

52  
2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**



**COMUNICACIONES.  
FORMATEADO Y CODIFICACIÓN EN LA  
TRANSMISIÓN DE MICROONDAS DIGITALES**

## **TRABAJO DE SEMINARIO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :**

**CARLOS GONZÁLEZ QUIJANO**

**ASESOR: ING. ALFONSO CONTRERAS MARQUEZ**

CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
PRESENTE.

AT'N: ING. RAFAEL RODRIGUEZ CEBALLOS  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuatitlán, le permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Comunicaciones. Formateado y Codificación en la Transmisión de Microondas Digitales

que presenta el pasante: Carlos González Quijano,  
con número de cuenta: 8501373-7 para obtener el Título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista.

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

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de México, a 26 de Febrero de 1996

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>1</u>	<u>Ing. Alfonso Contreras Marquez</u>	<u>[Firma]</u>
<u>2</u>	<u>Ing. Juan González Vega</u>	<u>[Firma]</u>
<u>3</u>	<u>Ing. Francisco Tellitud</u>	<u>[Firma]</u>

DEP/VOBSEM

## **Agradecimientos:**

***Doy gracias a Dios por permitirme vivir este momento, y haber superado todo el esfuerzo que encierra detrás.***

***Gracias a mis padres:***

***Elodio González Coronel  
Lucía Quijano de González***

***por el apoyo y palabras de aliento y superación que en su momento me brindaron para seguir adelante.***

***Gracias sinceramente a las familias:***

***Reyes González  
González De la Fuente***

***porque sin su ayuda habría sido aún más difícil el lograr esta meta.***

***Gracias a mis profesores por la trascendente labor de transmitir sus conocimientos y a la Institución (FESC-UNAM) por brindarme una educación.***

***También quiero agradecer al Ing. Alfonso Contreras su valiosa aportación de conocimientos, para la realización de éste trabajo.***

## **Dedicatoria:**

***Con todo mi amor a mi novia Carolina Barrera Díaz, por ser como es, la motivación que me inspira y estar siempre conmigo.***

***A mis compañeros y amigos, esperando que se sientan realizados con la profesión que eligieron.***

## **Pensamientos:**

**"Hoy que se cumple uno de los objetivos más importantes de mi vida, siento una muy especial felicidad empapada de orgullo y satisfacción. Sé que mi carrera profesional aún no termina, sino que apenas comienza; pero con la convicción de que las experiencias vividas, conocimientos adquiridos y deficiencias superadas me han forjado de cierta manera un carácter, que me permitirá competir y dar lo mejor de mi en el ámbito de mi profesión. Para que el día de mañana, si Dios lo permite pueda sentirme un poco más cerca de mi realización personal."**

**Carlos González Quijano**

**"Cuando tengas un título universitario, puedes estar seguro de una cosa ....**

**Que tienes un título universitario."**

**Anónimo**

**"Triunfar no es cosa de una sola vez, es cosa de todos los días, es una forma de vivir y un anhelo por la vida, triunfar es un hábito, una costumbre y un reto diario."**

**Vince Lombardi**

**"El árbol se conoce por sus frutos."**

**Jesus de Nazareth**

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

## SEMINARIO DE COMUNICACIONES

**Objetivo General:** Formar futuros profesionistas capaces de interpretar y analizar teóricamente y prácticamente las transmisiones de información a través de los diferentes medios de comunicación y que tienen gran relevancia en las comunicaciones mundiales.

### MODULO: TRANSMISIÓN DE MICROONDAS DIGITALES

**Objetivo Modulo:** Que el participante sea capaz de poder interpretar los avances tecnológicos e innovaciones que nos proporcionan las Microondas Digitales.

### TEMA: FORMATEADO Y CODIFICACIÓN EN LA TRANSMISIÓN DE MICROONDAS DIGITALES

**Objetivo Tema:** Conocer y analizar los distintos métodos y técnicas empleados en el proceso mediante el cual la información que se desea transmitir, se convierte en señales eléctricas formateadas para poder ser utilizadas por los Sistemas Digitales de Comunicación.



# Indice

---

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Las Telecomunicaciones	1
1.2	Las Telecomunicaciones en México	2
1.3	Sistemas de comunicación vía Microondas	4
1.3.1	Características de las Microondas	4
1.3.2	Importancia de las Microondas	5
<b>Capítulo 2</b>	<b>Comunicación Analógica vs. Digital</b>	<b>7</b>
2.1	Sistemas de radio comunicación	7
2.2	Señales Analógicas y Discretas	8
2.3	Ventajas y Desventajas de la comunicación Digital	10

---

**Capítulo 3 Formateado de la Información 16**

---

3.1 Sistemas de Banda Base	16
3.1.1 Filtros	16
3.1.2 Ancho de Banda de una señal Digital	21
3.1.3 Señales de Banda Base	23
3.1.4 Señales de Banda Ancha	24
3.2 Formateado y Transmisión de Señales de Banda Base	25
3.3 Formateado de Información Textual	28
(Codificación de Caracteres)	

---

**Capítulo 4 Modulación de Pulsos Codificados (PCM) 32**

---

4.1 PCM	32
4.2 Formateado de Información Analógica	33
4.3 Muestreo y Retención	35
(Sample & Hold)	

---

4.4 Cuantización	39
4.5 Codificación	43
4.6 Compander	45
4.7 Convertidores A/D	48
<b>Capítulo 5 Códigos de Transmisión</b>	<b>50</b>
<hr/>	
5.1 Códigos de Línea	50
5.2 TDM	53
<b>Conclusiones y Bibliografía</b>	<b>55</b>
<hr/>	
Conclusiones Finales	55
Referencias Bibliográficas	58

# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1.1 Las Telecomunicaciones

La palabra Telecomunicación que significa: "Comunicar a distancia", en la actualidad se relaciona con el servicio que permite a las personas el fácil acceso a medios de comunicación confiables, económicos y eficientes. Los sistemas de comunicación se hayan donde quiera que se transmita información de un punto a otro. El teléfono, la radio y la televisión son ejemplos cotidianos de este tipo de sistemas.

La disponibilidad de los servicios de telecomunicaciones (principalmente el teléfono) ha sido un factor determinante en el reciente desarrollo socioeconómico de la humanidad. Las entidades o comunidades de cualquier índole no pueden substraerse a este medio de comunicación por ser un servicio necesario, que de hecho representa el canal que permite la integración de la sociedad.

Dentro de un sistema de telecomunicaciones existen estrechas relaciones entre la red (comunicación), aparatos terminales y servicios. Mientras la red y los aparatos terminales representan equipo hardware, los servicios son productos software que permiten llegar a acuerdos para agilizar comunicaciones y procedimientos para el intercambio de información. Es por ello que los servicios se basan en especificaciones técnicas normalizadas también llamados "planos fundamentales de telefonía", establecidas internacionalmente por el Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (CCITT).

La cooperación entre empresas de diferentes países, la descentralización del desarrollo, la demanda de nuevos servicios como son: transmisión de datos en grandes volúmenes y a altas velocidades, video texto, fax , video conferencias, y otros servicios de telefonía, así como contar con información veraz y oportuna, se han convertido en el factor más importante para el desarrollo y evolución de la telefonía digital requiriéndose una infraestructura mundial que garantice el intercambio de la Información.

El futuro inmediato de esta evolución parece indicar que la llamada Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) constituye una solución ideal. La RDSI es un proyecto telefónico que tiene como finalidad principal proporcionar todos y cada uno de los servicios de comunicación al usuario final en una sola red, eliminando los altos costos de administración, operación y mantenimiento.

## **1.2 Las Telecomunicaciones en México**

A partir del siglo pasado, México incursionó en el ámbito de las telecomunicaciones. El 5 de noviembre de 1851 se inició la "carrera" por ganarle a la distancia. Esta fecha marca el nacimiento de los servicios telegráficos, introducidos por Juan de la Granja, con los que se establece el primer servicio de telegrafía entre la capital y el pueblo de Nopalucan, Puebla.

El servicio telefónico se inicia en México en los años 1878-1879, dos años después de que Alejandro Graham Bell lo patentó.

Durante más de un siglo, México ha incorporado avances tecnológicos en el campo de las telecomunicaciones hasta llegar a tener, en los años sesenta del presente siglo, una red nacional de microondas; así mismo, nuestro país se incorporó a la comunicación vía satélite al ser uno de los primeros miembros del consorcio internacional Intelsat (organismo creado en 1964 con el objetivo de integrar una red internacional de telecomunicaciones por satélite con la participación de sus países miembros).

Para 1985 fueron puestos en órbita el Morelos I y II, primeros satélites mexicanos; 8 años después se lanzan los satélites solidaridad, parte del proyecto del sector comunicación incluido en el Plan Nacional de Desarrollo.

Actualmente, los satélites mexicanos conducen las señales de más de 340 redes privadas que satisfacen las necesidades de transmisión de datos de empresas financieras, industriales y de servicios; 35 canales de televisión que enlazan 500 estaciones; 120 sistemas de televisión por cable, y 35 redes de radio difusión que enlazan a 1530 estaciones de radio del país. El sistema satelital solidaridad contribuirá al fortalecimiento de programas de telesecundaria, educación médica y diagnóstico, al unir vía satélite a unidades hospitalarias oficiales y particulares, universidades, colegios y sociedades médicas.

## **1.3 Sistemas de Comunicación Vía Microondas**

### **1.3.1 Características de las Microondas**

Existen ciertas características en los sistemas de radio, las cuales se requieren para facilitar los enlaces nacionales o internacionales y permitir la interconexión con algún otro sistema similar o de otro tipo. Estas características son las siguientes:

- Transmisión general para uso de telefonía, televisión y telegrafía, señales analógicas o discretas.
- Características de modulación en la portadora de RF.
- Característica de Frecuencia Intermedia (FI) y de Banda Base (BB).
- Características de seguridad de continuidad utilizando duplicidad y diversidad.

