay un miembro central de acero y una envoltura con cinta de Mylar.

4.- Listón: Utilizada en sistemas telefónicos.

### VII.3. Parámetros característicos de la fibra óptica.

- Atenuación
- Ancho de banda
- Apertura numérica
- Distancia umbral.

#### VII.3.1. Atenuación.

Podemos pensar en la atenuación como una fuerza que se opone al desplazamiento de una onda, haciéndole perder energía. Los factores que producen atenuación en la fibra óptica se dividen en intrínsecos y extrínsecos.

Los intrínsecos son:

- \* Absorción del material (Banda del infrarrojo y ultravioleta del radical OH; defectos)
- \* Esparcimiento del material.
- \* Flujo evanescente o modos fugados.
- \* Esparcimiento de la guía de onda (defectos geométricos y de perfil de índice de reflexión)

Y los extrínsecos:

- \* Deformación mecánica (curvaturas y micro curvaturas).
- \* Radiación nuclear.

Mucho se ha avanzado en la eliminación de impurezas para reducir la absorción de potencia

### VII.3.2. Ancho de banda.

Se ha mencionado que las fibras transmiten información digital. Cuando un pulso de luz viaja por la fibra, se ensancha por factores propios de la transmisión Figura VII.1.

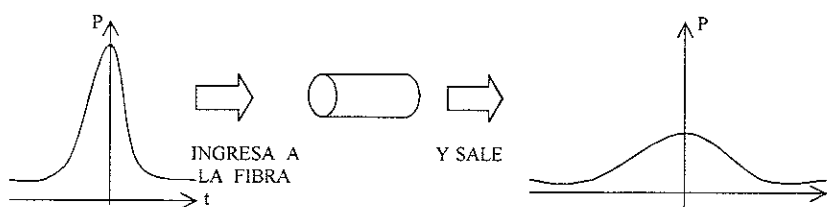


Figura. VII.1. Ensanchamiento del pulso.

La velocidad de los bits a la entrada de la fibra depende de la dispersión modal. Este ensanchamiento es el que limita la velocidad de transmisión, dado que es necesario separar más los pulsos para poder distinguirlos. Una simple ecuación relaciona el ancho de banda (AB) con el ensanchamiento del pulso ( $t$ ), medido a mitad de altura.

$$AB = \frac{0.44}{\Delta t} \quad , \text{ medido en MHz por Km.}$$

### VII.3.3. Apertura numérica.

La apertura numérica se define como la mitad del ángulo sólido dentro del cual un haz de luz incidente en la fibra logra la condición de reflexión total interna (RTI).

Un rayo de luz que viaja por un medio con un índice de refracción  $n_1$  (núcleo) mayor que  $n_2$  (índice del recubrimiento), al llegar a la frontera de los medios, se refracta de manera que se cumple la Ley de Snell:

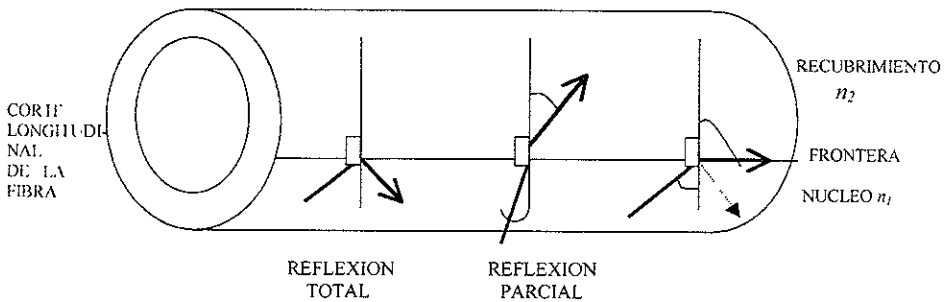


Figura VII.2. Fenómeno de reflexión.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$\theta_c$  es el ángulo crítico.

$$\text{Sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}, \text{ para } \theta_2 = 90^\circ, \text{ o sea } \text{sen } \theta_2 = 1$$

Para un ángulo de incidencia  $\theta \geq \theta_c$  tendremos la reflexión total interna (RTI), del haz transmitido.