Un radio enlace de microondas utiliza como portadoras frecuencias superiores a 1 GHz. Se compone básicamente de un transmisor en un extremo del enlace, y de un receptor en el otro. Debido a que el enlace normal de operación entre un transmisor y un receptor es aproximadamente 50 Km (requieren que ni la tierra ni cualquier otro obstáculo significativo obstruyan la trayectoria entre ambos); tienen que ser utilizadas estaciones repetidoras para transmitir las señales a distancias mayores.

Un enlace de microondas empleado para telefonía, puede contener miles de canales telefónicos (los cuales son combinados para ser transmitidos simultáneamente).

### **1.3.2 Importancia de las Microondas**

En la actualidad los radio enlaces por microondas se están utilizando cada vez más ampliamente para transmitir además de comunicación telefónica, otros tipos de información (datos, fax, video), y representa el soporte de las telecomunicaciones vía satélite sin el cual estas no se podrían haber desarrollado.

El constante desarrollo del país ha impuesto la necesidad de la comunicación en gran capacidad entre sus comunidades, por tal motivo se han implementado diferentes medios de transmisión, dentro de los cuales los radio enlaces por microondas ocupan un papel muy importante desde hace ya varias décadas. Debido a esto, se manifiesta la necesidad de inversión de una gran cantidad de recursos para la conservación de este tipo de enlaces, así como la implementación de nuevos proyectos. Es tan grande la responsabilidad de las administraciones que tienen a su cargo esta tarea que realmente resulta difícil vigilar y controlar la cantidad y confiabilidad de transmisión de los sistemas. El establecimiento de programas permanentes de mantenimiento preventivo y correctivo, así como los trabajos de instalación de nuevos sistemas, demandan personal especializado y con habilidad para detectar y corregir los problemas que deterioran la calidad de estos medios de transmisión.

En el presente trabajo se abordan temas y conceptos relacionados con los sistemas de comunicaciones en general, enfocándose a los sistemas digitales de transmisión, y al proceso mediante el cual la información se acondicione para poder ser transmitida.

El formateado y codificación de la información es la base de las comunicaciones digitales, independientemente del medio de transmisión; siendo necesario mencionar que en esta redacción se considera como medio de transmisión los radio enlaces por microondas.

## Capítulo 2 Comunicación Analógica vs. Digital

---

### 2.1 Sistemas de Radio comunicación

Todos los sistemas de radio comunicación emplean el espacio como medio de transmisión. La información viaja en forma de ondas electromagnéticas no guiadas desde el transmisor hasta el receptor. Para que el transmisor radie energía electromagnética al espacio circunvecino, es necesario emplear un transductor, el cual transforme ondas de voltaje y corriente u ondas electromagnéticas guiadas en ondas electromagnéticas no guiadas, este transductor es la antena transmisora, la cual dependiendo de la frecuencia y de la aplicación del sistema puede radiar energía de igual manera en todas las direcciones o en una dirección preferida. En el receptor también se tiene que emplear un transductor que transforme ondas electromagnéticas no guiadas, en ondas de voltaje y corriente y en ondas electromagnéticas guiadas. Este transductor es la antena receptora, la cual dependiendo de la frecuencia y de la aplicación del sistema puede recibir señales provenientes de todas las direcciones de igual manera o en una dirección preferida.

El hecho de que los sistemas de radio comunicación no emplean un medio físico para la transferencia de energía desde el transmisor al receptor, hace que éstos posean una serie de características particulares para ellos y que en ciertas aplicaciones son insustituibles y en otras sería más conveniente aplicar sistemas con otros medios de transmisión.

Las principales ventajas y limitaciones de los sistemas de radio comunicación son:

**Ventajas:**

- .... • **Facilidad de comunicaciones móviles**
- .... • **Facilidad de reconfiguración**
- .... • **Facilidad de comunicaciones multipunto**
- .... • **Facilidad de establecer enlaces en lugares de difícil acceso o sin infraestructura**
- .... • **Económicos**
- .... • **Menor tiempo de instalación**

**Limitaciones:**

- .... • **Susceptibilidad a interferencias electromagnéticas**
- .... • **Espectro electromagnético limitado**
- .... • **Privacidad pequeña**
- .... • **Dependencia de las condiciones ambientales.**

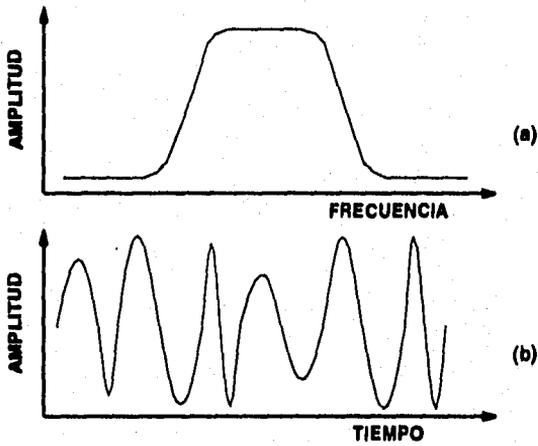
## **2.2 Señales Analógicas y Discretas**

Las señales de comunicación eléctricas pueden ser representadas de diferentes formas para su análisis. Las dos más comunes son las siguientes:

- **DOMINIO DE LA FRECUENCIA.** Representándolas de acuerdo a la energía que contienen las señales en diferentes frecuencias. Esta representación comúnmente

se denomina como el **ESPECTRO** de una señal y sirve para determinar el ancho de banda que dicha señal ocupa. (Figura 2.1.a)

- **DOMINIO DEL TIEMPO.** Representándolas como formas de onda de corriente o voltaje que cambian de valor con respecto al tiempo. (Figura 2.1.b)



**Figura 2.1** Representación de las señales

Las señales eléctricas se clasifican de acuerdo a su continuidad con respecto al tiempo en:

- **SEÑALES ANALÓGICAS:** Varían en forma continua en el tiempo; es decir, tienen un valor definido para cualquier momento. (2.2.a)

- **SEÑALES DISCRETAS:** Su valor está definido solamente para determinados instantes de tiempo. (2.2.b)

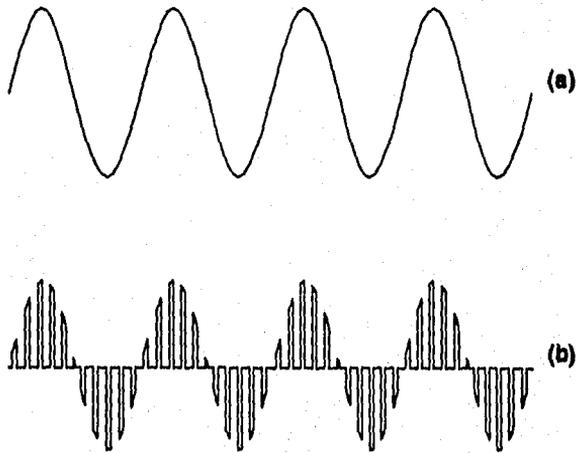


Figura 2.2 Señales analógicas y discretas

### 2.3 Ventajas y Desventajas de la Comunicación Digital

En la transmisión digital existen dos ventajas notables que hacen que entre los Ingenieros de sistemas de telecomunicaciones tenga gran aceptación cuando se la compara con la transmisión analógica. en términos generales se puede decir que:

1. El ruido no se acumula en los repetidores y, por lo tanto, es una consideración secundaria en el diseño del sistema mientras que es la consideración principal en los sistemas analógicos.

2. El formato digital se adapta por sí mismo de manera ideal a la tecnología de estado sólido, particularmente a los circuitos integrados (ventajas técnicas de los equipos digitales).

La mayor parte de la información que se transmite en una red portadora común es de naturaleza analógica, por ejemplo, la voz y el video; al convertir estas señales al formato digital se pueden aprovechar las ventajas de las dos características anteriormente citadas.

Hasta hace apenas unos años, la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones era de naturaleza analógica; sin embargo, la comunicación de tipo digital ha venido cobrando una gran importancia por razones como son la creciente demanda de comunicaciones de datos y el hecho de que la transmisión digital ofrece una flexibilidad para el procesamiento de datos muy superior a la transmisión analógica.

El análisis de las características de las señales y los bloques funcionales de un sistema de comunicación digital tiene una justificación matemática bastante profunda. El objetivo del presente trabajo sin embargo, es presentar de una manera simple dichos conceptos y hacer énfasis en las implicaciones prácticas que estos representan.

Las deducciones y justificaciones matemáticas pueden ser encontradas en numerosos libros de textos utilizados a niveles de Ingeniería y posgrado.

Además del hecho de que por lo general los componentes digitales son de menor costo que los analógicos, existen otras razones quizás aún más importantes por las que los sistemas de comunicaciones tanto de tipo militar como comercial se estén basando cada vez más en la tecnología digital. Entre las principales ventajas se encuentran las siguientes:

- Facilidad de regeneración de las señales
- Mayor confiabilidad
- Más alto desempeño
- Simplicidad para convinar señales
- Facilidad para la implementación de nuevas aplicaciones
- Gran Flexibilidad

a) Facilidad de regeneración de las señales

La forma de onda de un pulso digital que se propaga a través de una línea de transmisión se ve afectado por dos condiciones básicas:

- Características de transferencia de una línea de transmisión:
  - atenuación
  - capacitancia
  - inductancia

- **Ruido e interferencias**

Del mismo modo que si se tratara de una señal analógica, ambos factores ocasionan que la forma de onda del pulso se degrade conforme viaja a través de la línea de transmisión. Sin embargo, dado que los circuitos digitales operan usando dos rangos de voltaje determinados para representar sus dos estados posibles ("1" y "0") dicho pulso es fácilmente regenerado siempre y cuando no haya caído por debajo de cierto umbral de decisión (a los amplificadores que realizan esta tarea se les conoce como **REGENERADORES**). Además, para tener efecto una perturbación deberá ser lo suficientemente grande como para cruzar los umbrales de decisión de nivel "alto" o "bajo".