Para el caso de una fibra óptica, con índice de refracción de tipo de escalón, la apertura numérica (AN) pueda expresarse como:

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

Desde el punto de vista conceptual, lo que nos interesa es lograr que los haces cumplan siempre con la condición de RTI, para minimizar las pérdidas.

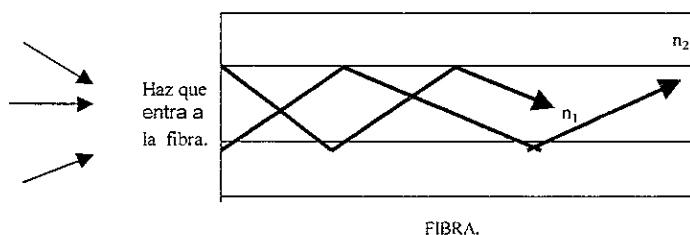


Figura. VII.3. Recorrido del haz en la fibra.

#### VII.3.4. Distancia Umbral

Conforme la señal avanza por el medio va perdiendo fuerza hasta llegar al punto en que si desea transmitirse a mayor distancia debe colocarse un repetidor, un dispositivo que le vuelva a dar potencia para seguir avanzando. Un repetidor de fibra es aquel que toma una señal de luz, la convierte a señal eléctrica, la regenera y la coloca en un dispositivo de emisión de luz para que se siga propagando.

Comparadas con el cobre, las fibras ópticas permiten que las distancias entre repetidores sean más grandes. Por ejemplo, en un enlace para dispositivos RS-232 (puerto serial) la distancia máxima entre dos nodos es de 15.2 mts. Transmitiendo a una velocidad de 19200 Bps. Una línea de fibra óptica puede transmitir a esa velocidad hasta una distancia de 2.5 Km. esto significa que la distancia lograda con la fibra es 164 veces mayor que la de su equivalente el cobre.

Al igual que en la atenuación, la distancia máxima que puede alcanzarse esta muy relacionada con el tipo de fibra. En las versiones sencillas se logran distancias típicas de dos Km entre el transmisor y en receptor, con fibras y equipos mas sofisticado las distancias pueden ir hasta los 2.5 km sin repetidor. Aplicaciones de laboratorio han permitido alcanzar distancias de 111 km a 5 Gbps sin la necesidad de los repetidores.

### VII.3.5. Pérdidas en los cables

Por absorción de luz y que es convertida en calor ultravioleta, infrarroja y de resonancia de ión. Por dispersión de Rayleigh o materiales: Luz difractada que escapa por la cubierta al chocar contra una irregularidad del vidrio en el proceso de fabricación.

\* Cromática o de longitud de onda: La luz emitida por un LED se descompone en sus diferentes longitudes de onda constitutivas viajando a distintas velocidades por la fibra llegando al otro extremo a diferentes tiempos.

\* De radiación: Causada por dobleces e irregularidades en la fibra.

\* Modal: Causada por diferencias de tiempos de propagación de los rayos de luz que toman diferentes trayectorias por una fibra

\* De acoplamiento: En las conexiones de fuente a fibra, fibra a fibra y/o fibra a fotodetector, es causadas por problemas de alineación.

### VII.3.6 Cables Ópticos.

Para poder utilizar fibras ópticas en forma practica, estas deben ser protegidas contra esfuerzos mecánicos, humedad y otros factores que afecten su desempeño. Para ello se les proporciona una estructura protectora, formando así, lo que conocemos como cable óptico. Dicha estructura de cables ópticos varará dependiendo de sí el cable será instalado en ductos subterráneos, enterrando directamente, suspendido en postes, sumergido en agua etc.

El propósito básico de la construcción del cable de fibra óptica es el mismo; mantener estables la transmisión y las propiedades de rigidez mecánica durante el proceso de manufactura, instalación y operación. Las propiedades esenciales en el diseño del cable son la flexibilidad, identificación de fibras, peso, torsión, vibración, límite de tensión, facilidad de pelado, facilidad de cortado, facilidad de alineación del cable y la fibra, resistencia al fuego, atenuación estable, etc. Los parámetros para formar un cable especial son:

- ♦ Esfuerzo máximo permitido en la fibra durante su fabricación, instalación y servicio; determina la fuerza mínima de ruptura de la fibra y la fuerza requerida para el miembro detensión.
- ♦ Fuerza lateral dinámica y estática máxima ejercida sobre la fibra, para determinar la configuración del cable y el límite de tolerancia de microcurvaturas.