- b) **Mayor confiabilidad**

Mediante técnicas digitales de detección y corrección de error es posible obtener tasas de error muy bajas (aún en caso de existir un número considerable de errores a nivel de bit, **BER**), haciendo posible obtener una fidelidad de señal muy alta. Algunas de estas técnicas son: verificación de paridad, checksum, verificación de redundancia cíclica (**CRC**). (estas técnicas no son posibles en los sistemas analógicos).

Debido a lo anterior se puede decir que:

- El ruido y otras perturbaciones son mucho menos acumulativos en una cadena de transmisión digital que en una analógica.
- En una señal analógica las distorsiones no pueden ser removidas mediante la simple amplificación.

c) Más alto desempeño

Un claro ejemplo de esto es la implementación de filtros digitales para procesar las señales digitales, lográndose parámetros de atenuación, respuesta a la frecuencia y fase muy superiores a aquellos de los filtros analógicos.

Además, la función de transferencia de un filtro digital puede ser alterada en el grado que se quiera simplemente cambiando los valores numéricos de los parámetros a través de programas, etc. (Figura 3.3).

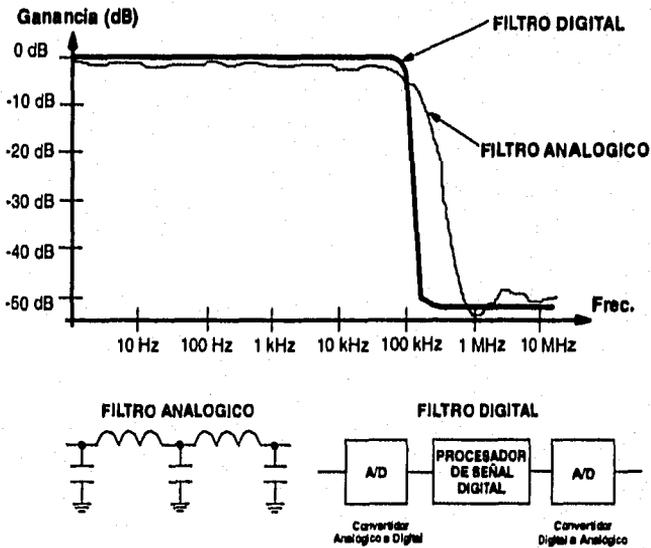


Figura 3.3 Respuesta de un Filtro Digital.

d) Simplicidad para combinar señales.

La combinación de señales digitales utilizando Multiplexaje por División de Tiempo (TDM) es más sencillo que la combinación de señales analógicas usando Multiplexaje por División de Frecuencia (FDM).

e) Facilidad para la implementación de nuevas aplicaciones

El uso de técnicas digitales permite por ejemplo desarrollar algoritmos y métodos para asegurar la privacidad de la información mediante el uso de alguna forma de criptografía de mensajes.

f) Gran flexibilidad

Es posible agrupar diferentes tipos de señales digitales (datos, voz, señales de televisión) y tratarlas en forma idéntica para su transmisión o conmutación, ya que todas ellas se representan mediante "bits". Un ejemplo claro de esto es el concepto de la "Red Digital de Servicios Integrados" o ISDN, que contempla la integración de muchos tipos de señales de diferente origen.

Los sistemas de transmisión digitales presentan las siguientes desventajas:

- Generalmente se requiere mayor ancho de banda
- Se requiere sincronización del sistema

## Capítulo 3

### Formateado de la Información

---

#### 3.1 Sistema de Banda de Base

##### 3.1.1 Filtros

El ancho de banda de un sistema es el intervalo de frecuencia a través del cual la magnitud de la respuesta permanece dentro de un rango de valores determinado. Una red cualquiera tiene efectos del filtraje (en mayor o menor grado) sobre las señales que pasan a través de ella.

De acuerdo con su función de transferencia o respuesta a la frecuencia, los filtros se pueden clasificar de la siguiente manera:

(ver figura 3.1)

- **PASA BAJAS:** Permite el paso de frecuencia desde D.C. hasta un valor específico a partir del cual la magnitud de respuesta comienza a decrecer.
- **PASA ALTAS:** Permite el paso de frecuencias a partir de cierto valor en adelante.
- **PASA BANDA:** Permite el paso de frecuencias dentro de una banda determinada.

Una transmisión vocal está constituida por formas de onda que incluyen muchas frecuencias diferentes. La distribución concreta de las frecuencias es la que determina el tono y el timbre de una voz. La voz humana ocupa una banda de frecuencias comprendida aproximadamente entre 200 Hz y 15,000 Hz. En la práctica, el ancho de

banda se calcula restando la frecuencia más baja que contenga una señal, de la frecuencia más alta que contenga esa misma señal; por ejemplo una transmisión vocal o telefónica, los canales telefónicos suelen ocupar una banda de 300 Hz a 3000 Hz.

Por lo tanto, si restamos el límite superior y el límite inferior obtendremos un ancho de banda de 3,000 Hz, o lo que es lo mismo 3 KHz.

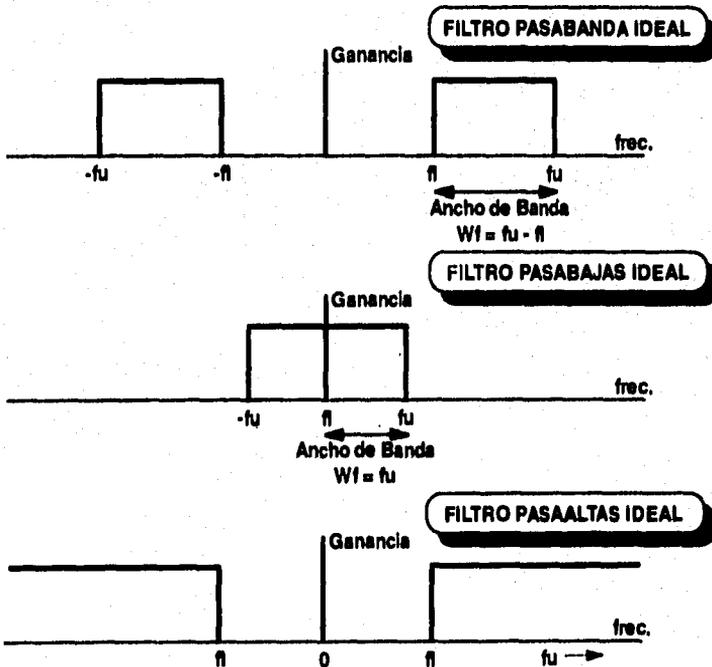


Figura 3.1 Función de transferencia de un filtro

En la práctica el ejemplo más simple de un filtro pasa bajas se compone de una resistencia y un condensador, como lo muestra la Fig.3.2.

El ancho de banda de este filtro pasa bajas se define como aquella frecuencia a la cual el nivel de potencia de la señal de salida ha caído a la mitad de su valor pico; en caso de referirse al voltaje de salida, éste habrá caído a  $.7071$  de su valor pico.

Este punto en la frecuencia que determina el ancho de banda generalmente es expresado en decibeles (dB) como en el punto  $-3$  dB.

Un parámetro importante en la caracterización de un filtro pasa bajas es el llamado FACTOR DE FORMA, el cual se puede interpretar como el grado de aproximación con que la respuesta del filtro se acerca a la respuesta de un filtro ideal.

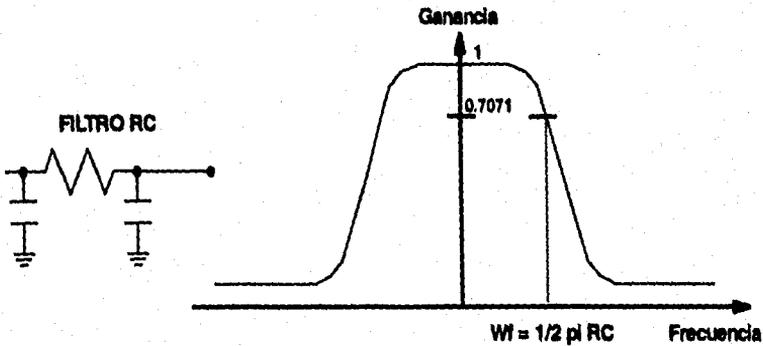


Figura 3.2 Filtro RC y su función de transferencia

Por definición, el factor de forma es la razón entre los anchos de banda de un filtro tomados en los puntos de -60 dB y -6 dB de su respuesta de magnitud o amplitud.

La respuesta de magnitud se acercará más a la de un filtro ideal entre más bajo sea el Factor de Forma. La reducción de dicho factor se logra incrementando el número de elementos componentes del filtro (condensadores y bobinas). (ver figura 3.3).

Dependiendo de sus características de respuesta, existen diferentes tipos de filtros como son: Butterworth, Chebyshev, Bessel.

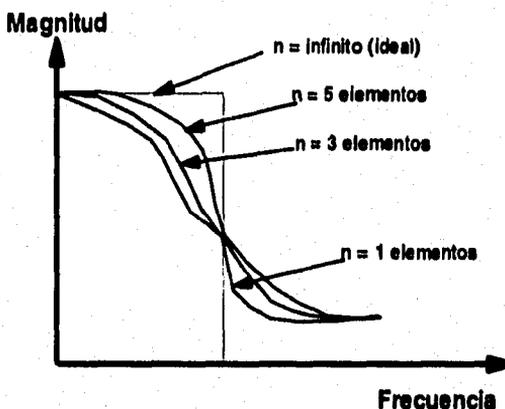
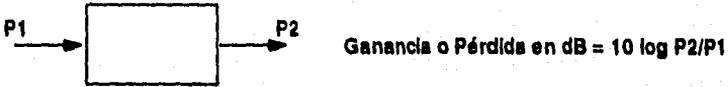


Figura 3.3 Respuesta de magnitud de un filtro

Un decibel (dB) está definido como la relación o razón entre dos niveles de potencia existentes en dos puntos:



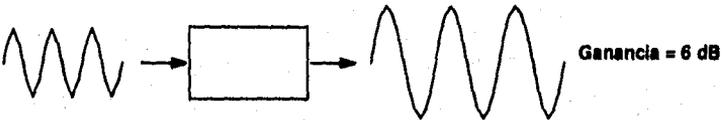
Si el resultado es positivo se puede decir que existe una ganancia de potencia si es negativo será entonces una pérdida.