- ◆ Flexibilidad.
- ◆ Rango de temperatura y medio ambiente en donde el cable va a operar, paralela elección del tipo de materiales a utilizar tomando en cuenta su coeficiente de expansión térmica y su cambio de dimensiones en presencia de agua.

Para cumplir estos requerimientos se observan las siguientes recomendaciones:

- ◆ Evitar cargas o esfuerzos mecánicos sobre las fibras
- ◆ Aislar la fibra de los demás componentes del cable.
- ◆ Mantener las fibras cerca del eje central y proporcionar espacio a las fibras para su mantenimiento
- ◆ Escoger los materiales de los elementos del cable con mínimas diferencias en sus coeficientes de expansión térmica.

## CAPITULO VIII

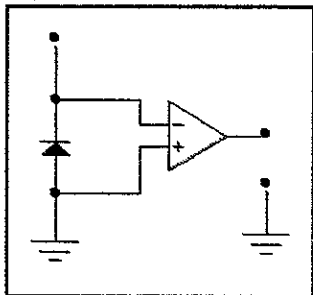
CIRCUITOS DE DETECCIÓN.

El flujo energético acoplado al detector óptico es en general muy pequeño. La corriente suministrada por el fotodiodo  $p-i-n$  es muy pequeña y debe preamplificarse para poder utilizarse. El conjunto indispensable para la detección, es la pareja formada por el detector óptico y el preamplificador. El detector óptico y el preamplificador son dos fuentes de ruido. La relación señal ruido/ruido en la salida del preamplificador, es un parámetro esencial del detector que determina la calidad de la señal recibida.

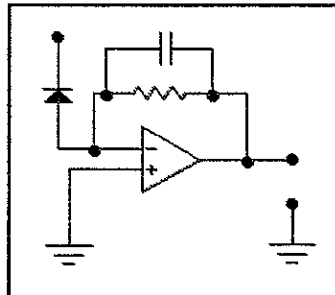
Los detectores ópticos tienen tiempos de tránsito muy bajos, del orden de 1 ns, por lo que en general, la frecuencia máxima de operación del conjunto detector óptico-preamplificador está ligada a las características del preamplificador, en especial a su impedancia de entrada.

Con el fin de limitar el ruido, los preamplificadores utilizados en la fotodetección deben tener una impedancia de entrada muy alta. Sin embargo, si se toma en cuenta las capacidades tanto del fotodiodo como del preamplificador, una impedancia de entrada alta significa una limitación de la banda de paso. Se distinguen dos tipos principales de preamplificadores. Figura. VIII.1.

- a) El amplificador de tensión de alta impedancia de entrada permite utilizar una elevada resistencia de carga  $R_L$ ; sin embargo la señal integrada necesita la utilización de un circuito de equalización
- b) El amplificador de impedancia de transferencia, de ganancia elevada y alta impedancia de entrada, se retroalimenta para obtener la banda de paso requerida. \*\*\*



Amplificador de tensión



Amplificador de impedancia de transferencia

Figura. VIII.1 Preamplificadores para fotodetectores.

### VIII. 1. DEMODULACION.

En el otro extremo del sistema de transmisión, el tren de pulsos modulados después de ser amplificados o regenerados debe de modularse para recuperar la señal  $e(t)$ . En modulación de amplitud, el filtrado del tren de pulsos, con ayuda de un filtro de paso bajo con frecuencia de corte igual a  $B$  es suficiente para recuperar  $e(t)$ . En modulación de duración es necesario hacer una conversión de PDM a PAM. Esta conversión se realiza por integración y muestreo sincronizado. La señal de sincronización se recupera con ayuda de los frentes de subida de la señal modulada en duración. En modulación es necesario realizar una conversión, de PPM a PDM seguida de otra conversión de PPM a PAM.

En la recepción, los pulsos codificados son demodulados mediante un convertidor digital analógico que realiza la operación inversa de que se efectuó al principio. A los sistemas que efectúan las operaciones de conversiones analógica-digital (muestreo cuantización) y digital-analógica, se les llama codec (codificador-decodificador)

## **CONCLUSIÓN.**

La transmisión digital es superior a la analógica. desde varios puntos de vista importantes. Los circuitos analógicos tienen amplificadores que tratan de compensar la atenuación de la línea. Pero jamás lo harán en forma exacta, en especial si la atenuación es diferente para distintas frecuencias. Dado que el error es acumulativo, las llamadas de larga distancia que tienen que pasar por varios amplificadores, son las que probablemente sufren una distorsión mayor

Los regeneradores digitales, por lo contrario, pueden restablecer la débil señal de entrada a su valor original, en forma exacta, por que los únicos valores posibles son 0 y 1 estos regeneradores no sufren de errores acumulativos. Una ventaja de la transmisión digital es que la voz, información, música, e incluso imágenes como las de televisión, facsímil, o video, pueden multiplexarse (mezclarse) conjuntamente, para hacer más eficiente el uso del equipo. Otra ventaja es que con el uso de las líneas de fibra óptica es posible tener velocidades más altas para la transmisión de información.

Los bloques principales de un enlace de comunicaciones de fibra óptica son: transmisor, receptor y guía de fibra. El transmisor consiste de una interfase analógica o digital, un convertor de voltaje a corriente, una fuente de luz y un adaptador de fuente de luz a fibra.

La guía de fibra es un vidrio ultra puro o un cable plástico. El receptor incluye un dispositivo conector detector de fibra a luz, un fotodetector, un convertor de corriente a voltaje un amplificador de voltaje y una interfase analógica o digital. En un transmisor de fibra óptica la fuente de luz se puede modular por una señal analógica o digital. Acoplando impedancias y limitando la amplitud de la señal o en pulsos digitales.

El convertor de voltaje a corriente sirve como interface eléctrica entre los circuitos de entrada y la fuente de luz.

La fuente de luz puede ser un diodo emisor de luz LED o un diodo de inyección láser ILD, la cantidad de luz emitida es proporcional a la corriente de excitación, por lo tanto el convertor voltaje a corriente convierte el voltaje de la señal de entrada en una corriente que se usa para dirigir la fuente de luz.

La conexión de fuente a fibra es una interface mecánica cuya función es acoplar la fuente de luz al cable. La fibra óptica consiste de un núcleo de fibra de vidrio o plástico, una cubierta y una capa protectora. El dispositivo de acoplamiento del detector de fibra a luz también es un acoplador mecánico.

El detector de luz generalmente es un diodo PIN o un APD (fotodiodo de avalancha). Ambos convierten la energía de luz en corriente. En consecuencia, se requiere un convertor corriente a voltaje que transforme los cambios en la corriente del detector a cambios de voltaje en la señal de salida.

Como resultado del rápido aumento de las aplicaciones de las computadoras y equipo digital relacionado, y la necesidad de comunicación entre dichos dispositivos, los conceptos entre redes en principio se desarrollaron para el servicio telefónico se han reformulado para proporcionar una transmisión más eficiente de datos digitales. Estas redes de comunicación no sólo deben ser capaces de manejar y dirigir datos digitales con eficiencias sino que también deben de incluir facilidades para el servicio del teléfono digital. Los tres modos básicos para la operación de redes de comunicación son la conmutación de circuitos (líneas), la conmutación de mensajes y la conmutación de paquetes. En la conmutación de circuitos, la comunicación se lleva a cabo por medio de una conexión que se dedica al par de comunicación durante el tiempo que dure la transmisión del mensaje. Durante este tiempo la línea está dedicada del todo y ningún otro usuario tiene acceso a la trayectoria de transmisión incluso durante aquellos intervalos donde es posible que no se estén transmitiendo datos. La comunicación de circuitos es más eficiente cuando existe una tasa de transmisión relativamente constante, se vuelve ineficiente cuando la transmisión se sucede en pequeñas ráfagas separadas por largos intervalos sin transmisión. La conmutación de circuitos se puede utilizar para Sistemas Analógicos como Digitales, y por lo tanto fue el primer desarrollo para los sistemas telefónicos, los otros dos tipos citados son más específicos para la transmisión de datos digitales.