Esta relación se puede expresar también en términos de la razón entre dos niveles de voltaje:

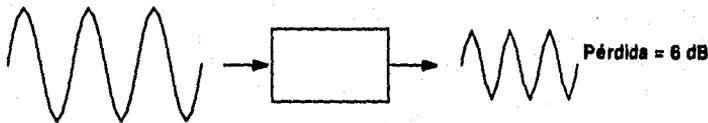


**REGLAS PRACTICAS:**

- Cuando el voltaje de salida de un sistema es el doble que el voltaje de entrada, se dice que existe una ganancia de aprox. 6 dB.



- En forma recíproca, cuando el voltaje de salida es la mitad del voltaje de entrada, se dice que existe una pérdida de aprox.6 dB.

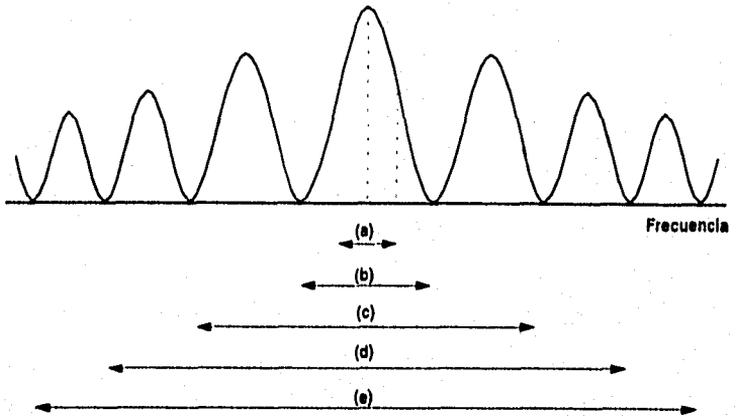


### 3.1.2 Ancho de Banda de una Señal Digital

De igual manera de cuando hablamos de un filtro se utilizan criterios como el del punto de -3 dB en su espectro para definir su ancho de banda, al referirnos a una señal digital existen algunos criterios que dependiendo de la aplicación definen su ancho de banda.

La Figura 3.4 nos muestra la representación general del espectro de una señal digital y los criterios usados para especificar su ancho de banda, de los cuales el criterio (b) es el que generalmente se emplea.

El hecho de que tanto las señales como las funciones de transferencia de los sistemas se puedan describir en términos de sus características espectrales resulta de gran utilidad para conocer el efecto que un sistema puede tener con relación a las señales.



- a) Punto de potencia espectral media (-3 dB)
- b) Anchura del lóbulo principal
- c) Punto de 99% de potencia espectral
- d) Punto de 35 dB (a ésta frecuencia la señal es 35 dB menos potente que el nivel máximo)
- e) Punto de 50 dB

**Figura 3.4** Ancho de banda de una señal digital

Al hablar en el dominio del tiempo y refiriéndonos a la transmisión de señal digital en banda base, los efectos que un sistema pueda tener sobre dicha señal se ilustran en la Fig. 3.5. En el caso de los sistemas de comunicación digital hay que recordar que el receptor solamente tiene que ser capaz de RECONOCER que la señal tiene uno de sus dos posibles estados, de manera que la respuesta obtenida en el caso (b) caracteriza la forma de funcionamiento de estos sistemas; es decir, no es necesario mantener una alta fidelidad de señal para poder funcionar correctamente.

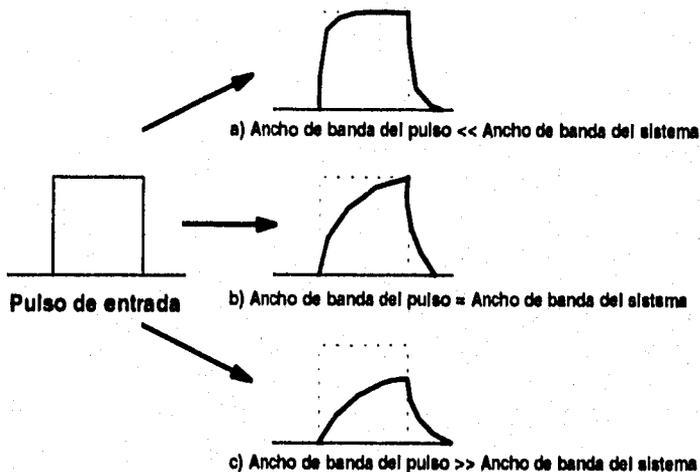


Figura 3.5 Ejemplos de filtraje de un pulso digital ideal

### 3.1.3 Señales de Banda Base

Las principales características de éste tipo de señales son las siguientes:

(ver figura 3.6)

- Su espectro se extiende desde DC hasta algún valor finito (generalmente menos de unos cuantos MHz).

- Este tipo de señales es el que generalmente se usa cuando nos referimos a términos como "información", "mensaje" o "datos".
- Para su transmisión se someten al proceso de formateado (símbolos) y de modulación de banda base o de pulsos.

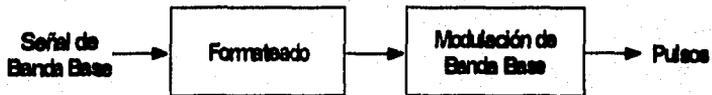


Figura 3.6 Procesamiento de señales de banda base

### 3.1.4 Señales de Banda Ancha

En muchas ocasiones las señales de banda base no resultan apropiadas para transmitirse a través de algún medio de transmisión específico, por lo que se modulan y su espectro es recorrido hacia alguna banda de frecuencia que resulta más adecuada para su propagación en dicho medio. (ver figura 3.7).

La frecuencia alrededor de la cual se encuentra concentrado su contenido espectral se llama frecuencia portadora.

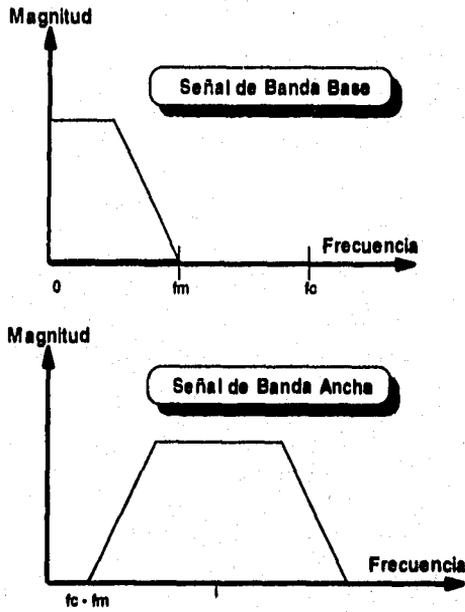


Figura 3.7 Señal de banda ancha

### 3.2 Formateado y Transmisión de Señales de Banda Base

En los sistemas de transmisión digital el FORMATEADO es el primer paso en el procesamiento de señal, permite que la señal de origen sea compatible con el procesamiento digital y transforma la información de origen en símbolos digitales;

siendo preciso mencionar que además del proceso de formateado, existe reducción de redundancia o bien compresión de datos.

La Figura 3.8 muestra el diagrama a bloques de un sistema de comunicación digital para diferentes tipos de información. Como se podrá observar, la información que ya tiene un formato digital se aplica directamente al modulador, mientras que la información textual es transformada a dígitos binarios mediante el bloque codificador. Por otra parte, en caso de tratarse de información analógica, el formateado de la misma requiere de tres pasos:

- Muestreo
- Cuantificación
- Codificación

Los dígitos binarios resultante del proceso de formateado se modulan y son transmitidos a través de un canal de banda base como por ejemplo par trenzado o cable coaxial. De la modulación resultan entonces una serie de pulsos compatibles o adecuados para el medio de transmisión.

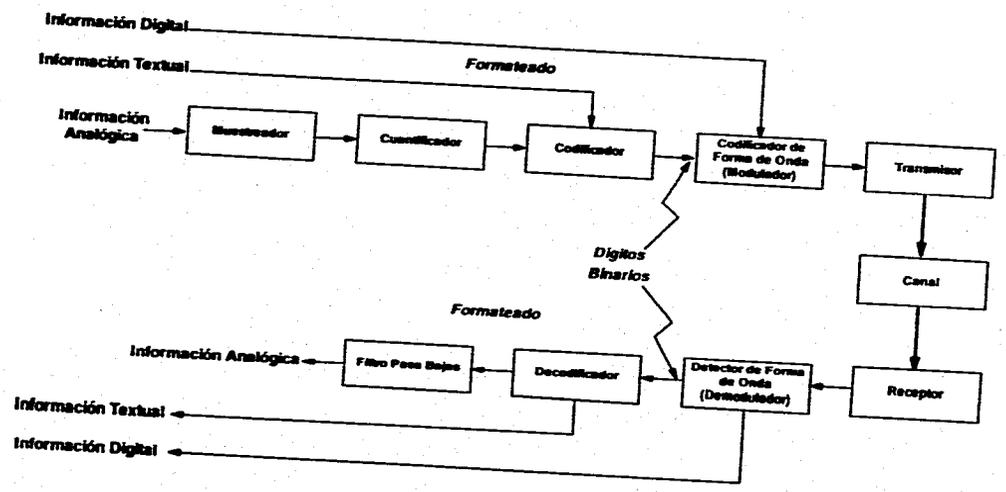


Figura 3.8 Formateado y transmisión de Señales de Banda Base

### **3.3 Formateado de Información Textual (Codificación de Caracteres)**

A excepción de las transmisiones entre las computadoras generalmente la forma original de la información a transmitir es de tipo textual o analógico.