## GLOSARIO.

**Angulo crítico.** Angulo a partir del cual se produce la reflexión total, es decir, no existe rayo refractante que atraviese el material.

**Angulo de admisión.** Es el mayor ángulo desde el que la luz puede entrar en un cable de fibra óptica.

**CCITT.** Organismo de normalización que edita una serie de recomendaciones para regular todo lo relacionado con el mundo de las telecomunicaciones.

**Codificación.** Conversión de cada muestra codificada en una secuencia de  $n$  impulsos discretos de longitud fija denominada palabra

**Codificador.** Dispositivo electrónico un código a cada una de las muestras cuantificadas

**Código.** Secuencia de impulsos discretos asignada a cada muestra codificada

**Compansión.** Proceso por el cual la característica del cuantificador se comprime y posteriormente se expande, con el fin de lograr en la cuantificación una mayor precisión para las amplitudes más bajas. Existen dos tipos principales de las leyes de compansión: La ley  $A$ , utilizada en Europa, y la ley  $\mu$ , utilizada en Norte América.

**Comprensión.** Proceso en la emisión PCM por el que se reduce el error de cuantificación al existir mayor numero de niveles para las amplitudes más bajas.

**Conversor A/D.** Dispositivo que se encarga de realizar la conversión de la señal análogica tras ser muestreada, en una secuencia de impulsos discretos. Realiza los procesos de cuantificación y codificación.

**Conversor D/A.** Dispositivo encargado de realizar la conversión de la señal digital en muestras. Proceso inverso a la conversión analógico – digital.

**Conversor P/S.** Dispositivo que lleva a cabo la conversión de una serie de palabras que le llegan en paralelo, en una sucesión de bits que salen en serie

**Conversores S/P.** Dispositivo que efectúa la conversión de una serie de bits, que llegan en serie en palabras que salen en paralelo.

**Cuantificación.** Proceso por el cual las muestras de amplitud obtenidas de la señal analógica original se representan mediante números binarios limitando el numero de valores que tomaran las muestras.

**Decodificador.** A partir del código recibido obtiene las muestras cuantificadas

**Expansión.** Proceso en la recepción, inverso en la comprensión, que devuelve las muestras cuantificadas tal y como se obtenían en el emisor antes del compresor

**Filtro paso bajo.** Conjunto de componentes cuya misión es discriminar el paso de frecuencias por encima de una determinada frecuencia denominada de corte del filtro.

**Fibra óptica.** Medio de transmisión consistente en una fibra de vidrio con un recubrimiento. Sus partes principales son el núcleo y la cubierta. En función del índice de refracción de ambos tenemos una serie de tipos de fibras ópticas, estos son el de índice de escalón y el de índice gradual.

**Interfaz electro-óptico.** Conversor de la energía eléctrica en una serie de impulsos luminosos como, por ejemplo el foto transistor

**Interfaz opto eléctrico.** Conversor de la energía luminosa en energía eléctrica como, por ejemplo, el fotodiodo

**Modulación** Es la modulación de una señal soporte que llevara la información (portadora) en función de las características de la señal a transmitir (moduladora)

**Modulación de impulsos por amplitud (PAM).** Es la modificación de la amplitud de portadora que, en este caso es digital en función de la señal analógica a transmitir. moduladora

**Modulación por duración de pulsos (PDM)** . Es la modificación de la duración de los impulsos que forman la señal portadora digital en función de las características de la moduladora.

**Modulación por posición de pulsos (PPM).** Es la modulación de la posición de los impulsos que forman la señal portadora digital en función de las características de la moduladora.

**Modulación digital de amplitud ASK** La amplitud de la portadora analógica se modifica en función de las características de la señal moduladora que, en este caso, es digital

**Modulación digital de fase PSK.** La fase de la portadora analógica se modifica en función de las características de la señal moduladora, que es digital.