En caso de tratarse de texto, existen varios formatos o códigos estándar mediante los cuales el mensaje textual adquiere un formato digital, entre ellos:

- ASCII
- EBCDIC
- Hollerith

Como sabemos, las redes de computadoras y los sistemas de comunicación transmiten los datos en forma de cifras binarias, es decir, unos y ceros. Además de las representaciones numéricas, las computadoras y las redes han de representar también otros símbolos, como las letras del alfabeto o los caracteres especiales. Para representar estos símbolos se utiliza un código formado por extensión del sistema binario.

La figura 3.9 muestra el código ASCII (American Standard Code for Information Interchange), el cual es el esfuerzo más reciente de la industria norteamericana y sistemas de portadora comunes que respalda el American National Standards Institute,

para elaborar un lenguaje de código universal. El código ASCII es un código de 7 unidades (bits) con 128 combinaciones disponibles para asignación, en el que se dividen en dos grupos de 64. Un grupo se asigna para el subconjunto de caracteres gráficos, el otro subconjunto se asigna a los caracteres de control; se añade un octavo bit para comprobación de errores (bit de paridad ). El código ASCII se usa ampliamente en Norteamérica y tiene considerable aceptación en Europa y América Latina.

Posiciones de bits				7	0	0	0	0	1	1	1	1
				6	0	0	1	1	0	0	1	1
4	3	2	1	5	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	\	p	
0	0	0	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q	
0	0	1	0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r	
0	0	1	1	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s	
0	1	0	0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t	
0	1	0	1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u	
0	1	1	0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v	
0	1	1	1	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w	
1	0	0	0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x	
1	0	0	1	HT	EM	)	8	I	Y	i	y	
1	0	1	0	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z	
1	0	1	1	VT	ESC	+	;	K	[	k	[	
1	1	0	0	FF	FS	.	<	L	\	l	l	
1	1	0	1	CR	GS	-	=	M	]	m	]	
1	1	1	0	SO	RS	.	>	N	^	n	-	
1	1	1	1	SI	US	/	?	O	_	o	DEL	

Figura 3.9 Juego de caracteres ASCII de 7 bits

El código EBCDIC (Extended Binary-Coded Decimal-Interchange Code), es similar al ASCII pero es un verdadero código de 8 bits. El octavo bit se usa para ampliar el código, con lo que se obtienen 256 combinaciones (actualmente también existe el código ASCII extendido de 8 bits).

El código Hollerith se diseñó específicamente para usarse en tarjetas perforadas. Alcanzó gran aceptación en las máquinas de contabilidad y en el campo de la computación. El Hollerith es un código con caracteres de 12 unidades, siendo su capacidad teórica de  $2^{12}$ , es decir, 4096

combinaciones de bits. Debido a su poca flexibilidad el código Hollerith rara vez es utilizado directamente para la transmisión de información, con gran frecuencia se convierte a uno de los códigos de transmisión convencionales como el ASCII o el EBCDIC.

Los mensajes textuales se componen de una secuencia de caracteres alfanuméricos, y para su transmisión estos caracteres son codificados para formar una secuencia de bits llamada señal de banda base. Los bits se pueden entonces combinar en grupos para formar los símbolos que integran un alfabeto, cuyo tamaño dependerá del número de bits utilizados para representar un símbolo:

$$M = 2^k$$

Donde: M es el tamaño del alfabeto (número de símbolos)

k es el número de bits utilizados para representar un símbolo

Un sistema que utilice un alfabeto de  $M$  símbolos se conocerá como un sistema de tipo "M-ario"; por ejemplo:

$k = 1$ bit	$M = 2$ símbolos	sistema binario
$k = 3$ bits	$M = 8$ símbolos	sistema octal

En el caso de un sistema binario, la salida del modulador tendrá solamente dos formas de onda diferentes para representar un valor u otro. En el caso del sistema octal dicha salida tendrá 8 formas de onda distintas para representar cada uno de los 8 valores posibles.

Este tipo de códigos se encargarán de tres importantes funciones:

- Control de dispositivos
- Representación de los datos
- Control de protocolos (Redes de computadoras).

## Capítulo 4

# Modulación de Pulsos Codificados (PCM)

---

### 4.1 PCM

Para convertir una señal analógica en una cadena digital de datos binarios, se emplean diversos métodos. El primero de los métodos más extendidos es la modulación por pulsos codificados (PCM), desarrollada en 1939 por A. H. Reeves en los laboratorios Bell.

En términos generales, la modulación es la alteración sistemática de una onda portadora de acuerdo con el mensaje (señal moduladora) y puede ser también una codificación. La modulación debe ser un proceso reversible, de tal manera que el mensaje (información) pueda ser recuperado en el receptor, por medio de la operación complementaria (la demodulación).

Gracias a técnicas como PCM, es posible el uso de sistemas digitales para la transmisión de voz, datos, fax, información visual codificada, etc. por la red telefónica, usando como medios: cable coaxial, fibra óptica, satélites de comunicación, o bien las microondas.

También es conocida como PCM a la información o señales de banda base obtenidas de la cuantización de las señales analógicas muestreadas (PAM), codificando cada muestra cuantizada en una palabra digital de determinado número de bits en forma proporcional al número de intervalos de cuantización utilizados.

El concepto de PCM es de gran importancia en las telecomunicaciones ya que es la base de la telefonía digital, en la cual se ha estandarizado el uso de una velocidad de muestreo de 8 KHz y un tamaño de palabra PCM de 8 bits. La velocidad de transferencia de datos para un canal PCM es entonces de 64 Kbps.

## 4.2 Formateado de Información Analógica

Para poder ser procesada por un sistema de comunicación digital, la señal analógica debe ser representada de ciertas maneras antes de poder ser codificada. La señal PAM (muestreada) conserva aún la característica propia de toda señal analógica en el sentido que presenta un número infinito de posibles valores, de manera que es necesario someterla a algún proceso que limite el número de posibles valores.

La operación completa para transformar una señal de banda base analógica a digital comprende:

- 1) Muestreo
- 2) Cuantización
- 3) Codificación
- 4) Multiplexión por división de tiempo

La última operación (Multiplexión) sirve para agrupar y transmitir las muestras correspondientes a la señales sobre una misma línea.

En la figura 4.1 se ejemplifica el proceso para obtener una secuencia PCM a partir de la señal analógica de entrada.

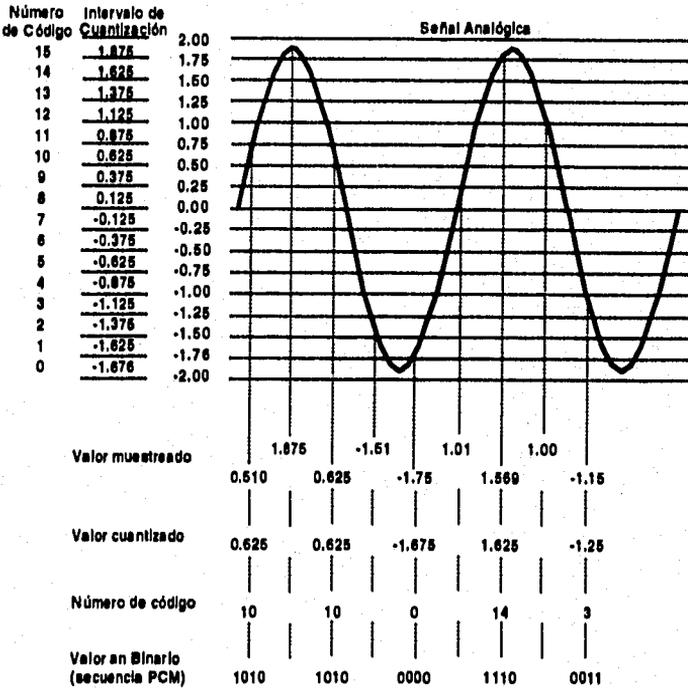


Figura 4.1 Obtención de una secuencia PCM

### 4.3 Muestreo y Retención (Sample and Hold)

El proceso de muestreo consiste en tomar y analizar el valor que tiene una señal (muestra) a intervalos de tiempo regulares (velocidad de muestreo).

La señal resultante de este proceso se conoce como señal PAM (Pulse Amplitude Modulation) o modulada por amplitud de pulso, ya que como se puede apreciar en la figura 4.2 consiste en una secuencia de pulsos cuya amplitud es aquella de la señal de entrada durante el lapso de muestreo.

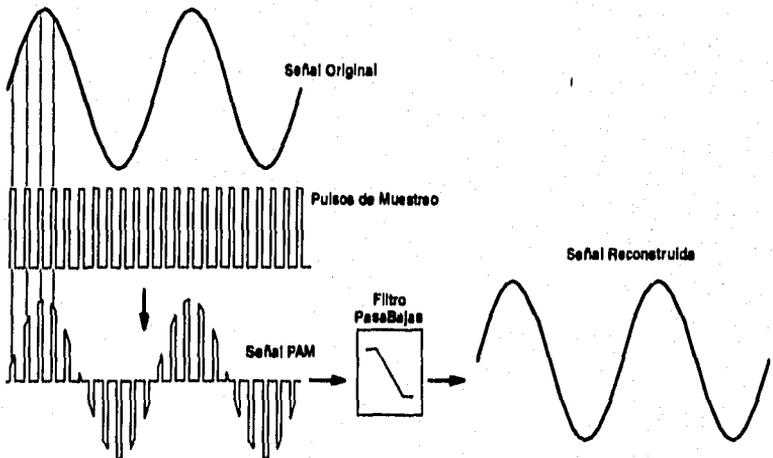


Figura 4.2 Proceso de Muestreo

Siendo muy importante mencionar que una característica favorable de este proceso es que la señal analógica puede ser reconstruida a su forma original utilizando un simple filtro pasabajas cuya frecuencia de corte sea la adecuada.

El proceso de muestreo se puede implementar de diferentes maneras (de acuerdo a su tipo), siendo el más común la operación de muestreo y retención (Sample & Hold) que como su nombre lo indica involucra la retención del valor muestreado de la señal analógica, el cual es retenido hasta que se efectúa la siguiente muestra.

En esta operación un mecanismo de conmutación y almacenamiento (como puede ser un transistor y un capacitor) forman las secuencias de muestras de la forma de onda continua de entrada.

Sabemos que una señal periódica puede descomponerse en una señal constituida por una frecuencia fundamental, más un número "n" de armónicos, como resulta del desarrollo en series de Fourier.

Una señal fónica (voz) por lo tanto, esta compuesta por un cierto número de señales senoidales fundamentales, correspondientes a todas las frecuencias contenidas en la señal vocal, más todos sus armónicos.

Si limitamos con un filtro las frecuencias contenidas en una señal vocal a un valor máximo de 4 KHz, podremos afirmar que ahora nuestra señal puede contener armónicos cuya frecuencia máxima será de 4 KHz.

Una cuestión de gran importancia en el proceso de muestreo es determinar el grado de fidelidad con que la señal original puede ser reconstruida a partir del filtraje de la señal PAM. Para aclarar esto es necesario explicar brevemente el llamado teorema de muestreo o criterio de Nyquist:

" Una señal de ancho de banda limitado que no tenga componentes espectrales arriba de su frecuencia máxima ( $f_m$ ) Hertz, puede ser determinada o representada mediante muestras tomadas a intervalos de tiempos regulares a una frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) igual o mayor al doble de  $f_m$  ".

$$f_s \geq 2 f_m$$

En otras palabras, para muestrear de forma correcta, es decir para después poder reconstruir la señal original, es necesario que el muestreo se realice un número de veces igual al menos al doble de la frecuencia máxima (del armónico de mayor frecuencia) de la señal analógica original.

Puesto que la máxima frecuencia es, como ya se había mencionado de 4 KHz, deberán obtenerse  $4 \text{ KHz} \times 2 = 8000$  muestras por segundo, o sea que la frecuencia de muestreo deberá ser a 8 KHz.

En la práctica la frecuencia de muestreo  $f_s$  generalmente tiene un valor mayor que  $2 f_m$ , ya que de no ser así se requeriría de un filtro ideal para poder reconstruir la forma de onda original. Cuando  $f_s$  es mayor a  $2 f_m$  se dice que existe un proceso de "sobremuestreo" (Oversampling), y el efecto que se observa es que las "copias" del espectro de la señal original se separan unas de otras, haciendo posible el uso de un filtro pasabajas que pueda ser implementado para la reconstrucción de la señal original.

Cuando la frecuencia de muestreo  $f_s$  es menor que  $2 f_m$  se presenta un "traspalamento" de los espectros que hacen posible la regeneración fiel de la señal original; este efecto recibe en inglés el nombre de "Aliasing".

La señal PAM se puede interpretar matemáticamente como resultado del proceso multiplicativo de la señal analógica original y los pulsos de muestreo. El efecto que esto tiene es que el espectro de la señal analógica será "copiado" en forma repetitiva y de manera proporcional al espectro de los pulsos de muestreo. Puede decirse que el circuito muestreador está representado para mayor simplicidad por un interruptor que se cierra 8000 veces por segundo. Transforma la señal analógica de entrada de amplitud variable continuamente en el tiempo, en una serie de pulsos, cada uno de los cuales tiene la amplitud que la señal analógica de entrada tenía en el instante de muestreo.

Además de la técnica de "sobremuestreo" (oversampling) existen otros métodos para suprimir los componentes no deseados de una señal muestreada mediante el uso de filtros llamados "anti-aliasing"

**Prefiltraje:** La señal analógica se hace pasar por un filtro pasabajas antes de ser muestreada para limitar aún más su ancho de banda original.

**Postfiltraje:** La señal muestreada se hace pasar por un filtro pasabajas que recorta el espectro de la parte de la banda base hasta antes de la zona de traslapamiento.

Es importante observar que estas técnicas de filtraje producen una cierta pérdida de información de la señal, ya que recortan de una u otra forma el espectro original de la señal de banda base.

#### **4.4 Cuantización**

Una vez efectuado el muestreo, la señal se somete a una segunda etapa de traducción: la cuantificación cuyo objetivo es asignar un valor a cada señal PAM dividiendo el rango de amplitud de la señal en un número finito de valores discretos, y dependiendo de la amplitud de la señal analógica asignar el valor discreto más cercano para cada muestra.

Esta tarea es realizada por un convertidor analógico a digital (A/D), y se lleva a cabo después de la operación de muestreo y retención (S & H).

La cuantización de las señales trae como consecuencia que la forma de onda original no pueda ser recobrada o reconstruida en forma totalmente exacta.

El número de niveles de cuantización estará dado por la relación:

$$L = 2^n$$

Donde:

**L** es el número de intervalos de cuantización

**n** es el número de bits usados para representar digitalmente las muestras PAM

Entre más niveles de cuantización se tengan mayor será la fidelidad de la señal reproducida, aunque como es de esperarse este aumento en el número de niveles trae como consecuencia la necesidad de un mayor ancho de banda del sistema. Si el cuantificador asigna a la señal un máximo de 128 valores, cada muestra requerirá 7 bits ( $2^7 = 128$ ). Si son 256 los valores posibles, cada muestra exigirá 8 bits ( $2^8 = 256$ ). Un cuantificador con 128 escalones de cuantificación necesitará una velocidad de transmisión de 56000 bits por segundo ( $8000 \times 7 = 56000$ ). Un cuantificador de 256 escalones exigirá 64000 bits por segundo para la transmisión ( $8000 \times 8 = 64000$ ).

Los experimentos indican que con 2048 escalones de cuantificación puede conseguirse una señal vocal de calidad adecuada. Sin embargo, si cada muestra exige 11 bits ( $2^{11} = 2048$ ), la velocidad de transmisión habrá de ser de 88 Kbits por segundo, por lo que resulta muy conveniente disminuir el número de escalones cuánticos.

Dependiendo de la forma como se realiza la asignación de valores de la señal muestreada existen diferentes tipos de cuantización:

- Cuantización uniforme o lineal

En este proceso cada rango total de valores de voltaje que pueden ser manejados es subdividido en un número de subrangos de voltajes iguales. Cada rango corresponde a una combinación de código; donde cada valor de voltaje situado entre los límites más bajo y más alto de un subrango, es codificado con el mismo código, generando un pequeño error (ruido de cuantización). Este tipo de cuantización es por lo general la que se utilizan los convertidores A/D, y presenta ciertas características como por ejemplo el hecho de ser poco sensible a cambios pequeños de la señal de entrada. Esta cualidad se traduce en que comúnmente se logra una buena relación señal a ruido para el nivel medio de las señales de entrada y que el ruido de cuantización es el mismo para cada nivel o intervalo de cuantización (subrango).

- Cuantización no uniforme o no lineal

En este proceso los niveles de cuantización son seleccionados de modo logarítmicos. Este modo de cuantización se desarrollo para obtener una relación "señal a ruido", de un valor constante para cualquier valor de la señal. Este método se lleva a cabo subdividiendo el rango dinámico de entrada en niveles o intervalos irregulares, de manera que el nivel de ruido pueda tener efectos similares para cada intervalo.

La diferencia fundamental entre la cuantización uniforme y no uniforme puede observarse en la figura 4.3.

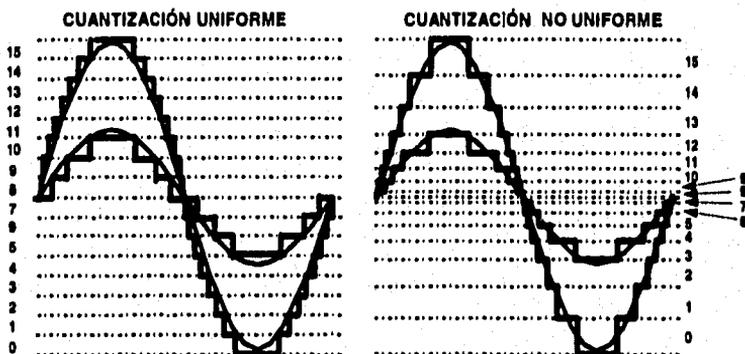


Figura 4.3 Cuantización Uniforme y No Uniforme

## 4.5 Codificación

Es el proceso de generar una palabra de código que representa un valor cuantizado. Una vez cuantizada la muestra de entrada esta limitada a una cierta cantidad de valores discretos, que serán representados por impulsos binarios (con dos niveles).

Una vez asignado un valor binario a la señal PAM durante el proceso de cuantización, la tercera etapa codifica las muestras en una cadena de bits para ser transmitidas. En el receptor los datos han de presentarse al convertidor D/A a la misma velocidad a la que fué muestreada la señal de origen. El convertidor generará una tensión para representar cada uno de los 8000 datos. La conversión de digital a analógico dará como resultado una señal que será réplica casi exacta de la forma de onda analógica original.

En términos generales una señal analógica reconstruida a partir de pulsos cuantizados presentará efectos de ruido que han sido producidos o inducidos por diferentes fuentes:

- a) Efectos producidos por el muestreo y la cuantización.
- Ruido de cuantización: es el error producido en la cuantización o aproximación, es la diferencia entre la entrada y la salida de un cuantificador, el cual es inversamente

proporcional al número de niveles usados en el proceso (entre más niveles se tengan menor será el error o ruido).

- **Saturación del cuantificador:** Este fenómeno ocurre cuando el valor de la señal de entrada sobre pasa el valor máximo del rango de operación lineal del convertidor. Este tipo de ruido es mucho más indeseable que el ruido de cuantización, ya que por su naturaleza, sus efectos generalmente no pueden ser eliminados mediante filtraje u otros métodos.
- **Jitter de muestreo:** Este fenómeno se refiere a que los pulsos de muestreo o instantes en que se realizan el muestreo no están espaciados de manera uniforme; generalmente es un fenómeno de tipo aleatorio, por lo que no es posible predecir para un pulso determinado cual va a ser su corrimiento con respecto a la posición nominal que deberá ocupar en el tiempo. Los efectos de "Jitter" se minimizan mediante el mejoramiento de la calidad de las señales de reloj de referencia y el aislamiento correcto de las fuentes de alimentación.