**Modulación por pulsos codificados PCM.** Es la modulación de señales analógicas para ser transmitidas digitalmente. Consiste en tomar unas muestras de la señal a transmitir en intervalos digitales estas muestras se cuantificaran y posteriormente se les otorgara un código que será transmitido.

**Muestras.** Conjunto de valores de la señal moduladora tomados a intervalos regulares a partir de los que se puede reproducir la señal original

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**Muestreo.** Proceso en el que se obtienen las muestras de una señal y primer paso para la transmisión digital de una señal analógica. Existen dos tipos de muestreo: *ideal* y *práctico*. En el primero se suponen los intervalos de tomas de muestras infinitesimales, mientras que en el segundo el muestreo se realiza mediante un tren de pulsos.

**Muestreo y retención. S/H.** Proceso en el que las muestras que van llegando se retienen hasta la llegada de la siguiente, de modo que queda una señal continua a su salida en forma de escalera.

**Multiplex por división de tiempo MTD.** Transmisión de varios canales por la misma vía de comunicación. Se basa en muestrear en diferentes instantes los distintos canales y luego realizar multiplexación en el tiempo

**Multiplex por división de frecuencia MDF.** Transmisión de varios canales de información a través de una misma vía de comunicación utilizando modulaciones analógicas

**Niveles cuánticos.** Son los intervalos que se establecen para cuantificar las muestras, de modo que a todos los niveles de la señal comprendidos en cada uno de los intervalos se les asignara el mismo valor

**Reflexión.** Es el cambio de dirección que experimenta la luz cuando choca contra una superficie plana

**Refracción.** Es el cambio de dirección que experimenta la luz cuando pasa de un medio a otro de distinta densidad

**Radiación coherente.** Radiación luminosa caracterizada por que sus rayos son paralelos entre sí, el rayo láser.

**Teorema de muestreo.** Teorema que nos relaciona el ancho de banda de la señal a muestrear con la frecuencia de toma de muestras conociéndose esta frecuencia como de muestreo o de Nyquist

**Trama.** Conjunto de impulsos correspondientes a cada canal. Las tramas se unen en grupos de varias tramas denominadas multitramas.

**Ventanas ópticas.** Intervalos de frecuencias en los que la luz viaja a mayor velocidad a través de algunos materiales.



**BIBLIOGRAFÍA****" FIBER OPTICS "**

Robert J. Hoss.  
Esward A. Lacy

Edit. Prentice Hall.

**" FIBRAS OPTICAS "**

Hilberto Jardon Aguilar.  
Roberto Linares y Miranda.

Edit. C.E.C.S.A.

**" FIBER OPTICS COMMUNICATION AND OTHER APLICATIONS "**

Henry Zanger.  
Cynthia Zanger.

Edit. Maxwell Macmillan.

**" NOISE IN DIGITAL OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS "**

Gunnar Jacobse.

Edit. Artech House.

**" COMUNICACIONES Y REDES DE PROCESAMIENTO DE DATOS "**

Néstor González Sainz.

Edit. McGraw – Hill.

" TRANSMISION DIGITAL A TRAVES DE FIBRA OPTICA "

Mariano Sánchez del Soto.  
Jose Antonio Corbelle Sánchez                      Edit. McGraw – Hill

" INTRODUCCIÓN A LAS TELECOMUNICACIONES "

Enrique Herrera Pérez.                                      Edit. Limusa

" INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN "

Femel G. Stremler.    Edit. Iberoamericana

" AN INTRODUCTION TO OPTICAL FIBERS "

Allen H. Cherrin    Edit. McGraw – Hill

" DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS AND NETWORK "

Michael J. Miller.  
Syed V. Ahamed.    Edit. Computer Science Press.

" OPTICAL FIBER COMUNICATION "

Gerd keiser    Edit. McGraw – Hill.  
Segunda edición.

“ FIBER OPTIC HANDBOOK FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS “.

Federic C. Allard.

Edit. McGraw – Hill.

“ INTRODUCCION A LAS TELECOMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS”.

Jean Pierre Nérou.

Edit Trillas.  
Primera edición.