#### b) Efectos del canal de comunicación.

- **Ruido del canal:** Este puede ser producido por varios factores como son: Ruido térmico, interferencias producidas por fenómenos naturales, interferencias producidas por otros usuarios y transitorios producidos por la conmutación de circuitos.

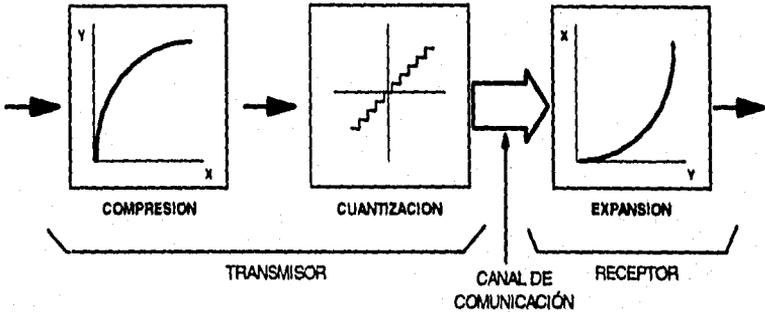
- **Interferencia intersimbólica:** Este efecto se presenta cuando el ancho de banda de canal es igual o solamente un poco mayor al ancho de banda de la señal a transmitir.

## 4.6 Comander

En los primeros sistemas de comunicación digital, la relación entre las señales PAM y el código PCM era lineal. Por lo tanto, las variaciones de amplitud de la señal se traducían en variaciones idénticas en los códigos PCM.

Este efecto traía como resultado una notable distorsión de cuantificación cuando las señales eran de pequeña amplitud.

En las técnicas más modernas, las señales de mayor amplitud se comprimen dentro de un margen más estrecho de amplitudes dividido en un cierto número de niveles de Cuantización. Las señales de menor amplitud se expanden. De este modo aumentan el número de niveles de cuantización disponibles, a la vez que disminuye la distorsión global ( error de cuantización ). Una vez que ha sido modificada por el compresor, la señal es cuantizada uniformemente y puesta a disposición del sistema para su transmisión. En el lado del receptor la señal cuantizada es sometida a un proceso inverso al de compresión, conocido como expansión. En la práctica el circuito que desempeña estas funciones de compresión y expansión recibe el nombre de Comander ( compresor-expander ). Ver figura 4.4.



**Figura 4.4** Proceso de Cuantización No Uniforme (Compunder)

Resulta obvio pensar que si la señal de entrada tiene un rango dinámico amplio pero la mayor parte del tiempo su nivel de amplitud es bajo, entonces la cuantización no uniforme presenta grandes ventajas en el sentido que para esas señales de bajo nivel que ocurren con frecuencia se tendrán varios niveles o intervalos de cuantización, y su reproducción del lado del receptor tendrá mayor fidelidad que si se usará una cuantización uniforme.

Este hecho es de vital importancia debido a que esa es precisamente la forma como se comportan las señales producida por la voz humana. De manera que para digitalizar la señales de voz generalmente se utiliza cuantización no uniforme.

La función de compansión y la posterior de expansión siguen una de las dos leyes o relaciones logarítmicas: La ley A (empleada en Europa y América Latina) o la ley  $\mu$  utilizada en Norte América y Japón). Ambas leyes son bastante parecidas, salvo que la ley A usa una relación lineal dentro del margen de pequeñas amplitudes. Para la ley A, el tamaño mínimo del escalón es de 2/4096, mientras que para la ley  $\mu$  es de 2/8159. En los sistemas reales de Multiplexión por división de tiempo, las leyes de compansión se realizan mediante aproximaciones lineales por segmentos. La ley  $\mu$  se representa mediante 15 segmentos, mientras que la ley A se expresa con 13 segmentos. Ambas leyes superan ampliamente los requisitos mínimos de reducción de distorsión en las señales de niveles más bajos.

El proceso de codificación está estrechamente relacionado con la cuantización. En los sistemas prácticos, bien sea que se utilice la ley A, o la ley  $\mu$ , para la cuantización se usan curvas de segmentos equivalentes a la curva de compansión; como la curva para la ley A mostrada en la figura 4.5. El primer elemento (bit) de código (palabra de 8 bits) indica si el paso de cuantización está en la mitad positiva o negativa de la curva. Por ejemplo, si el primer elemento del código fuera 1 indicaría que el valor es positivo (es decir, el paso de cuantización está arriba del origen). Los tres elementos (bits) siguientes del código identifican al segmento, puesto que hay 7 segmentos arriba y 7 segmentos abajo del origen (eje horizontal). Los 4 últimos bits de la palabra indica el valor dentro de los 16 niveles que tiene cada segmento. Así queda plenamente definido el valor de cada muestra representada en un código de 8 bits.

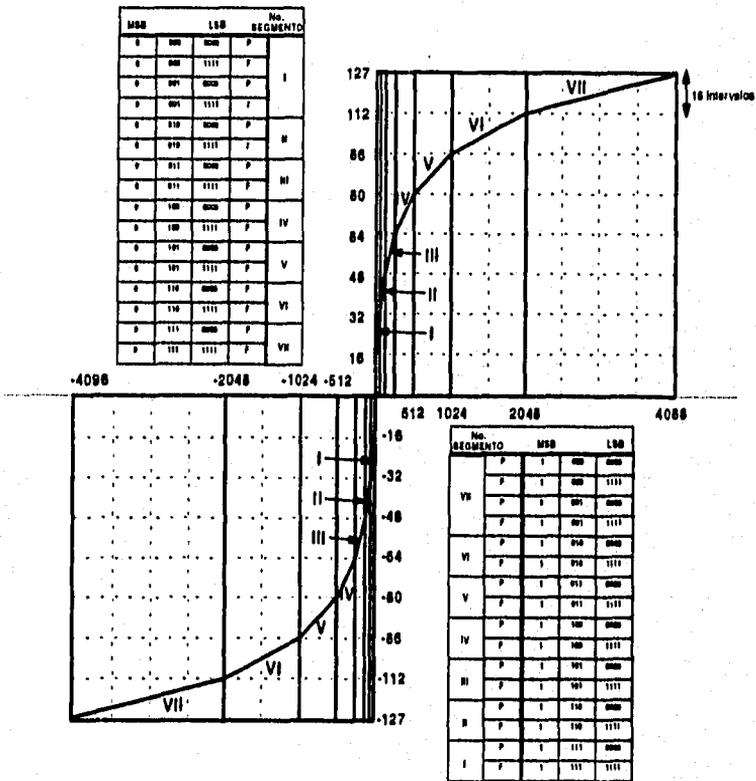


Figura 4.5 Ley A de 7 segmentos

### 4.7 Convertidores A/D

Un convertidor analógico digital toma un voltaje de entrada analógico y después de un cierto tiempo produce un código de salida digital que representa a la entrada

analógica. Hoy en día por lo general la implementación de los convertidores A/D se lleva a cabo en circuitos integrados (integrando algunas veces los procesos de muestreo, retención, cuantización) que comercialmente están disponibles para diferentes números de bits: 4,8,10,12,16,20,24 bits. Las características de un convertidor A/D son:

- **Resolución:** Este término se define como el más pequeño cambio requerido en la entrada analógica de un convertidor A/D para cambiar su código de salida en un nivel digital. Puede expresarse como un porcentaje de la escala completa, en milivolts por un determinado rango de entrada, o simplemente como el número de bits en el código de cuantización.
- **Exactitud:** Se define como la diferencia entre el voltaje de entrada verdadero y el código binario de salida equivalente. Es llamada exactitud absoluta cuando se especifica en volts reales. Es más comúnmente especificada relacionando la señal analógica con el tamaño del bit menos significativo y es llamada exactitud relativa. En cualquier caso es la máxima suma de todos los errores de conversión, incluyendo el de cuantización.
- **Tiempo de conversión:** Después de que un comando "Start" es recibido en un convertidor analógico digital, le lleva un tiempo finito  $T_c$  o tiempo de conversión antes de que pueda proporcionar datos varios. La duración de tiempo de conversión depende del método de conversión utilizado.

## Capítulo 5

# Códigos de Transmisión

---

### 5.1 Transmisión de banda base.

Después de haber sido codificada la señal PCM en forma binaria el resultado será una señal unipolar en la cual se tendrá un importante factor como es la existencia de intervalos repetitivos de secuencias de "unos" o "ceros" consecutivos, con sus respectivos componentes de D.C. que no pueden ser transmitidas a través de transformadores de acoplamiento.

Para resolver este problema son utilizados distintos tipos de códigos de línea que convierten la señal de unipolar a bipolar. Estos códigos empleados en la transmisión de señales digitales deberán tener las siguientes características:

- **Componente de D.C.:** El promedio de componente de corriente directa (D.C.) introducido en la línea deberá ser de 0 Vcd, ya que esto incrementará enormemente la distancia a ser cubierto por el sistema.
- **Autosincronización:** El bit de reloj debe ser enviado hacia el receptor para sincronizarse con la señal de entrada, sin que exista la necesidad de otra señal de sincronización.

- **Detención de errores:** Algunos códigos permiten la detección de errores sin necesidad de introducir bits adicionales para dicho propósito.
- **Compresión del ancho de banda:** Códigos como los de tipo de multinivel incrementan el uso eficiente del ancho de banda disponible.
- **Inmunidad al ruido:** Algunos códigos presentan mayor inmunidad al ruido que otros; por ejemplo, los códigos NRZ son mejores en ese sentido que los RZ.

A continuación, en la figura 5.1 se muestran los códigos de línea más comunes:

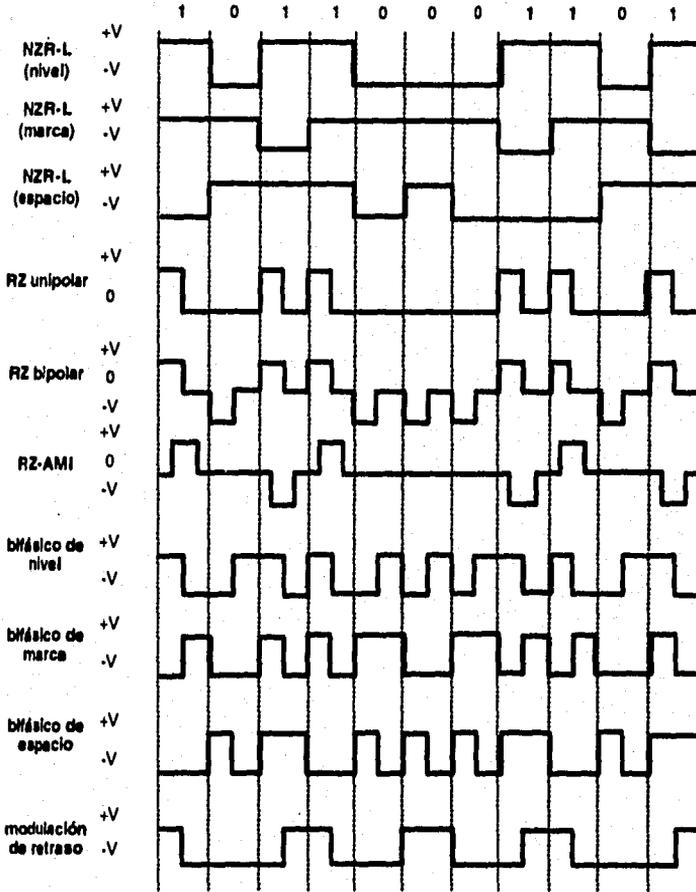


Figura 5.1 Códigos de línea

## 5.2 Multiplexión por División de Tiempo (TDM)

El problema de la transmisión simultánea de varios canales telefónicos por el mismo sistema portador (cable o radio enlace) que se ha resuelto para los sistemas analógicos con la técnica de los múltiplex por división de frecuencia (FDM) encuentra la correspondiente solución para los sistemas digitales con los múltiplex por división de tiempo (TDM), cuyo principio está mostrado en el esquema básico de la figura 5.2.

La señal fónica, al muestreada con la frecuencia de 8000 Hz por segundo, lo que significa que entre una muestra y la siguiente tengamos a disposición un intervalo de  $1/8000 \text{ seg.} = 125 \mu\text{seg.}$  Si estamos en condiciones de limitar por ejemplo a 1  $\mu\text{seg}$  el tiempo necesario para la obtención de una muestra, podemos utilizar los 124  $\mu\text{seg}$  restantes para muestrear señales de otros canales, que podrán ser cuantizados, codificados y transmitidos todos por la misma línea. Es lo mismo que suponer un interruptor de 125 posiciones, que pueda cumplir un ciclo entero de exploraciones de 125  $\mu\text{seg.}$  Si a cada posición del interruptor está conectado un canal diferente, habremos efectuado la exploración y el muestreo de los 125 canales. Las muestras individuales se encontrarían todas situadas en secuencia una a continuación de otra con continuidad y en ésta posición serían transmitidas y recibidas después de haber pasado la codificación y decodificación. Obviamente hay una gran dificultad para realizar todo esto. En primer lugar no existiría intervalo entre las muestras; en segundo lugar necesario que el codificador tenga tiempo para efectuar las operaciones de cuantización y codificación, por lo que es necesario limitar el número de canales.

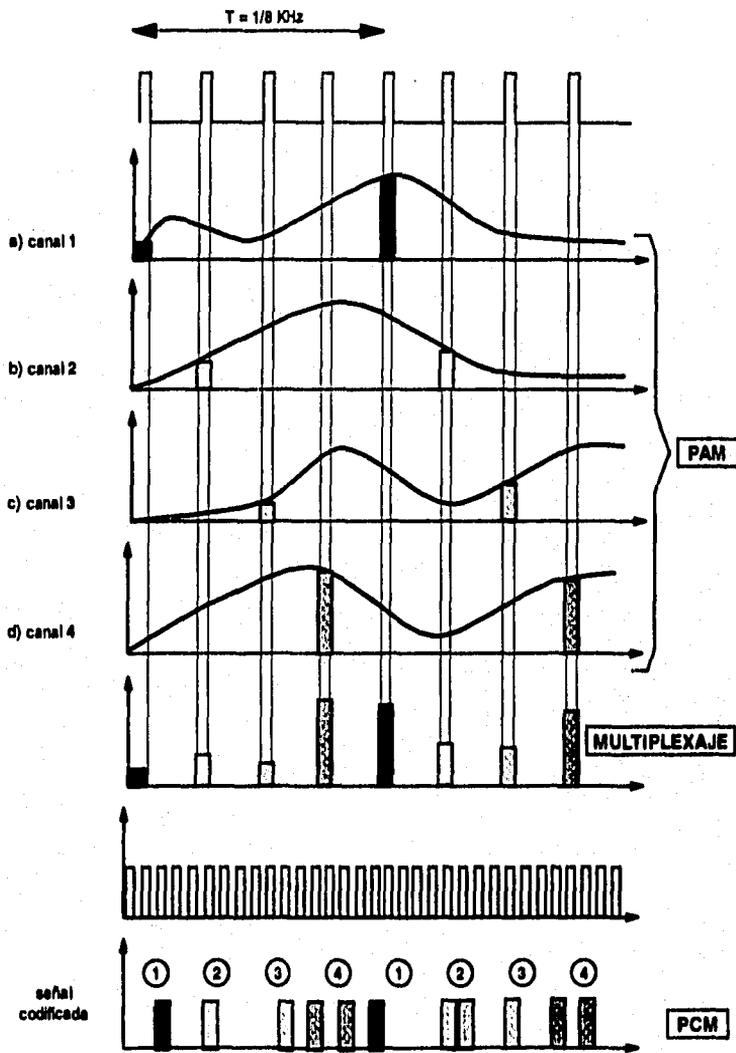


Figura 5.2 Ejemplo de muestreo, cuantización y codificación de cuatro señales multiplexadas en tiempo

# Conclusiones y Bibliografía

---

## Conclusiones Finales

En las últimas dos décadas, la tecnología en electrónica y telecomunicaciones ha avanzado extraordinariamente, y debido a esto también se ha progresado bastante en el desarrollo de sistemas digitales integrados, para representar y transmitir voz, datos y otros tipos de información. La posibilidad de digitalizar, almacenar y reproducir la voz humana está dando lugar a nuevas aplicaciones en numerosos terrenos. Sin embargo, el auténtico potencial de la digitalización de voz se verá en el futuro a medida que mejoren las técnicas de reducción del ancho de banda y de la velocidad de transmisión.

La convergencia de las computadoras y las telecomunicaciones, ha generado oportunidades de desarrollo multipropósito y redes digitales altamente integradas a un costo efectivo.

En el campo de las microondas se tienen grandes avances en tecnologías, ya que en la transmisión de voz y de datos por este medio, es de los más económicos comparativamente con otros medios de comunicación.

Por las redes digitales, concebidas en un principio para la comunicación telefónica se transmite un tráfico de datos cada vez mayor, lo que hace aumentar las exigencias de

calidad de la transmisión. Las velocidades de transmisión que ayer eran de KBS ( $10^3$  bits por segundo) son ya de MBS ( $10^6$  bits por segundo), y llegarán a ser de cientos de miles de MBS en un futuro muy próximo si continúan progresando al ritmo actual las técnicas de transmisión.

En el mundo de los negocios se está produciendo un cambio paralelo, al conceder las empresas una importancia creciente a las redes de comunicación que proporcionan informaciones vitales con gran rapidez. Dichas redes no suponen ya una simple inversión justificable, sino que resultan imprescindibles a las empresas para eliminar un almacenamiento de información redundante, mantener el nivel de operaciones y mejorar su competitividad.

Por las necesidades actuales y por el gran desarrollo de las telecomunicaciones en general, es que en nuestro país se está introduciendo con gran aceptación la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI), que representa la nueva era de las telecomunicaciones y es calificada por los expertos como la red del siglo XXI, en la que se construirá la "Era de la Información".

Otra de las fuertes tendencias que está teniendo el sistema de comunicaciones nacional es la introducción de transmisión por Fibra Óptica. Siendo muy utilizado éste medio debido a las ventajas que posee, tales como pérdidas por atenuación muy bajas, y ser directamente compatible con los sistemas digitales de comunicación, así como con las redes de computadoras.

En general, se puede concluir lo siguiente: que la tendencia actual en el ámbito de telecomunicaciones, es utilizar sistemas digitales, con medios de transmisión capaces de soportar una gran cantidad de canales y de datos a velocidades muy altas.

Siendo las comunicaciones vía microondas aptas para cumplir con todos éstos requisitos, por lo que seguirán siendo ampliamente utilizadas.

## Referencias Bibliográficas

### Libros:

- **"Telecommunication Transmission Handbook"**

Roger L. Freeman

A Wiley-Interscience Publication

John Wiley & Sons

- **"Transmisión de Información Modulación y Ruido"**

Mischa Schwartz

Ed. Mc. Graw Hill

- **"Principios de Telecomunicaciones"**

Wayne Tomasi

Ed. Prentice Hall

- **"Fundamentos de comunicación de datos"**

Jerry FitzGerald & Tom S. Eason

Ed. Limusa

**Cursos y Tesis:**

- **"Fundamentos de Comunicaciones Digitales"**

TELEDATA TECHNOLOGY

- **"Comunicaciones vía Microondas"**

Palacio de Minería UNAM

- **"Principios de Transmisión Digital"**

Escuela de la Secretaría de Telecomunicaciones de México CONTEL

- **"Diseño de Enlaces PCM por Microondas"**

Escuela de la Secretaría de Telecomunicaciones de México CONTEL